

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЯХ РАЗДЕЛЕННЫМ ВПРЫСКИВАНИЕМ ТОПЛИВА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ**

*Е.А. Лазарев*

## **THE CONTROL OF THE COMBUSTION PROCESS IN DIESEL ENGINES BY MEANS OF MULTY-INJECTION OF THE FUEL FOR REDUCTION OF THE EXHAUST GASES TOXICITY**

*E.A. Lazarev*

**Рассмотрены физические основы управления процессом сгорания топлива в дизелях разделением цикловой подачи на составляющие и впрыскиванием их в цилиндр в различные периоды рабочего цикла. Оценена эффективность разделенного впрыскивания топлива в снижении выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизеля.**

*Ключевые слова: процесс сгорания, разделенное впрыскивание топлива, выбросы вредных веществ.*

**The physical bases of the control of combustion process by means of multy-injection of fuel into cylinder of diesel engines are considered for different periods of working cycle. The efficiency of the multy-injection of fuel as means of the reduction of exhaust gases toxicity is estimated.**

*Keywords: combustion process, multy-injection of the fuel, the toxicity of exhaust gases.*

Протекание процесса сгорания в дизеле, как свидетельствуют физические концепции, обуславливается взаимодействием целого ряда физических и химических процессов: впрыскивание и распределение, нагрев, испарение и смешение с воздухом, подготовка к воспламенению и окисление топлива [1]. Сложность процесса сгорания обусловлена местной и временной неоднородностями концентраций топлива, окислителя и продуктов сгорания, температур в объеме камеры сгорания, характером и интенсивностью движения компонентов смеси и молекулярным тепло - и массообменом между отдельными ее зонами.

После воспламенения в процессе «видимого» сгорания топлива термодинамическим анализом индикаторных диаграмм давления в дизеле выделяют два характерных периода: начальный и основной, отличающиеся механизмом возникновения и распространения фронта пламени. Скорость выгорания в начальном периоде зависит от количества паров топлива, подготовленных к сгоранию, скорости развития предпламенных реакций, количества, масштаба и распределения очагов воспламенения, а также от скорости распространения турбулентного пламени в неоднородной смеси. Многоочаговый характер воспламенения смеси в дизелях свидетельствует о зависимости скорости сгорания в начальном периоде от подготовленности к воспламенению смеси, образующейся вследствие протекания предпламенных химических превращений за период задержки воспламенения. Воспламенение и начало окисления наступает в зоне, где соотношение паров и окислителя близко к стехиометрическому составу.

Управление интенсивностью выгорания топлива в начальном периоде осуществляется интенсификацией предпламенных процессов для сокращения периода задержки самовоспламенения. В значительной степени это достигается воздействием на характеристики подачи топлива, в частности, на фактор динамичности, определяющий относительное количество топлива, поданного в цилиндр за период задержки самовоспламенения, в общей цикловой подаче. Регулирование характеристики подачи для снижения фактора динамичности осуществляется реализацией двух основных направлений: ступенчатое и разделенное впрыскивание топлива. Принципиальные основы ступенчатого впрыскивания широко известны. Физические основы влияния разде-

ленного впрыскивания топлива на выбросы вредных веществ отработавшими газами базируются на снижении и ограничении интенсивности выгорания топлива в начальном периоде, температуры и давления газов в цилиндре. Осуществление разделенного впрыскивания имеет свои особенности, связанные с местом подачи запальной порции и ее относительной величиной в суммарной цикловой подаче топлива.

Основными проблемами при реализации разделенного впрыскивания топлива являются впрыскивание, подготовка к воспламенению и уменьшение величины запальной порции. Чем меньше относительная величина запальной порции в суммарной цикловой подаче, тем труднее ее дозирование элементами топливной аппаратуры в процессе впрыскивания, но тем выше качество подготовки ее к воспламенению. Высокое качество подготовки топлива запальной порции к воспламенению может быть достигнуто дробным впрыскиванием в целях гомогенизации ее смеси с воздухом. Однако многократный подъем иглы при дробном впрыскивании приводит к повышенному износу прецизионных сопряжений распылителя форсунки, поэтому его применение не является однозначным. Чем выше качество подготовки топлива запальной порции к воспламенению, тем позже она может быть подана в цилиндр, но тем больше взаимное влияние процессов впрыскивания запальной и основной порций. Различают в этой связи несколько вариантов подачи запальной порции в цилиндр: во впускной трубопровод и в цилиндр: на границе тактов выпуска-впуска [2], в начале такта впуска, в начале или в конце такта сжатия. Каждый из перечисленных способов подачи запальной порции отличается различной степенью подготовки ее к воспламенению. При подаче запальной порции в цилиндр на границе тактов выпуска-впуска для ее подготовки к воспламенению используется теплота отработавших газов (ОГ) и процесса сжатия при увеличенном времени на процесс смесеобразования запальной порции. При подаче запальной порции в такте сжатия снижается время на процесс смесеобразования запальной порции и для ее подготовки к воспламенению используется лишь теплота процесса сжатия.

Определенное значение имеет момент подачи основной порции: в воспламенившуюся запальную порцию для наибольшего снижения периода задержки воспламенения основной порции, в подготовленную обедненную запальную порцию для обогащения и инициирования ее воспламенения с одновременным началом сгорания обеих порций и после выгорания топлива запальной порции для использования продуктов ее сгорания в качестве инициаторов воспламенения первых доз основной порции.

Анализ физико-химических явлений, происходящих при впрыскивании запальной порции топлива в цилиндр на границе тактов выпуска-впуска свидетельствует, что в сжимаемом топливовоздушном заряде интенсивно протекают реакции предварительного окисления углеводородов, которые начались под воздействием теплоты отработавших газов. С помощью диаграмм давления выявлены все три стадии низкотемпературного самовоспламенения [3]. Химический анализ газов, отобранных из цилиндра при прокрутке коленчатого вала дизеля, но с подачей углеводородов на впуске, позволил установить наличие формальдегидов и карбонильных соединений, которые являются результатом холоднопламенных реакций окисления углеводородов. Топливо запальной порции проходит сложные предпламенные и холоднопламенные превращения до впрыскивания основной порции. К моменту впрыскивания основной порции в камере сгорания (КС) находится полностью испарившаяся, хорошо перемешанная и поэтому достаточно однородная топливовоздушная смесь. По составу эта смесь обеднена. Под воздействием температуры отработавших газов предыдущего цикла (при подаче запальной порции на границе тактов выпуска-впуска) в этой смеси произошли физико-химические превращения с образованием перекисей, альдегидов и распадом отдельных связей в молекулах углеводородов. Использование высоких температур отработавших газов для нагрева и испарения запальной порции топлива является эффективным средством предварительной подготовки ее за счет процессов распада наименее термически стабильных молекул, а также тепловой активации наиболее термически стабильных углеводородов к реакции окисления. Такая предварительная термическая подготовка запальной порции топлива существенно облегчает процесс ее самовоспламенения.

Процесс предварительного разложения запальной порции не должен быть слишком полным, ибо это может привести к преждевременному ее окислению и, как следствие, к уменьшению КПД цикла. Охлаждение запальной порции поступающим свежим зарядом в такте впуска несколько замедляет этот процесс физико-химического превращения, предотвращая глубокий распад молекулярных связей и осуществляя своеобразную «консервацию» уже начавшего разлагать-

ся топлива до начала такта сжатия. В течение такта сжатия повышение температуры и давления при наличии избытка кислорода завершает процесс разложения топлива запальной порции. Локальное повышение концентрации паров топлива, вызванное либо интенсивным вихревым движением смеси в камере сгорания, либо впрыскиванием первой дозы основной порции топлива, при наличии готовых перекисей и активных центров приводит к появлению «горячего» пламени. При этом стадии самовоспламенения существенно сокращаются и приводят к значительному уменьшению периода задержки воспламенения основной порции топлива, который в ряде случаев оказывается близким или равным нулю. С этой точки зрения можно считать границу тактов выпуска-впуска оптимальным моментом для впрыскивания запальной порции, так как в отработавших газах содержится малое количество кислорода. Кроме этого, охлаждение топлива запальной порции поступающим в такте впуска свежим зарядом, способствует торможению процессов распада наименее термически стабильных молекул топлива и определяется, по-видимому, согласованием угла начала подачи запальной порции и фаз газораспределения. Положительный эффект от выбора в качестве момента подачи запальной порции топлива границы тактов выпуска-впуска замечен также в работе автора [4]. В частности, установлено, что максимальная эффективность процесса достигается при впрыскивании запальной порции незадолго после ВМТ такта выпуска, где температура отработавших газов вызывает реакцию интенсивного первичного разложения топлива.

В последние годы реализация разделенного впрыскивания топлива осуществляется с использованием электронного управления [5-9]. Однако электронное управление впрыскиванием топлива, все более широко применяющееся в автомобильных, судовых и стационарных дизелях, получило ограниченное распространение в дизелях тракторов, комбайнов и дорожных-строительных машин в связи с тяжелыми условиями эксплуатации и высокими требованиями к надежности и долговечности элементной базы электронных, электромеханических и электрогидравлических устройств [5]. В этой связи по-прежнему высок интерес к реализации разделенного впрыскивания топлива с использованием традиционных гидромеханических устройств: топливной форсунки и элементов топливного насоса высокого давления (ТНВД) [8].

Одним из способов осуществления разделенного впрыскивания топлива является использование кулачка с двумя разновысокими выступами на валу топливного насоса (рис. 1) [2, 4]. Впрыскивание запальной порции осуществляется с помощью выступа А, а величина ее определяется высотой этого выступа. Впрыскивание основной порции достигается с помощью выступа Б. Расположение выступа А относительно выступа Б определяет момент впрыскивания запальной порции при заданном моменте впрыскивания основной порции топлива.

Здесь рассматривается способ разделенного впрыскивания, отличительной особенностью которого является использование теплоты отработавших газов для физико-химической подготовки запальной порции, облегчающей воспламенение основной порции топлива. Это достигается впрыскиванием запальной порции непосредственно в цилиндр дизеля в начале такта впуска, что хорошо согласуется с уровнем температуры, необходимой для испарения топлива и начала частичного его разложения. Наличие относительно большого промежутка времени между впрыскиванием запальной и основной порциями топлива позволяет уменьшить их взаимное влияние, которое проявляется в колебательном характере изменения давлений в насосной секции  $P_{nc}$  и у форсунки  $P_{\phi}$  (см. рис. 1). Наряду с положительными качествами: улучшенное смесеобразование запальной порции топлива вследствие наличия значительного интервала времени и некоторое снижение требований к уровню давления  $P_p^A$  и качеству распыливания запальной порции топлива, этот способ имеет недостаток, который заключается в возможности оседания топлива запальной порции на стенках внутрицилиндрового пространства.

Для обеспечения удовлетворительной топливной экономичности дизеля необходимо исключить оседание запальной порции топлива на стенках цилиндра, днище поршня, головке цилиндра и унос части ее в систему выпуска при перекрытии клапанов газораспределения. В этой связи целесообразно сокращать длину топливных струй при впрыскивании запальной порции, а также не следует начинать впрыскивание запальной порции задолго до закрытия выпускного клапана, ибо при достаточно большом перекрытии клапанов в результате продувки может увеличиться унос части топлива запальной порции в систему выпуска. Для дизелей, имеющих камеру сгорания, расположенную в поршне, появляется возможность в большей степени сохранить запальную порцию топлива, нежели в дизелях с неразделенными камерами, при условии впрыскивания ее

непосредственно в объем камеры сгорания. Очень удобными в этом смысле являются полуразделенные камеры сгорания, например ЯМЗ, ЦНИДИ и др. Наличие горловины КС создает дополнительное сопротивление вихревым потокам смеси, препятствуя таким образом уносу топлива запальной порции.

На степень физико-химической подготовки топлива запальной порции оказывает влияние, в случае применения камер сгорания в поршне, не только температура отработавших газов, но и температура стенок камеры сгорания. Камера сгорания, имея неодинаковую температуру по внутренней поверхности, дает дополнительную возможность регулировать степень физико-химических превращений топлива запальной порции за счет изменения места контакта топливной струи со стенкой. Наибольшую температуру камера сгорания имеет в районе кромки горловины. Поэтому попадание струи топлива на «горячую» кромку позволит усилить эффект термического воздействия, снижая одновременно ее температуру.

Влияние момента впрыскивания запальной порции топлива на показатели рабочего цикла дизеля при неизменном оптимальном угле начала подачи основной порции (23 град ПКВ до ВМТ такта сжатия) приведено на рис. 2, а. Из условия получения наименьшего удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  оптимальный угол начала подачи запальной порции  $\theta_{\text{нп}}^{\text{зап}}$  находится в диапазоне от 5 град ПКВ до ВМТ такта выпуска до 15 град ПКВ после ВМТ такта впуска в зависимости от относительной величины запальной порции топлива  $\sigma$  в суммарной цикловой подаче. Значения углов, соответствующие более раннему впрыскиванию запальной порции, относятся к меньшим относительным величинам запальной порции. Отклонение углов начала подачи запальной порции от указанного выше диапазона вызывает ухудшение экономичности дизеля, вследствие повышенного уноса топлива запальной порции и снижения эффективности его сгорания.

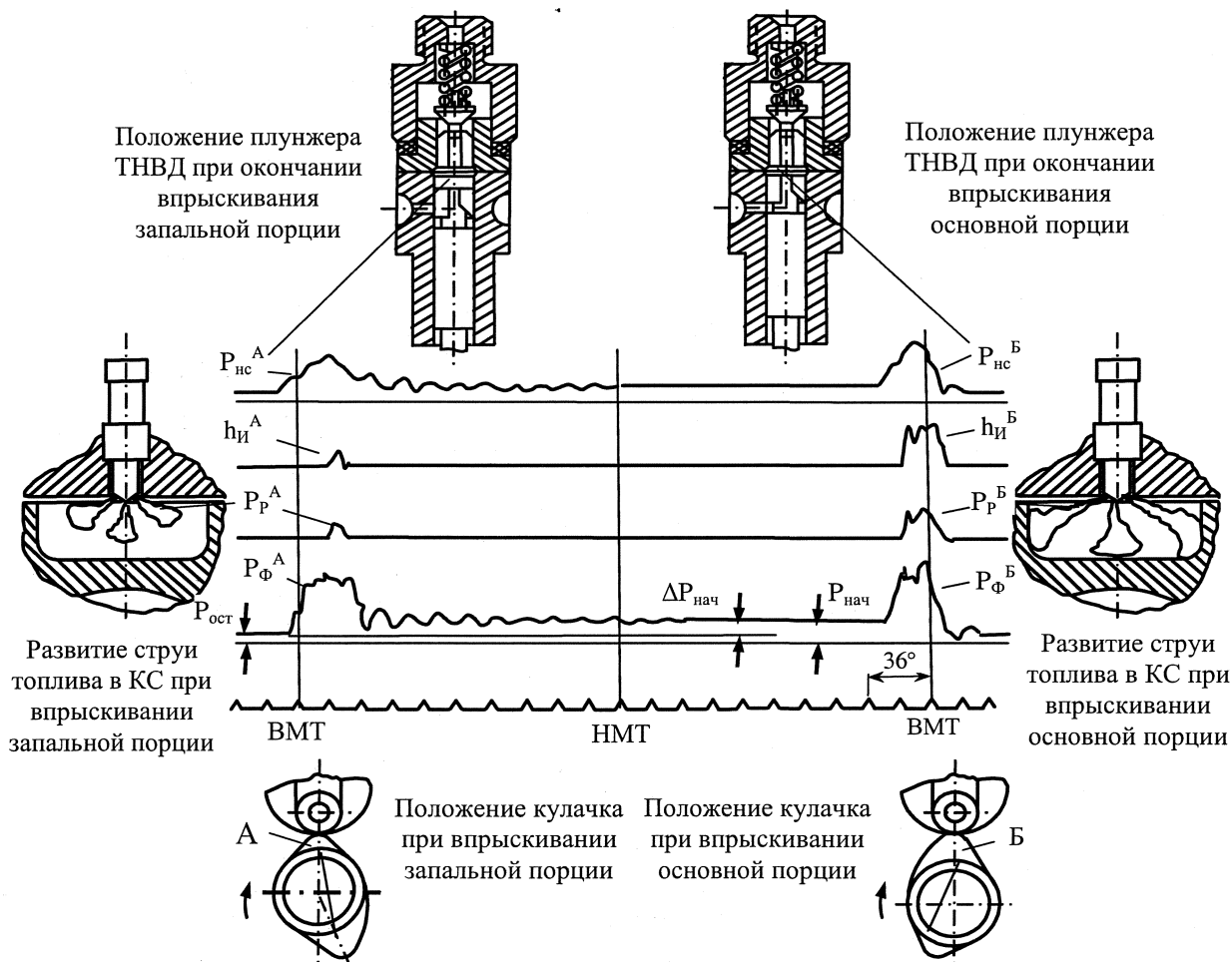


Рис. 1. Способ осуществления разделенного впрыскивания топлива и иллюстрирующий его фрагмент осциллограммы процесса впрыскивания топлива в дизеле:  $P_{\text{нс}}$ ,  $P_p$ ,  $P_f$ ,  $P_{\text{ост}}$ ,  $P_{\text{нач}}$  - давления топлива, соответственно, в насосной секции, распыливания, у форсунки, остаточное и начальное в топливопроводе;  $h_{\text{и}}$  - подъем иглы распылителя



топлива запальной порции от оптимального значения сопровождается некоторым уменьшением угла начала сгорания  $\Theta$ .

Повышенные потери и ухудшение эффективности термической обработки топлива запальной порции несколько изменяют продолжительность процесса сгорания  $\varphi_z$ . Увеличение задерживающих стадий в воспламенении основной порции приводит к некоторому увеличению максимальной скорости сгорания при отклонении угла начала подачи запальной порции от оптимального. Незначительное сокращение продолжительности процесса сгорания при этом можно объяснить увеличением части топлива запальной порции, не участвующей в процессе сгорания вследствие механической ее потери. В данном случае снижение  $\varphi_z$  не означает улучшения процесса сгорания топлива. Анализ экспериментального материала позволяет определить диапазон оптимальных углов начала подачи запальной порции топлива, который составляет от 5 град ПКВ до ВМТ такта выпуска до 15 град ПКВ после ВМТ такта впуска.

Необходимость выбора оптимальной относительной величины запальной порции топлива  $\sigma$  определяется опасностью возникновения следующих явлений при работе дизеля с разделенным впрыскиванием: увеличение расхода топлива вследствие преждевременного выделения теплоты, относительных потерь теплоты через поверхности, образующие внутрицилиндровое пространство, и механической нагруженности дизеля [4, 10].

При экспериментальном исследовании по выбору оптимального значения  $\sigma$  использовался кулачок вала топливного насоса с двумя разновысокими выступами, а необходимое значение  $\sigma$  устанавливалось сменой кулачков с различной высотой выступа А. Выбор относительной величины запальной порции топлива обоснован для дизелей Ч14,5/20,5, ЧН15/20,5 и ЧН15/16 на номинальных режимах их работы (рис. 2, б, в). Зависимость основных показателей рабочего цикла и параметров процесса сгорания от  $\sigma$  оценивалась в диапазоне ее изменения от 0 до 0,48.

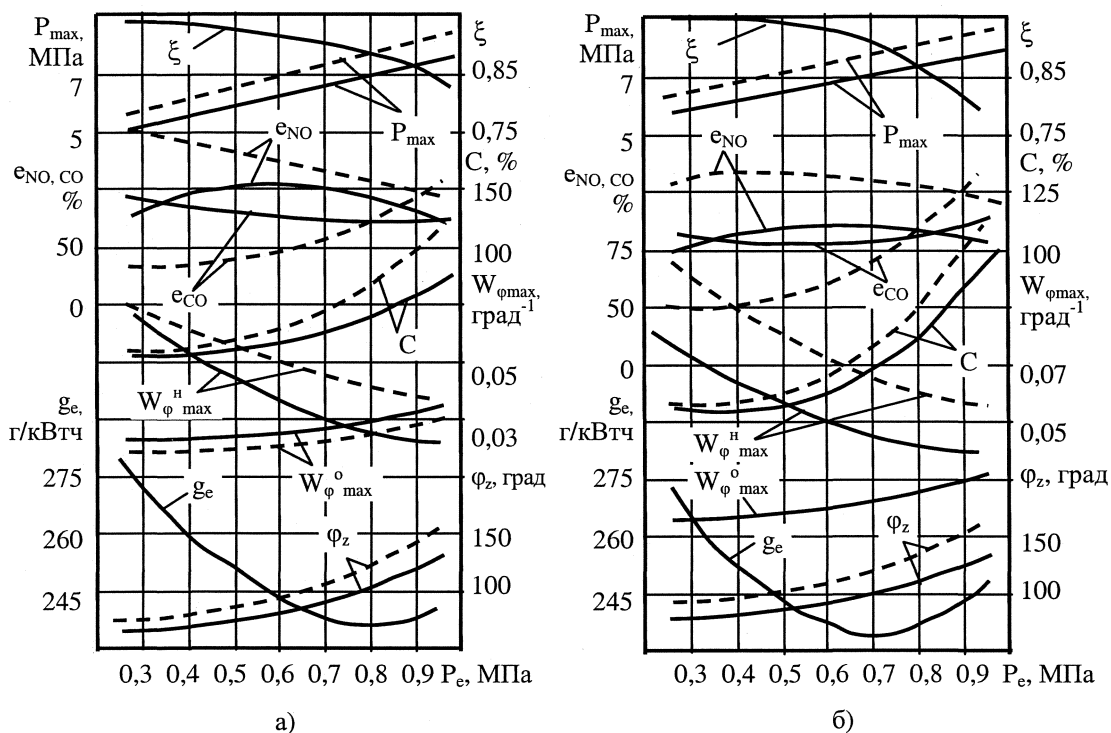
Увеличение относительной величины запальной порции топлива после некоторого предела приводит к резкому повышению удельных эффективного и индикаторного  $g_i$  расходов топлива. Оптимальные значения  $\sigma$  при условии неизменного расхода топлива  $G_T$  для исследуемых дизелей составляет 0Д2...0Д8. В этом диапазоне удельный эффективный расход топлива практически не изменяется в сравнении с таковым при обычном впрыскивании, а максимальная быстрота нарастания давления минимальна. Уменьшение  $W_{pmax}$  снижает механическую нагруженность дизеля. Исчезают резкие стуки, снижается вибрация корпуса, уменьшается шум. На индикаторных диаграммах появляется плавный переход от линии сжатия в линию сгорания, а ускорение переходного процесса приближается к нулю. При дальнейшем увеличении  $\sigma > 0,20$  к моменту воспламенения основной порции в камере сгорания накапливалось большее количество топлива запальной порции, обуславливающее увеличение  $W_{pmax}$ . При этом наблюдалось снижение мощности и увеличение удельных эффективного и индикаторного расходов топлива.

Разделенное впрыскивание топлива при значениях  $\sigma = 0,15$  на 25 % снижает дымность отработавших газов  $K$  вследствие ускорения предпламенной подготовки топлива, сокращения общей продолжительности процесса сгорания и перемещения конца процесса сгорания ближе к ВМТ. Сокращение общей продолжительности сгорания можно объяснить увеличением скорости сгорания в конце процесса вследствие ускорения испарения и диффузии топлива основной порции, обеспечиваемым увеличением температуры смеси перед началом ее горения. С увеличением  $\sigma$  максимальная скорость сгорания  $W_{\varphi max}^n$  изменяется, хорошо согласуясь с характером изменения  $W_{pmax}$ . Коэффициент эффективности сгорания при  $\sigma > 0,20$  резко уменьшается вследствие повышения количества продуктов сгорания запальной порции и увеличенных потерь тепла. Максимальная температура цикла при разделенном впрыскивании топлива изменяется незначительно.

По мере увеличения относительной величины запальной порции угол начала сгорания сначала увеличивается до 15... 16 град ПКВ, резко снижая при этом период задержки воспламенения основной порции топлива, а затем стабилизируется на уровне 14... 15 град ПКВ. Увеличение угла начала сгорания приводит к росту продолжительности переходного процесса от сжатия к сгоранию. Увеличение угла начала сгорания обуславливается наличием однородной, хорошо подготовленной к самовоспламенению, смеси запальной порции топлива с воздухом вследствие большого опережения ее впрыскивания. При этом количество топлива запальной порции соответствует условиям смеси, при которых она является достаточно бедной, чтобы преждевременно не самовоспламениться вследствие сжатия, и достаточно богатой, чтобы топливо основной порции

могло воспламениться от пламени начинающей гореть запальной порции. Несущественное изменение  $\theta$  при  $\sigma > 0,20$  объясняется ухудшением качества физико-химической подготовки запальной порции. Появление продуктов ее сгорания тормозит процесс воспламенения основной порции. Для уменьшения влияния продуктов сгорания запальной порции на воспламенение основной порции можно рекомендовать интенсификацию движения газов вблизи распылителя форсунки.

С оптимальными значениями  $\sigma$  определялись нагрузочные характеристики дизелей. Нагрузочные характеристики дизелей ЧН15/20,5 и ЧН15/16 представлены на рис. 3. В сравнении с аналогичными характеристиками, полученными со штатной топливной аппаратурой, можно отметить при разделенном впрыскивании топлива снижение механической нагруженности дизеля, характеризуемой значениями  $P_{max}$  и  $W_{\phi max}$ . Особенно значительное снижение этих показателей имеет место при больших значениях среднего эффективного давления  $P_e$ , что объясняется особенностями изменения относительной величины запальной порции топлива [5].



**Рис. 3.** Зависимость относительных удельных выбросов вредных веществ и сажи отработавшими газами, показателей рабочего цикла и параметров процесса сгорания от нагрузки дизелей: ЧН15/20,5,  $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$  (а), ЧН15/16,  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$  (б) — — — обычное впрыскивание; — — разделенное впрыскивание

При разделенном впрыскивании снижаются температура и выбросы сажи с отработавшими газами. Анализ параметров процесса сгорания указывает на увеличение угла начала сгорания, снижение максимальной относительной скорости  $W_{\phi max}^H$  и общей продолжительности сгорания топлива  $\phi_z$ . Мощностные и экономические показатели рабочего цикла практически не изменились. Совершенствование процесса сгорания для реализации малотоксичного рабочего цикла базируется на учете условий образования вредных веществ в камере сгорания, выносимых с отработавшими газами [8].

Основным токсичным компонентом ОГ дизелей являются оксиды азота  $NO_x$ , доля которых в суммарных выбросах составляет 30-80 % по массе. Оксиды азота образуются при высоких температурах в КС вследствие окисления азота воздуха. Известно, что наиболее интенсивно окисление азота происходит в начальном периоде процесса сгорания до момента достижения максимальной температуры  $T_{max}$  рабочего цикла. Содержание окиси углерода  $CO$  в ОГ дизелей характеризуется сравнительно небольшой концентрацией, не превышающей 0,4-0,5 %. В КС дизеля  $CO$  образуется из-за неравномерного распределения топлива в зоне горения, что приводит к появлению зон с малым коэффициентом избытка воздуха и недогоранием топлива. Значительной составляющей токсичных компонентов ОГ являются твердые частицы, представляющие собой несгоревшие фрагменты топлива и моторного масла, а также сажу, сульфаты и оксиды металлов.

Сажа на 95-98 % состоит из углерода С. Содержание сажи в ОГ является результатом протекания двух процессов - ее образования и окисления. Сажеобразование зависит от коэффициента избытка воздуха, а также от особенностей смесеобразования, свойств топлива, температуры, продолжительности и своевременности процесса сгорания. На частицах сажи адсорбируются канцерогенные полициклические ароматические углеводороды.

Испытания дизелей ЧН15/20,5 и ЧН15/16 с разделенным впрыскиванием топлива подтвердили возможность снижения выбросов вредных веществ отработавшими газами повышением управляемости начального периода процесса сгорания. На номинальных режимах работы указанных дизелей относительная величина запальной порции топлива составляла  $0,15^{\pm 0,03}$ . Выбросы сажи с отработавшими газами оценивались фотоэлектрическим дымомером, основанном на измерении степени задымленности бумажного фильтра по шкале Bosch. Выбросы окислов азота оценивались по интенсивности окраски раствора Зальцмана, а выбросы окислов углерода оценивались газоанализатором, работающим по принципу термохимического детектирования.

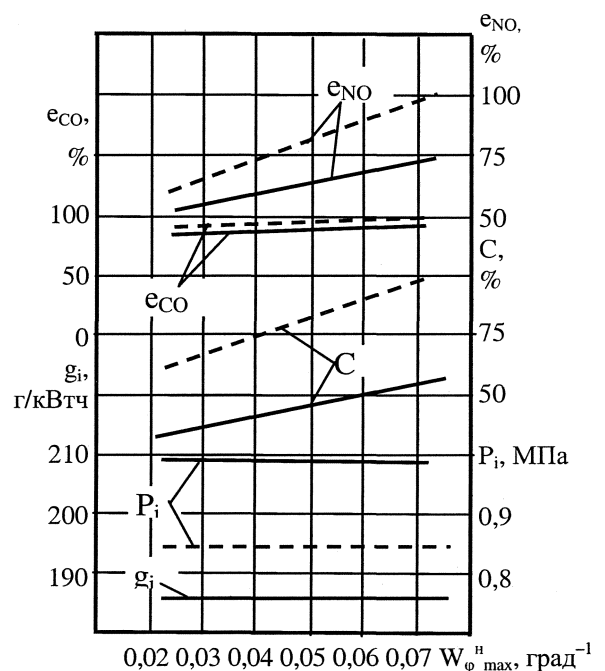
При сохранении мощностных и экономических показателей дизелей достигнуто значительное уменьшение относительных выбросов сажи с отработавшими газами. Эффект снижения этих выбросов усиливался с увеличением нагрузки дизеля ЧН15/20,5 (рис. 3, а). Практически во всем диапазоне рассматриваемых нагрузочных характеристик наблюдалось снижение максимальной скорости выгорания  $W_{\phi}^H$  и продолжительности процесса сгорания. Аналогичный эффект снижения выбросов сажи с отработавшими газами наблюдается в дизеле ЧН15/16 (рис. 3, б). Коэффициент эффективности сгорания практически не изменился во всем диапазоне нагрузок.

При обычном впрыскивании высокая скорость сгорания в начальном периоде способствует появлению эффекта самоторможения окислительных процессов вблизи момента окончания впрыскивания топлива. При разделенном впрыскивании топлива значительно уменьшается ускорение сгорания в начальном периоде, что приводит к лучшему согласованию скоростей окисления топлива и подвода кислорода в зону горения. В результате этого удается повысить скорость выгорания топлива в конечных стадиях процесса сгорания. Устраняется замедление горения, наблюдаемое при обычном впрыскивании топлива. Это способствует эффективному выгоранию свободного углерода, образующегося в результате крекинга в начальном периоде сгорания и, как следствие, снижению выбросов сажи с отработавшими газами. Высокие средние скорости сгорания топлива обеспечивают сокращение продолжительности процесса сгорания в целом.

Обеспечение однородной смеси к моменту воспламенения и снижение максимальных скоростей сгорания топлива при разделенном впрыскивании позволяет уменьшить относительные выбросы сажи С с отработавшими газами, а также сократить продолжительность процесса сгорания при сохранении мощностных и экономических показателей работы дизелей ЧН 15/20,5 и ЧН15/16.

Снижение максимальной скорости сгорания в начальном периоде  $W_{\phi}^H$  уменьшает относительные удельные выбросы окислов азота  $e_{NO}$  дизелей ЧН15/20,5 и ЧН15/16 практически во всем исследуемом диапазоне среднего эффективного давления. На номинальных режимах работы дизелей снижение  $e_{NO}$  составляет от 18 до 24 %. С уменьшением нагрузки удельный выброс окислов азота возрастает менее интенсивно при разделенном впрыскивании топлива.

Рис. 4. Влияние максимальной скорости сгорания в начальном периоде на относительные удельные выбросы вредных веществ, сажи и показатели рабочего цикла. — 414,5/20,5,  $\eta = 1070 \text{ мин}^{-1}$ ; — ЧН15/20,5,  $n = 1250 \text{ мин}^{-1}$ , ЧН15/16,  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$





Несколько иная картина наблюдается с выбросом окислов углерода  $e_{CO}$ - На номинальных режимах работы разделенное впрыскивание топлива практически незначительно влияет на удельные выбросы окиси углерода с отработавшими газами. С уменьшением нагрузки дизеля удельные выбросы окиси углерода с отработавшими газами при разделенном впрыскивании даже несколько возрастают. Это можно объяснить особенностями подготовки к воспламенению топлива запальной порции с уменьшением нагрузки, заключающимися в снижении интенсивности теплового воздействия на нее отработавших газов предыдущего цикла. Увеличение уровня формирования дизеля по мощности при разделенном впрыскивании топлива приводит к снижению удельных выбросов CO с отработавшими газами. В условиях высокой удельной мощности повышение управляемости процесса сгорания, достигаемое разделенным впрыскиванием топлива, снижает удельные выбросы окислов азота в отработавших газах.

Обобщая результаты исследования по управлению интенсивностью выгорания в начальном периоде процесса сгорания разделенным впрыскиванием топлива в дизелях с различными частотами вращения коленчатого вала (рис. 4), можно отметить, что при неизменных показателях эффективности и экономичности снижение максимальной относительной скорости сгорания  $W_{\phi \max}^n$  в 2 раза приводит к уменьшению относительных удельных выбросов окислов азота на 18-27 % и сажи с отработавшими газами на 25-30 %. При этом относительные удельные выбросы окиси углерода с отработавшими газами незначительно зависят от интенсивности выгорания топлива в начальном периоде.

Представленная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.».

### Литература

1. Лазарев, Е.А. *Физические концепции и математические модели процесса сгорания топлива в дизеле* / Е.А. Лазарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». - в настоящем номере.
2. Baudry, J. *Controle de la combustion des moteurs diesel par le procede Vigom* / J. Baudry, P. Eyzat, B. Sale // Rev. Inst. franc. Petrole. - 1964. - V. 19, № 9. - S. 982-1005.
3. Бородай, Г.Г. *Исследование влияния дозировки топлива на основные показатели рабочего процесса тракторного дизеля при предварительном обогащении воздуха бензином: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / Г.Г. Бородай. - М.: МИИСП, 1969. - 25 с.
4. Лазарев, Е.А. *Влияние разделенного впрыска топлива на показатели рабочего цикла тракторного дизеля: дис. ... канд. техн. наук* / Е.А. Лазарев. - Челябинск: ЧПИ, 1971. - 178 с.
5. Isenburg, R. *Diesel-Speichereinspritzsystem Common Rail: Techn. Unterrichtung, 2. Ausgabe, Nov.* / R. Isenburg, M. Munzenmay, H. Kull // Stuttgart: Robert Bosch GmbH. - 1998. - 49 s.
6. Kammerdiener, T. *A new common rail concept with pressure modulated injection* / T. Kammerdiener, L. Burgler, P. Herzog // ImechE, 1998.
7. *Einflexibles Piezo-Common-Rail-System mit direktgesteuerter Dusenadel* / S. Meyer, A. Krause, D. Krame, G.P. Merler // MTZ 63. - 2002. - № 2. - S. 86-93.
8. Грехов, Л.В. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей* / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. - М.: Легион-Автодата, 2004. - 176 с.
9. Leonhard, R. *Druckubersetztes Common-Rail-System fur Nutzfahrzeuge* / R. Leonhard, M. Parche, C Alvarez-Avila u. a. // MTZ 70. - 2009. - №5. ~ S. 368-375.
10. Вибе, ИМ. *К методике исследования рабочего цикла дизеля с разделенным впрыском топлива* / ИМ. Вибе, Е.А. Лазарев, АМ. Лаврик // Автомобили, тракторы и двигатели: тр. ЧПИ. - Челябинск: ЧПИ, 1971. - М 87. - С. 72-77.

*Поступила в редакцию 21 января 2010 г.*

**Лазарев Евгений Анатольевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - совершенствование рабочего процесса топливной аппаратуры дизелей

**Evgeniy A. Lazarev.** The doctor of engineering science, professor of chair «Internal combustion engines» of the South Ural State University. The area of scientific interests - perfection of working process of fuel equipment of diesel engines.