

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОРАЗОВОГО ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

*Э.А. Савастенко, к.т.н., ст. преподаватель; А.А. Савастенко, к.т.н., доцент  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет  
В.А. Марков д.т.н., профессор, зав. кафедрой  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Актуальными проблемами современного двигателестроения являются необходимость дальнейшего улучшения топливной экономичности и экологических показателей дизелей. К эффективным технологиям улучшения этих показателей можно отнести применение многократного впрыскивания топлива в камеру сгорания дизельного двигателя. Приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований влияния многократного впрыскивания топлива на улучшение экономических и экологических показателей дизельного двигателя, а также снижение уровня шума.

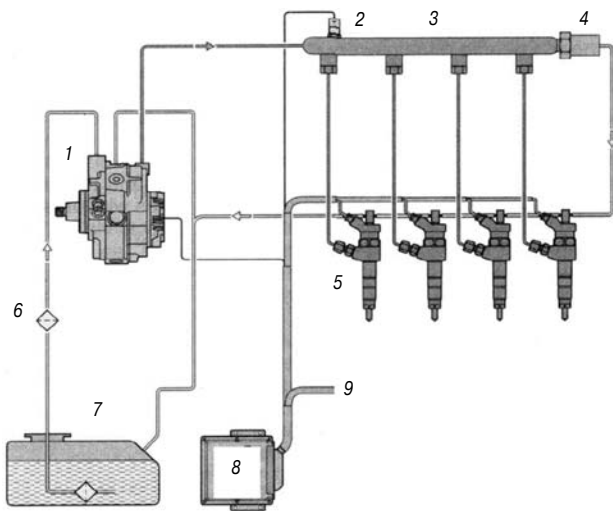
### Введение

Среди показателей, характеризующих работу двигателей внутреннего сгорания (ДВС) приоритетными являются топливная экономичность и токсичность отработавших газов (ОГ) [1, 2]. Необходимость снижения расхода топлива обусловлена истощением мировых запасов нефти и повышением цен на нефтепродукты [3, 4]. Требования к уровню выбросов вредных веществ устанавливаются законодательно и определяют саму возможность допуска двигателя к эксплуатации. Действующие в настоящее время ограничения на выбросы вредных веществ с ОГ распространяются на следующие токсичные компоненты: оксиды азота  $\text{NO}_x$ , монооксид углерода  $\text{CO}$ , легкие несгоревшие углеводороды  $\text{C}_x\text{H}_x$ , твердые частицы [2, 3].

Наиболее простым и эффективным средством воздействия на рабочий процесс дизеля с целью улучшения его экологических показателей является совершенствование процесса топливоподачи [1, 5, 6]. Именно процессы топливоподачи, распыливания топлива и смесеобразования определяют характер протекания процесса сгорания и, как следствие, показатели токсичности ОГ. Одно из условий достижения требуемых экологических показателей дизелей — повышение давления впрыскивания топлива, позволяющее повысить качество распыливания топлива [7–9]. Необходимо реализовать управление фазами топливоподачи

(в частности, углом опережения впрыскивания топлива — УОВТ), а также законом подачи топлива (включая реализацию многократного впрыскивания). Для достижения требуемых показателей дизелей необходимо обеспечить высокую гибкость и высокое качество управления топливоподачей во всем диапазоне рабочих режимов дизеля [5, 7]. Возможности управления топливоподачей значительно расширяются при применении электронных и микропроцессорных средств управления, а также при использовании топливных систем, обеспечивающих высокие давления впрыскивания и независимые от режима работы двигателя характеристики впрыскивания и распыливания топлива [10, 11]. Наиболее перспективными в этом отношении являются получившие широкое распространение аккумуляторные системы топливоподачи типа common-rail (CR), которые обеспечивают высокое и регулируемое давление впрыскивания, управление характеристикой впрыскивания в сочетании с компактностью и удобством компоновки на двигателе [7, 8, 12, 13]. Принципиальная схема аккумуляторной топливной системы типа CR представлена на рис. 1. Эти системы серийно выпускаются ведущими зарубежными фирмами — «Robert Bosch» и «Siemens» (Германия), «Zexel» и «Nippon Denso» (Япония) и фирмой «Delphi Diesel Systems», входящей в международный концерн «Delphi» [7, 14]. Эта фирма является поставщиком систем DCR (Delphi Common Rail) для дизелей фирм «Renault/Nissan», PSA, «Hyundai/Kia», «Ford» и др. В настоящее время разработкой систем типа CR занимаются все ведущие мировые двигателестроительные фирмы. Совершенствование этих систем — наиболее динамично развивающееся направление в двигателестроении.

Серийные аккумуляторные топливные системы типа CR при общих подходах к принципам управления топливоподачей и близких параметрах топливоподачи различаются, главным образом, по конструктивному исполнению и принципам работы ТНВД и форсунок с электроприводными управляющими клапанами [14–17]. При разработ-



**Рис. 1. Принципиальная схема аккумуляторной системы типа CR:**

1 — топливный насос высокого давления (ТНВД); 2 — датчик высокого давления; 3 — топливный аккумулятор; 4 — клапан предельного давления в аккумуляторе; 5 — форсунки; 6 — топливный фильтр тонкой очистки; 7 — топливный бак; 8 — электронный блок управления (ЭБУ); 9 — датчики режимных параметров

ке и совершенствовании систем типа CR необходимо определить целесообразные характеристики впрыскивания.

Характеристика впрыскивания — заданный закон подачи топлива через форсунку по времени  $Q_{\phi} = f(t)$  или по углу поворота коленчатого вала (ПКВ)  $Q_{\phi} = f(\varphi)$  предопределяет характер протекания процесса сгорания. Жесткость процесса сгорания (динамика цикла) зависит от протекания начальной фазы закона подачи топлива и периода задержки воспламенения (ПЗВ). Продолжительность впрыскивания оказывает сильное влияние не только на динамику процесса сгорания, но и на его эффективность, т. е. на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ.

В транспортных дизелях, оснащенных топливными системами типа CR, реализуются различные законы подачи топлива: треугольный, прямоугольный, трапециевидный, двухстадийное (двухразовое) и многоразовое впрыскивание [5, 7]. Для каждого режима работы дизеля существует оптимальный процесс топливоподачи.

#### **Многоразовое впрыскивание топлива как средство улучшения экономических и экологических показателей дизелей**

Организация двухразового впрыскивания в транспортных дизелях стала доступной за счет подачи двух отдельных управляющих импульсов, вследствие чего оно нашло применение в первых же промышленных образцах системы типа CR [9, 15]. Реализация двухразового впрыскивания позволяет обеспечить более мягкое и эффективное сгорание топлива, снизить шумность работы

двигателя и выбросы оксидов азота  $\text{NO}_x$ . В дизеле JTD Alfa Romeo 156 [18] двухразовое впрыскивание позволило снизить шумность работы дизеля на 3–8 дБ, обеспечить снижение эмиссии всех нормируемых вредных веществ с ОГ. Этот результат достигнут за счет тщательной оптимизации параметров впрыскивания на каждом режиме работы, включая давление топлива в аккумуляторе системы CR, дозы и фазы (УОВТ) запальной и основной порций топлива.

Перспективным с точки зрения снижения вредных выбросов дизеля представляется организация многоразовой подачи топлива. Она реализуется во многих современных транспортных дизелях. В автомобилях фирмы «Fiat» используется аккумуляторная топливная система common rail — типа CR Multijet, позволяющая в зависимости от режима работы дизеля изменять количество впрысков топлива от 10 до 15 за цикл. Принципиальное отличие метода управления топливоподачей в этой системе от электроимпульсного управления состоит в дискретности его гидравлической части. Из множества реализуемых на тактах сжатия–расширения впрыскиваний каждое управляется индивидуально и заканчивается посадкой иглы. Это позволяет сформировать единую универсальную программу управления каждым впрыскиванием, повысить стабильность осуществления задаваемой характеристики подачи топлива [19].

Приведенные в работе [20] экспериментальные данные по дизелю OM611 фирмы «Mercedes-Benz» с системой топливоподачи типа common-rail (давление в аккумуляторе  $p_{\text{акк}} = 80$  МПа) и цилиндровой мощностью  $N_{e \text{ цилл}} = 30\text{--}50$  кВт показывают, что запальная порция топлива должна быть весьма малой во избежание ухудшения топливной экономичности и увеличения выбросов сажи (твердых частиц). Обеспечение минимальной устойчивой подачи топлива — важнейшая проблема при реализации двухразового впрыскивания. Достигнутый на сегодняшний день объем этой подачи составляет 1–3 мм<sup>3</sup>. Такие небольшие объемы подачи запального топлива могут быть обеспечены путем форсирования командного импульса в электроприводе форсунки или использования пьезопривода клапана форсунки.

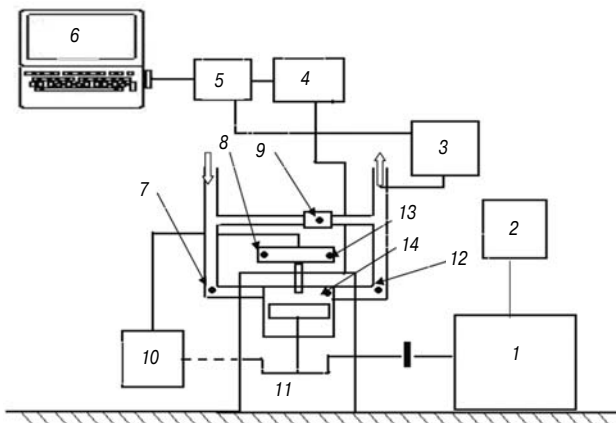
В ряде случаев вместо двухразового впрыскивания целесообразна реализация многоразового впрыскивания. Например, для разогрева каталитического восстановительного нейтрализатора (DENOX) на режимах с малыми нагрузками необходимо предусмотреть возможность дополнительного впрыскивания через 90–200 град поворота коленчатого вала (ПКВ) после основной подачи. Доза дополнительного впрыскивания обычно составляет около 2 % от основной дозы

топлива [21]. Проблема заключается в необходимости подачи малой дозы топлива после основного впрыскивания (эта порция даже меньше по объему запальной порции).

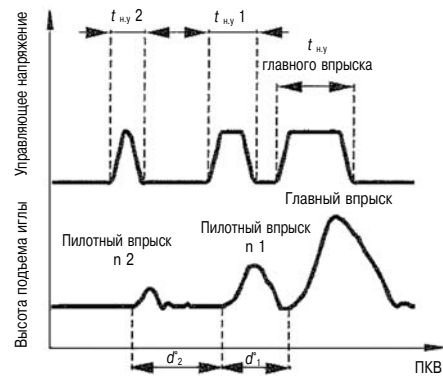
Проведенный анализ показал, что для ускорения разработки и постановки на производство отечественных аккумуляторных топливных систем для автомобильных дизелей необходим тщательный анализ конструктивных особенностей и рабочего процесса серийно выпускаемых зарубежных аккумуляторных систем типа CR, который практически невозможен без проведения обширных экспериментальных исследований дизеля. Целями настоящего исследования является анализ возможностей реализации характеристик многоразового впрыска топлива в транспортном дизеле и оценка влияния этих характеристик на показатели топливной экономичности двигателя, токсичности ОГ, шумности его работы.

#### Экспериментальная установка для исследования дизеля с системой топливоподачи типа common-rail

При проведении экспериментальных исследованиях была выполнена оценка степени влияния характеристик многоразового впрыска и его параметров (время управляющего напряжения, характеризующее подачу топлива, время задержки между впрысками и др.) на показатели двигателя. Испытания проводились на моторном стенде с одноцилиндровым отсеком четырехцилиндрового дизельного двигателя серии K9K фирмы «Renault» (Франция). Это семейство рядных четырехцилиндровых дизелей с рабочим объемом  $iV_h$  около 1,4 л, устанавливается на такие модели автомобилей,



**Рис. 2. Схема моторного стенда и его оборудования:** 1 — генератор; 2 — пульт управление стендом; 3 — газоанализатор Bosch ESA3.250; 4 — ЭБУ с платой ЕТК (позволяющей считывать данные в реальном времени, а также изменять определенные параметры); 5 — интерфейс ЕТК типа ES1000; 6 — ЭВМ; 7 — датчики температуры и давления воздуха; 8 — датчик давления топлива в аккумуляторе; 9 — датчик положения клапана EGR (клапан рециркуляции ОГ); 10 — ТНВД; 11 — ДВС; 12 — датчики температуры и давления ОГ; 13 — клапан ограничения давления в аккумуляторе; 14 — пьезоэлектрический датчик давления в КС



**Рис. 3. Характеристика многоразового впрыска:**

$t_{y,н}$ ,  $t_{y,н1}$  и  $t_{y,н2}$  — время управляющего напряжения основного впрыска и пилотных впрысков № 1 и 2;  $d_1$  — задержка между «пилотным» впрыском № 1 и основным (главным) впрыском;  $d_2$  — задержка между «пилотными» впрысками № 2 и № 1

как Renault Logan и др. Дизель выполнен с неразделенной камерой сгорания (КС) и аккумуляторной топливной системой типа CR. Исследования проведены на оборудовании компании «Bosch Engineering Group» (г. Абыштатт, Германия). Схема моторного стенда и его оборудования приведены на рис. 2.

Испытания двигателя были проведены на стационарных режимах с различной мощностью при частоте вращения коленчатого вала 2000 об/мин. Эксперименты проводились с различными характеристиками топливоподачи — с разными задержками между пилотным впрыском № 1 и основным впрыском ( $d_1$ ), между пилотными впрысками № 2 и № 1 ( $d_2$ ) и с разной длительностью управляющего напряжения ( $t_{y,н}$ ) (рис. 3). Показатели исследуемого дизеля с заводскими регулировками приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Показатели дизеля с заводскими регулировками

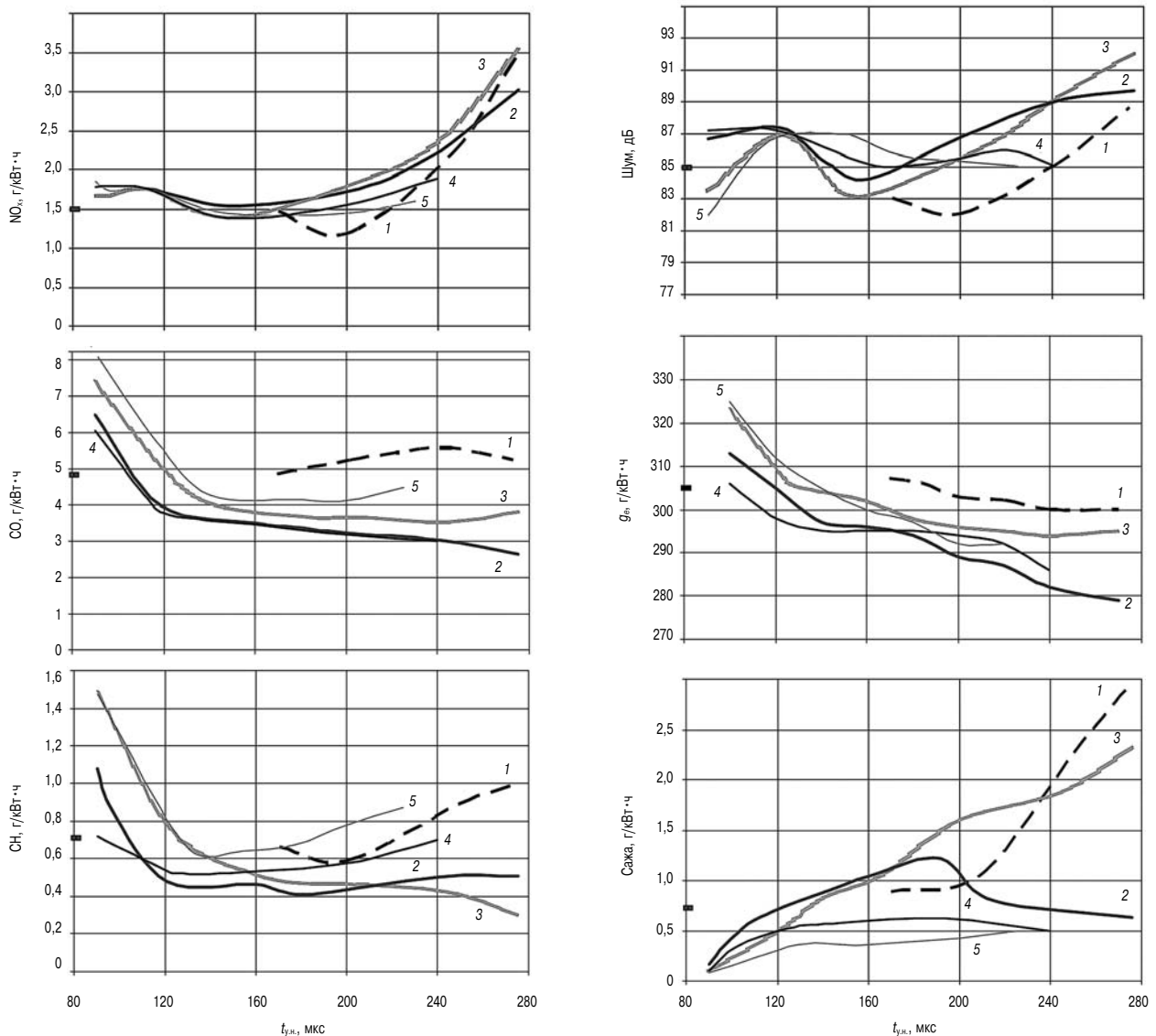
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч)	Выбросы токсичных компонентов, г/(кВт·ч)				Шум, дБ
	Оксиды азота $NO_x$	Монооксид углерода CO	Углеводороды $CH_x$	Сажа С	
305,0	1,5	4,8	0,71	0,72	84,9

#### Экспериментальные исследования дизеля с системой топливоподачи типа common-rail, реализующей двухразовое впрыскивание топлива

На первом этапе испытаний проведены исследования влияния характеристик двухразового впрыска топлива на показатели топливной экономичности, токсичности ОГ и шумности работы дизеля. При этом изменялись время управляющего напряжения основного впрыска  $t_{y,н}$  (определяет подачу топлива и нагрузочный режим работы двигателя) и задержка  $d_1$  между пилотным впрыском № 1 и основным. Результаты исследований представлены на рис. 4.

Как следует из рис. 4, оптимальной задержкой между пилотным впрыском № 1 и основным является  $d^*_1 = 6$  °ПКВ. При такой настройке отмечено снижение эмиссии сажи, углеводородов, удельного эффективного расхода топлива. Вместе с тем результаты испытаний показали и нежелательные эффекты — отмечено увеличение эмиссии оксидов азота и шумности работы двигателя. Для предотвращения этих эффектов были изменены давление и угол впрыска основной порции топлива. При проведении следующего этапа испытаний давление топлива в аккумуляторе было повышено с 550 до 675 бар. Угол начала основного впрыска варьировался от 3,5 до 1,5 °ПКВ после ВМТ. Результаты этих испытаний показали, что наилучшие показатели дизеля

получены при давлении впрыска  $p_{акк} = 675$  бар, задержке между пилотным впрыском № 1 и основным впрыском, равной  $d^*_1 = 6$  °ПКВ и началом основного впрыска — 3,5 °ПКВ после ВМТ. Анализ результатов испытаний, проведенных с измененными давлением и углом впрыска основной порции топлива, показал, что это не привело к заметному улучшению показателей дизеля. Выбросы CO и CH<sub>x</sub> изменились незначительно, а выбросы NO<sub>x</sub> и шумность работы даже возросли. Поскольку полученные показатели по NO<sub>x</sub> превышают значения, соответствующие заводским регулировкам, степень рециркуляции ОГ была повышена на 8 % (до 24 %). Результаты испытаний дизеля с повышенной степенью рециркуляции ОГ показаны на рис. 5. Из этих



**Рис. 4.** Влияние времени управляющего напряжения основного впрыска  $t_{y,n}$  и задержки  $d^*_1$  между пилотным впрыском № 1 и основным впрыском на экологические и экономические показатели дизеля (при начале основного впрыска 3,5° ПКВ после ВМТ) при задержке  $d^*_1$ , равной [° ПКВ]:

1 — 30; 2 — 16; 3 — 8; 4 — 6; 5 — 4 (заводские настройки  $d^*_1 = 30$  °ПКВ, давление топлива в аккумуляторе  $p_{акк} = 550$  бар, время  $t_{y,n} = 85$  мкс; прямоугольником показаны параметры дизеля при заводских настройках)

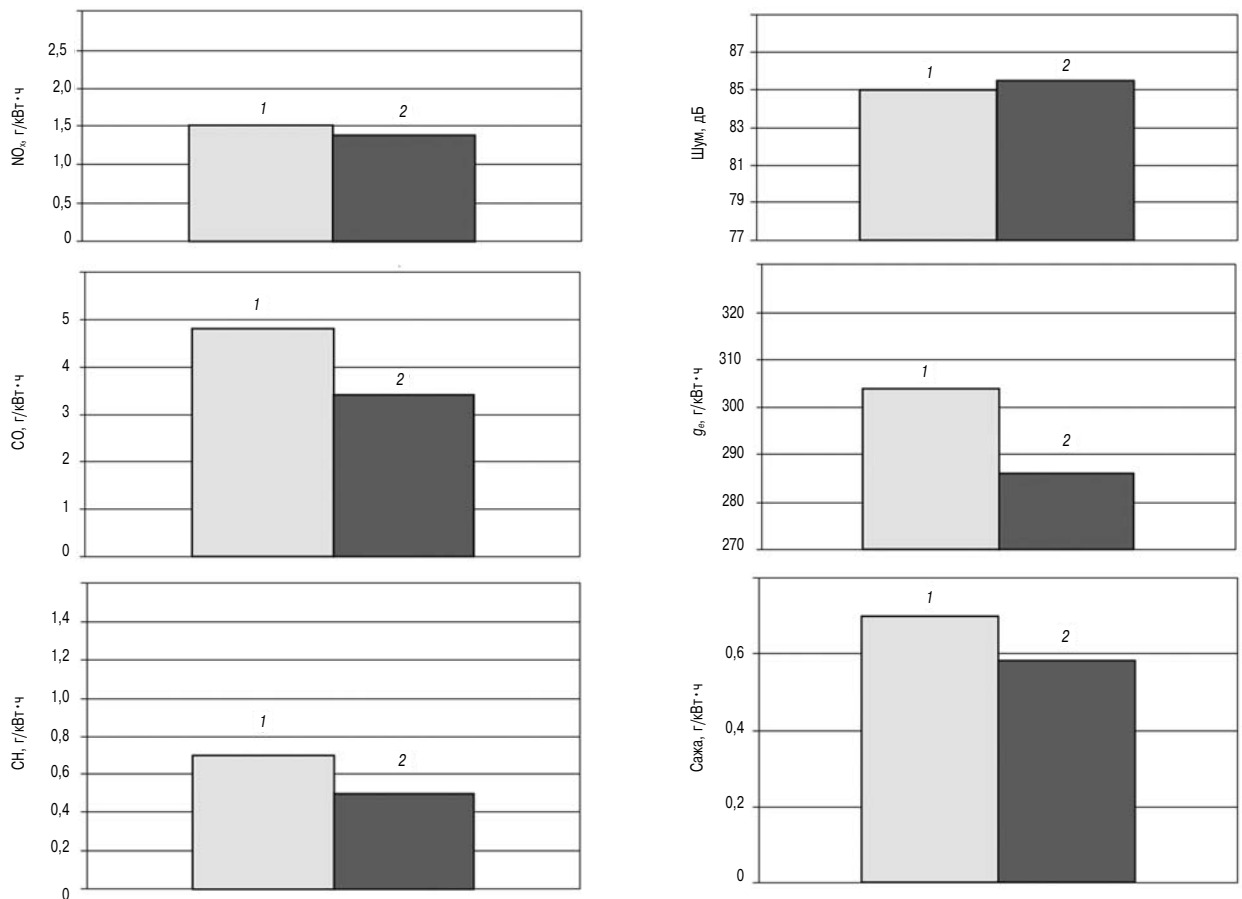


Рис. 5. Эффект от реализации пилотного впрыска № 1 с задержкой  $d_1 = 6^\circ$  ПКВ (угол основного впрыска равен  $3,5^\circ$  ПКВ после ВМТ):

1 — заводские настройки — задержка пилотного впрыска  $d_1 = 30^\circ$  ПКВ, давление впрыска  $p_{акк} = 550$  бар; 2 — оптимизированные настройки — задержка пилотного впрыска  $d_1 = 6^\circ$  ПКВ, давление впрыска  $p_{акк} = 675$  бар, степень рециркуляции ОГ 24 %

результатов следует, что выбросы  $NO_x$  уменьшились. Кроме того, отмечено снижение выбросов сажи, монооксида углерода  $CO$ , несгоревших углеводородов  $CH_x$ , а также удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ . Однако наблюдалось повышение шумности работы, что свидетельствует о повышенной жесткости процесса сгорания.

Таким образом, были подобраны оптимальные настройки характеристики впрыскивания (рис. 6).

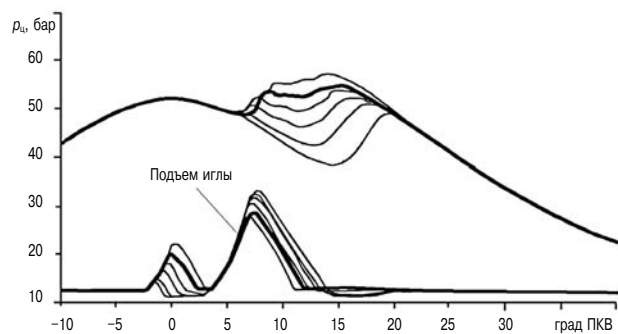


Рис. 6. Характеристики подъема иглы форсунки и давления в цилиндре (задержка между пилотным и основным впрыском  $d_1 = 6^\circ$  ПКВ, давление топлива в аккумуляторе  $p_{акк} = 675$  бар, начало основного впрыска  $3,5^\circ$  ПКВ после ВМТ)

Наиболее предпочтительной является показанная на рис. 6 жирной линией зависимость высоты

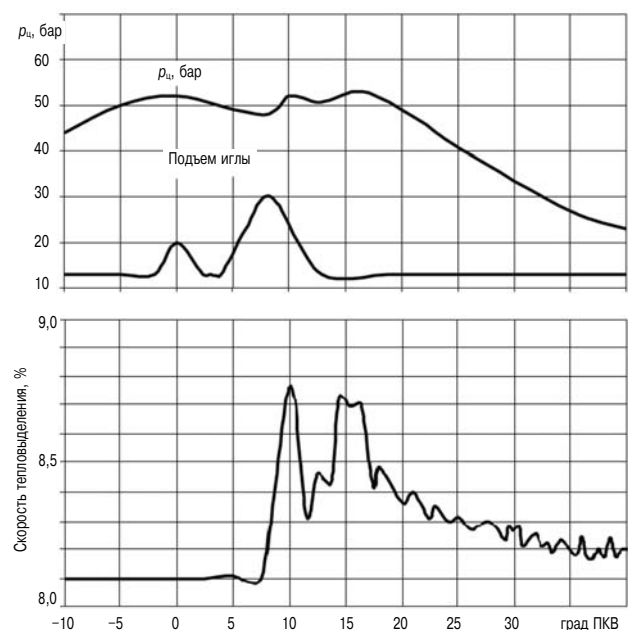


Рис. 7. Характеристики подъема иглы форсунки, скорости тепловыделения, давления в цилиндре

подъема иглы форсунки и давления в цилиндре дизеля от угла поворота коленчатого вала. Характеристика давления в цилиндре получилась максимально пологой, без резких колебаний давления.

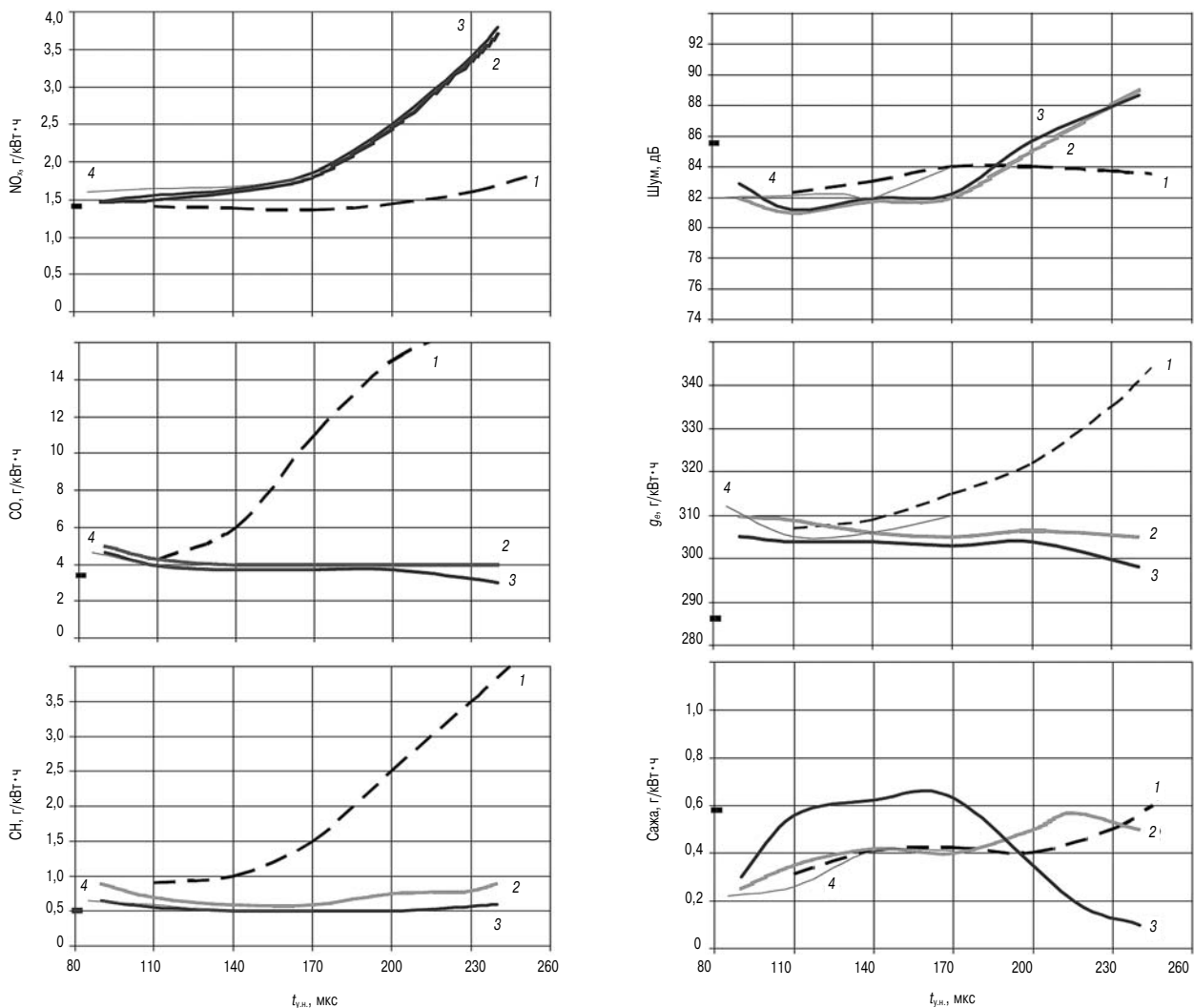
На рис. 7 показаны характеристики высоты подъема иглы форсунки и скорости тепловыделения от угла поворота коленчатого вала при реализации оптимизированной характеристики изменения давления в цилиндре дизеля. На графике изменения скорости тепловыделения прослеживаются два пика, характеризующие пилотный и основной впрыски.

**Экспериментальные исследования дизеля с системой топливоподачи типа common-rail, реализующей многократное впрыскивание топлива**

Для оценки преимуществ реализации характеристики с несколькими пилотными впрысками были проведены эксперименты по выполнению

второго пилотного впрыска по отношению к основному. При этом изменялись следующие параметры характеристики впрыскивания: задержки  $d_1$  и  $d_2$  между впрысками, время управляющего напряжения на форсунке  $t_{y,н}$ , характеризующее подачу топлива (см. рис. 3). При этом настройки первого «пилотного» впрыска (задержка основного впрыска относительно первого пилотного впрыска) осталась прежней. Реализация второго пилотного впрыска с сохраненными настройками первого осуществлялась со следующими задержками между вторым и первым пилотными впрысками: 30, 15, 5 и 3 °ПКВ. Результаты этих экспериментов представлены на рис. 8.

Анализ результатов испытаний показал, что оптимальным временем задержки для второго пилотного впрыска относительно первого является  $d_2 = 5$  °ПКВ. При оптимальной задержке  $d_2$  наблюдалась наименьшая эмиссия сажи. Также



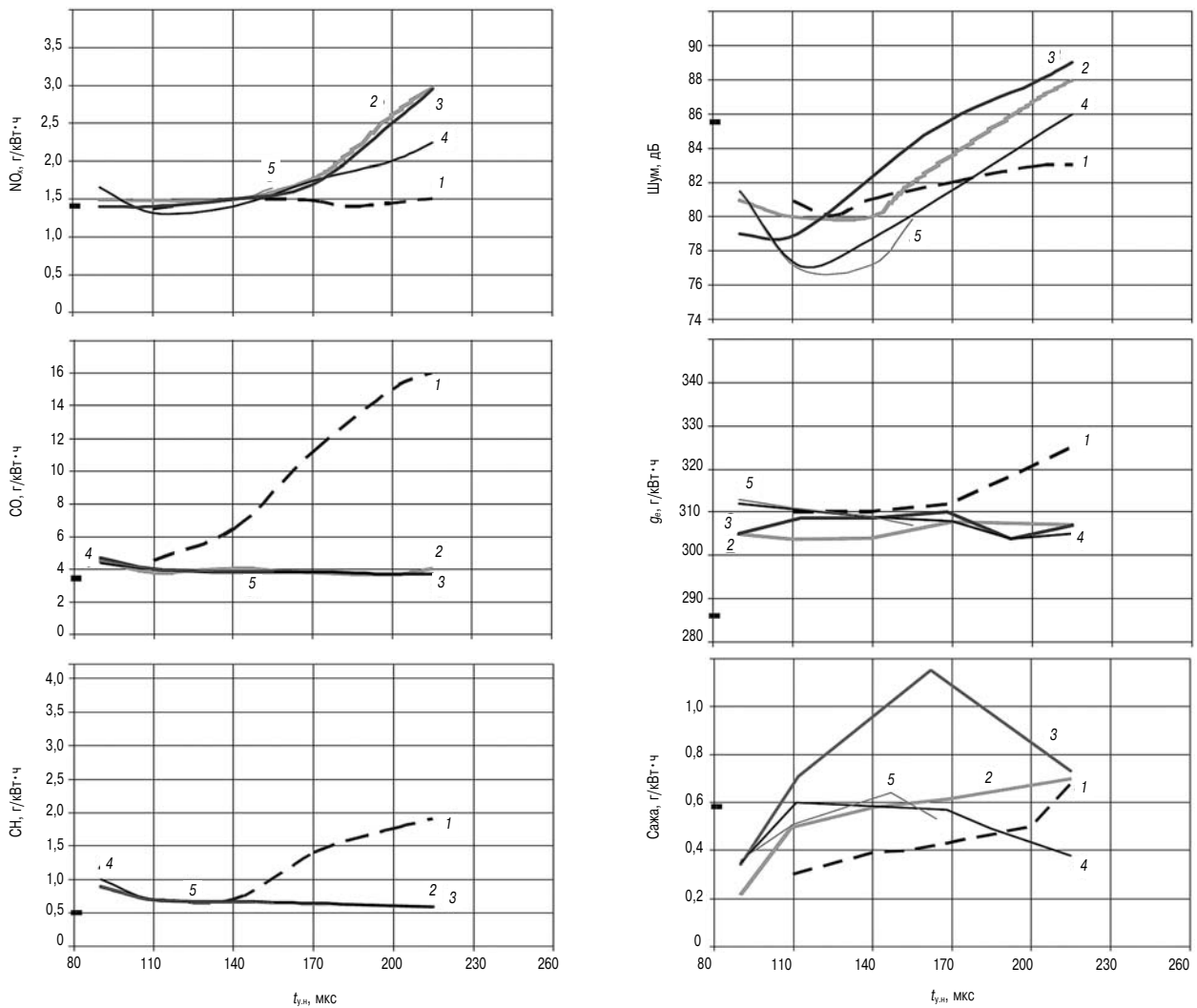
**Рис. 8.** Влияние времени задержки  $d_2$  между «пилотными» впрысками № 2 и 1, а также времени управляющего сигнала ( $t_{y,н}$ ) на экологические и экономические показатели дизеля (при задержке между первым пилотным и основным впрысками, равной 6 °ПКВ, давлении топлива в аккумуляторе  $p_{акк} = 675$  бар); задержка времени  $d_2$  между «пилотными» впрысками № 2 и 1 равна [°ПКВ]: 1 – 30; 2 – 15; 3 – 5; 4 – 3

снизились шумность работы и удельный эффективный расход топлива. Но при этом увеличились эмиссии оксидов азота и монооксида углерода.

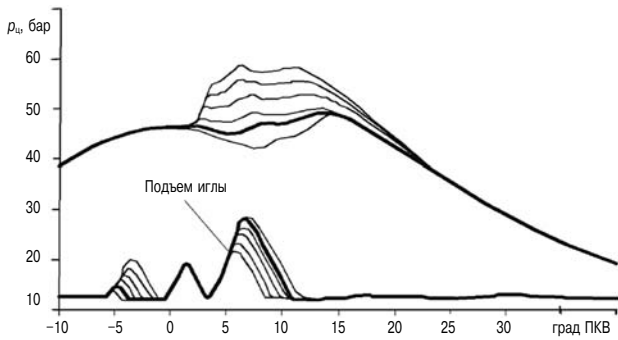
Несмотря на повышенные выбросы  $\text{NO}_x$  эта задержка является наиболее целесообразной. Снижение эмиссии  $\text{NO}_x$  возможно двумя путями — сокращением задержки между первым пилотным и основным впрысками или подбором оптимального распределения топлива между этими впрысками. Первый путь представляется более целесообразным. Исходя из этого было принято решение уменьшить время задержки  $d_1$  между первым пилотным и основным впрысками на  $2^\circ\text{ПКВ}$ , причем задержка  $d_2$  между пилотными впрысками № 2 и 1 осталась неизменной и равной  $5^\circ\text{ПКВ}$  до ВМТ. Результаты этих испытаний, представленные на рис. 9 показывают, что изменение задержки первого пилотного впрыска

к основному дало положительные результаты вследствие более пологой характеристики давления в цилиндре (рис. 10), при которой не наблюдается резких изменений давления (скорость нарастания давления сократилась). В результате снизились выбросы  $\text{NO}_x$  и шумность работы двигателя. Вместе с тем сокращение задержки  $d_1$  повлияло на другие показатели дизеля: отмечено заметное увеличение выбросов сажи и углеводородов. Выброс монооксида углерода  $\text{CO}$  и удельный эффективный расход топлива  $g_e$  увеличились незначительно.

При исследовании двухразового впрыскивания было отмечено, что повышение давления в топливном аккумуляторе повлияло на выбросы сажи и углеводородов. Дисперсность распыла топлива была улучшена, что благоприятно сказалось на полноте сгорания топлива, результатом чего стало снижение выбросов сажи и  $\text{CH}_x$ . Такая же



**Рис. 9.** Влияние задержки времени между пилотными впрысками № 2 и 1 и времени управляющего сигнала  $t_{y,u}$  на экологические и экономические показатели дизеля (при задержке  $d_1$  между первым пилотным и основным впрысками, равным  $4^\circ\text{ПКВ}$ , давлением топлива в аккумуляторе  $p_{\text{акк}} = 675$  бар); задержка времени между пилотными впрысками № 2 и 1 [ $^\circ\text{ПКВ}$ ]: 1 — 30; 2 — 15; 3 — 8; 4 — 5; 5 — 3

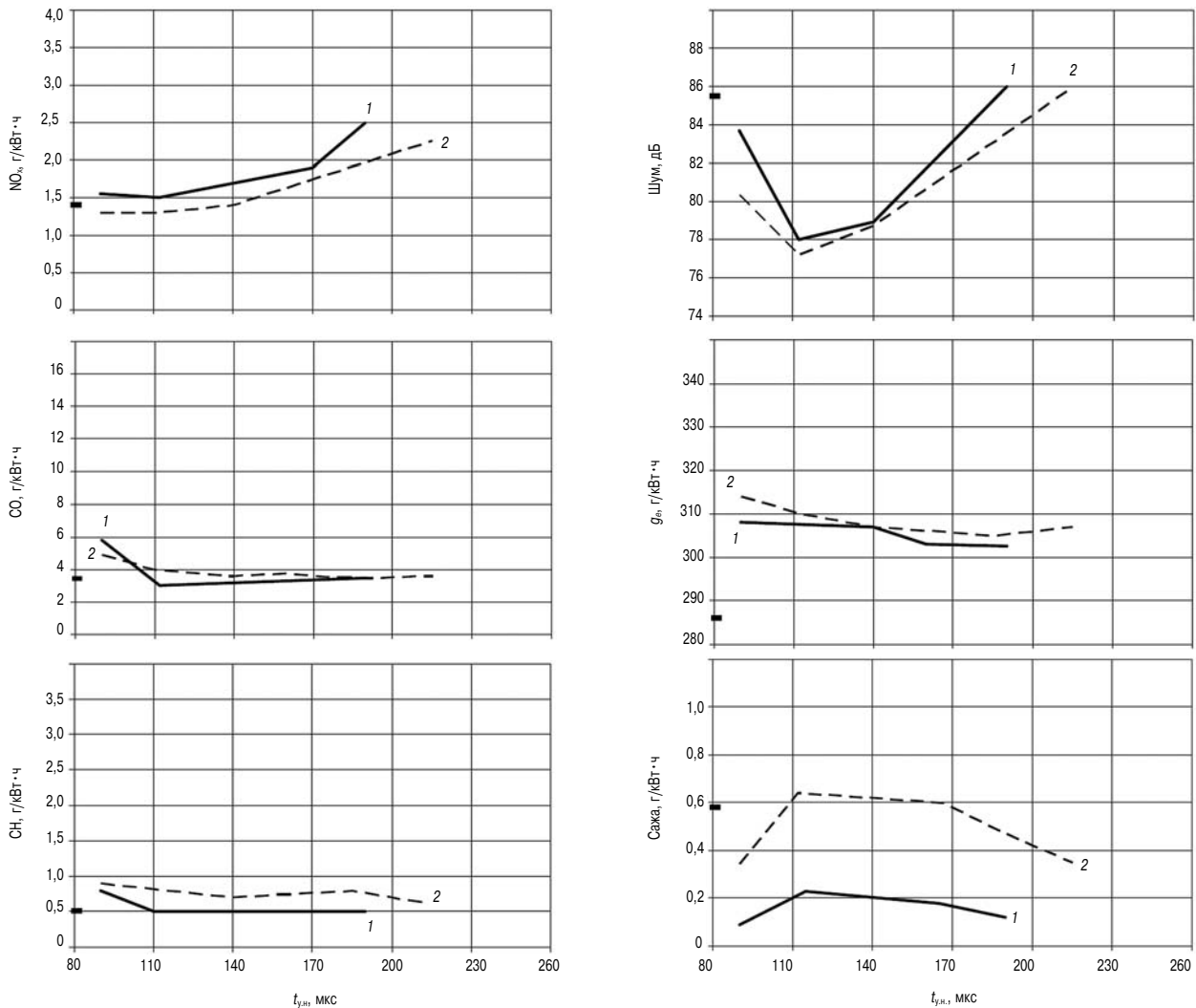


**Рис. 10.** Характеристики подъема иглы форсунки и давления в цилиндре дизеля при реализации пилотного впрыска № 2

стратегия применена и в случае многократного впрыскивания — давление впрыска повышено до 800 бар. После этого базовое время управляющего сигнала  $t_{y.n}$  было снижено с 85 до 70 мкс с целью сохранения неизменной подачи топлива.

Результаты этих экспериментов представлены на рис. 11.

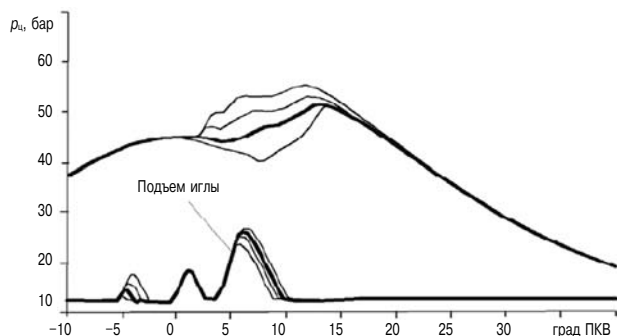
Анализ рис. 11 показывает, что оптимальными являются следующие параметры: задержка между пилотными впрысками  $d^p_2 = 5$  °ПКВ; давление впрыска  $p_{акк} = 800$  бар и базовое время управляющего напряжения  $t_{y.n} = 70$  мкс. При этих параметрах снизились выбросы сажи и углеводородов. Как следует из рис. 12, характеристика давления в цилиндре стала более полой, без резких нарастаний и снижения давления. Однако выбросы оксидов азота  $NO_x$  возросли и превысили начальный (заводской) показатель, равный 1,6 г/(кВт·ч), что объясняется возросшим давлением впрыска и, как следствие, большими температурами в КС. Снижение выброса оксидов азота  $NO_x$  можно обеспечить путем организации рециркуляции ОГ как наиболее эффективного способа снижения температур цикла. Как показа-



**Рис. 11.** Влияние давления впрыска  $p_{акк}$  и времени управляющего сигнала  $t_{y.n}$  на экологические и экономические показатели дизеля (при задержке между первым пилотным и основным впрыском  $d^p_1 = 4$  °ПКВ; при задержке между пилотными впрысками  $d^p_2 = 5$  °ПКВ):

1 — давление впрыска  $p_{акк} = 675$  бар,  $t_{y.n} = 85$  мкс; 2 — давления впрыска  $p_{акк} = 800$  бар,  $t_{y.n} = 70$  мкс





**Рис. 12.** Характеристики подъема иглы форсунки и давления в цилиндре от угла поворота коленчатого вала (задержка между пилотными впрысками № 2 и 1 равна  $d_2 = 5^\circ$  ПКВ, задержка между первым пилотным впрыском и основным впрыском  $d_1 = 4^\circ$  ПКВ, давление впрыска  $p_{акк} = 800$  бар, базовое время управляющего напряжения  $t_{y.н} = 70$  мкс)

ли проведенные исследования, степень рециркуляции ОГ, равная 24 %, позволила сократить выбросы  $NO_x$  до уровня исходных заводских значений. Показатели дизеля при реализации ука-

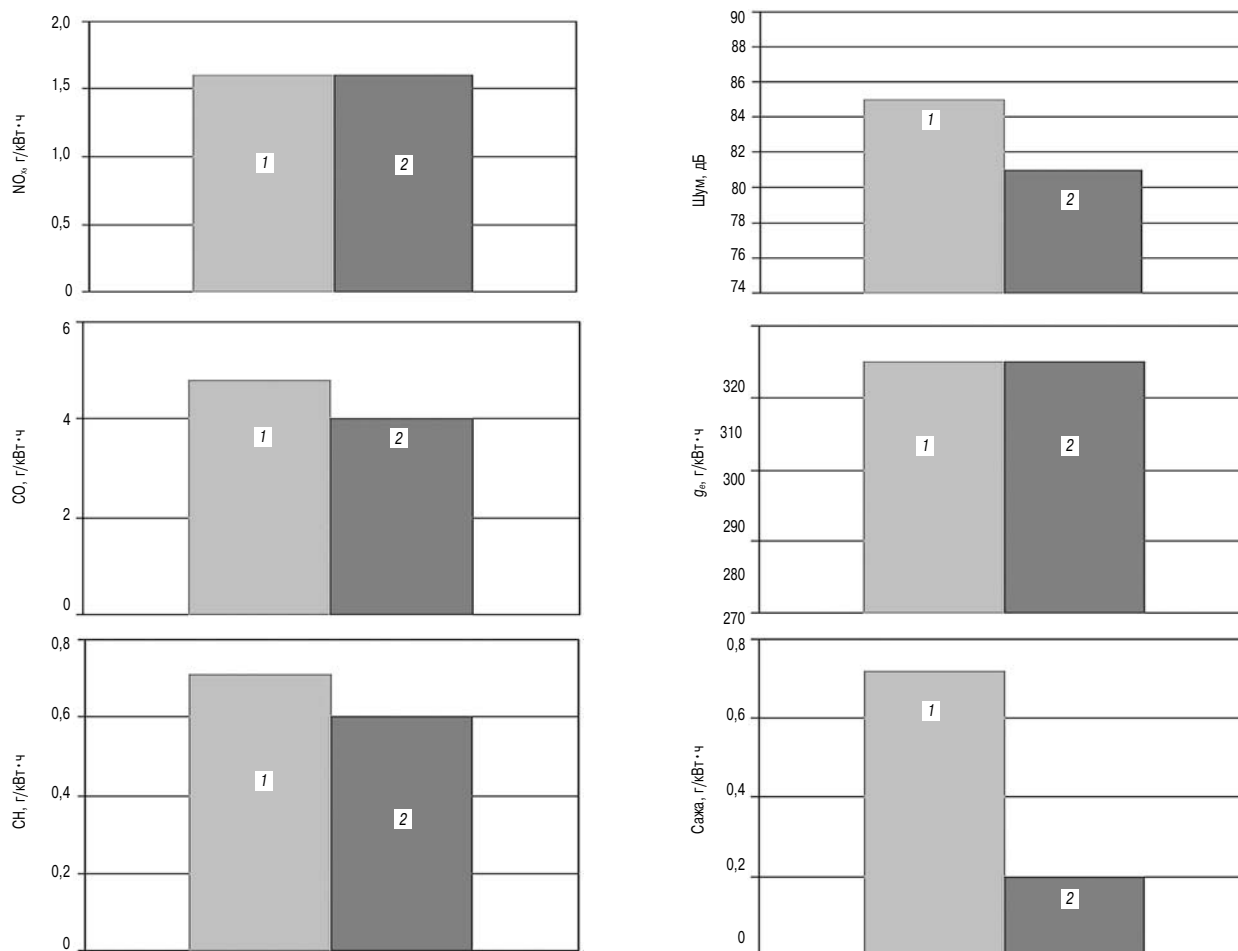
занной оптимизированной характеристики представлены на рис. 13.

Представленные на рис. 14 зависимости подъема иглы и скорости тепловыделения от угла поворота коленчатого вала показывает, что эти характеристики стремятся к треугольной форме. Такая характеристика подъема иглы близка к его оптимальному закону. Характеристика тепловыделения свидетельствует о том, что процесс сгорания не растянут во времени. В то же время не наблюдается резких скачков давления, что является основным фактором, влияющим на жесткость процесса сгорания и шумность работы дизеля.

### Заключение

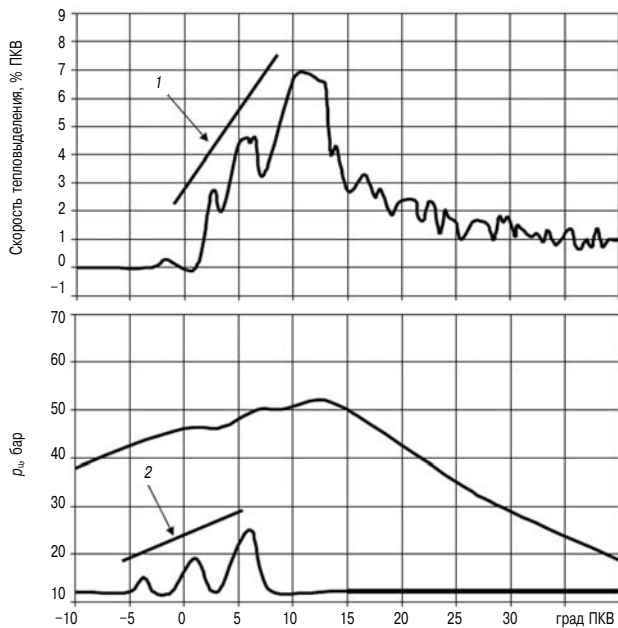
Полученные результаты экспериментальных исследований сводятся к следующим основным выводам.

1. Применение многофазового впрыскивания в дизеле, оснащенный системой топливоподдачи типа CR, улучшает показатели эмиссии вредных веществ с ОГ за счет улучшения качества процесса



**Рис. 13.** Результаты применения двух пилотных впрысков:

1 — заводские настройки ( $d_1 = 30^\circ$  ПКВ, давление впрыска  $p_{акк} = 550$  бар); 2 — два пилотных впрыска, задержка между первым пилотным впрыском и основным впрыском  $d_1 = 4^\circ$  ПКВ.; задержка между пилотными впрысками  $d_2 = 5^\circ$  ПКВ, давление впрыска  $p_{акк} = 800$  бар, базовое время  $t_{y.н} = 70$  мкс



**Рис. 14. Тепловыделение, давление в цилиндре и высота подъема иглы в дизеле с оптимальными настройками системы топливоподачи:**

1 — характеристика тепловыделения, стремится к форме треугольника; 2 — характеристика подъема иглы форсунки стремится к форме треугольника

смесеобразования и, как следствие, более благоприятной характеристики тепловыделения.

2. Повышение давления в топливном аккумуляторе системы типа CR приводит к уменьшению образования сажи и несгоревших углеводородов. Это позволяет уменьшить задержки между впрысками, что дает возможность получить характеристики тепловыделения и давления в цилиндре более пологими. Однако при этом возрастают выбросы оксидов азота и шумность работы двигателя.

3. Экспериментальные исследования показали, что задержки между впрысками оказывают значительное влияние на экологические показатели двигателя. При испытаниях дизеля были определены значения этих задержек, обеспечивающие минимальные выбросы вредных веществ с ОГ.

4. Время управляющего напряжения, поданного на форсунку, и высота подъема иглы форсунки определяют количества топлива, подаваемого в цилиндры дизеля. Это, в свою очередь оказывает значительное влияние на протекание процессов в дизеле — на интенсивность нарастания давления в цилиндре, скорость нарастания тепловыделения и, как следствие, на экологические показатели двигателя.

5. Эффективность применения аккумуляторной системы топливоподачи типа CR с целью уменьшения эмиссии вредных веществ с ОГ дизеля возрастает при ее совместном использовании с системой рециркуляции ОГ.

#### Литература

- Heywood J.B. Internal Combustion Engines Fundamentals. New York: McGraw-Hill McGraw-Hill Education, 1988. 930 p.
- Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
- Нефтяные моторные топлива: экологические аспекты применения / А.А. Александров, И.А. Архаров, В.А. Марков и др. / под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2014. 691 с.
- Автотранспорт и экология мегаполисов / А.А. Ипатов, В.Ф. Кутенев, В.А. Лукшо, А.С. Теренченко, Н.А. Хрипач. М.: Экология. Машиностроение, 2010. 253 с.
- Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. 360 с.
- Тер-Мкртчян Г.Г., Мазинг М.В. Современное состояние и перспективы развития топливной аппаратуры автотракторных дизелей // Двигателестроение. 2014. № 1. С. 30–35.
- Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов. М.: Изд-во «ЛегионАвтодата», 2005. 344 с.
- Grekhov L.V., Dragan Yu.E., Denisov A.A., Starkov E.E. Injection Rate Shaping with Possibilities of Conventional Design Common Rail System // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2015. May–June. № 6 (3). P. 1890–1902.
- Li H.-M., Guo Y., Yang S.-X. Effect of the Structure Parameters of High Pressure Common Rail System on Engine Performance // International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES). Vol. 3. Iss. 11. November. 2015. P. 42–47.
- Bosch: Системы управления дизельными двигателями: Перевод с немецкого. М.: За рулем, 2004. 480 с.
- Пинский Ф.И., Давтан Р.И., Черняк Б.Я. Микропроцессорные системы управления автомобильными двигателями внутреннего сгорания. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2001. 136 с.
- Klein-Douwel R.J.H., Frijters P.J.M., Seykens X.L.J., Somers L.M.T., Baert R.S.G. Gas Density and Rail Pressure Effects on Diesel Spray Growth from a Heavy-Duty Common Rail Injector // Energy & Fuel. 2009. April. 23(4).
- Khatamnezhad H., Khalilarya S., Jafarmadar S., Jafari B., Javadirad G. Numerical Investigation on Spray Characteristics and Combustion Process in a DI Heavy Duty Diesel Engine at LTC Condition // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. 5(6). P. 523–537.
- Машиностроение. Энциклопедия. Том IV. Двигатели внутреннего сгорания / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др. / под ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.
- Bae C., Yu J., Kang J. Effect on Nozzle Geometry on the Common-Rail Diesel Spray // SAE Technical Paper Series. 2002. № 2002-01-1625. 13 p.
- Common Rail Fuel Injection System for Improvement of Engine Performance on Heavy Duty Diesel Engine // SAE Technical Paper Series. 1998. № 980806. P. 1–15.
- Generation Pkw — Common-Rail von Bosch mit Piezo-Inline-Injektoren // MTZ. 2004. Jg. 65. № 3. P. 180–189.
- Maiorana G., Rossi G.S., Ugaglia C. Die Common-Rail-Motoren von Fiat // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. 1998. Jg. 59. № 9. P. 582–588.
- Kammerdiener T., Burgler L. Ein Common Rail-Konzept mit druckmodulierter Einspritzung // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. 2000. Jg. 61. № 4. S. 230–238.
- Klingmann V.R., Bruggemann H. Der neue Vierzylinder-Dieselmotor OM611 mit Common Rail-Einspritzung // MTZ. 1997. Jg. 58. № 12. S. 760–767.
- Hoffmann K.-H., Hummel K., Maderstein T., Peters A. Das Common-Rail-Einspritzsystem — ein neues Kapitel der Dieseleinspritztechnik // MTZ: Motortechnische Zeitschrift. 1997. Jg. 58. № 10. P. 572–582.