

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ В ЦИЛИНДРАХ ДИЗЕЛЕЙ

Носырев Д.Я., Климова Е.Н.

Самарская государственная академия путей сообщения
Самара, Россия

Эффективность процесса горения в цилиндрах дизелей во многом определяется организацией высокоэффективного рабочего процесса. Наиболее узким местом в теории и практике организации рабочего процесса остаются вопросы смесеобразования, включающие в себя формирование и развитие топливного факела, его взаимодействие с воздушным зарядом и со стенкой камеры сгорания, нагрев и испарение капель топлива, смешение паров топлива с воздухом, прогрев смеси до температуры самовоспламенения. Впрыснутое топливо в виде струи, состоящей из значительного количества капель диаметром от 1 до 100 мкм, распределенных в объеме струи, распространяется по камере сгорания от сопла распылителя. Скорость распространения монотонно уменьшается, при ее начальном значении на срезе сопла 250—280 м/с. Пространство между каплями заполнено воздухом и парами топлива, которые составляют 90—95 % объема струи. Воспламенение топлива происходит в средней части оболочки струи, где в первую очередь достигается благоприятное соотношение между топливом и воздухом. От очага воспламенения горение распространяется по наружной оболочке струи по направлению к вершине, как бы догоняя ее. В момент охвата горением всей наружной оболочки топливной струи заканчивается быстрое (кинетическое) сгорание и происходит спад в скорости выделения тепла (рис. 1). Время охвата пламенем всей наружной оболочки топливной струи не превышает 35—40 % от продолжительности топливоподачи и 20 % от продолжительности всего процесса сгорания.



Рис. 1. Связь распространения горения по топливной струе с характеристикой скорости выделения тепла при $P_{\Gamma} = 5,0$ МПа; $T_{\Gamma} = 736$ К, $d_c = 0,29$ мм; $b_{ц} = 0,12$ г/цикл; A – кинетическое (быстрое) горение; B – диффузионное горение; x и $x_{пл}$ – проникновение вершины топливной струи и распространение пламени по струе; dQ/dt – скорость выделения тепла [1].

В камерах сгорания тепловозных дизелей реализуется объемная схема смесеобразования и выгорания топливовоздушной смеси, при которой наблюдается существенная неравномерность распределения топлива и образование локальных зон по объему камеры с различным составом топливовоздушной смеси, с различными коэффициентами избытка воздуха. Это определяет особенности процессов самовоспламенения и горения топливовоздушной смеси, а также их влияние на уровни вредных выбросов с отработавшими газами дизелей.

Прогрев и испарение топлива в предпламенный период при температуре до 1300К сопровождаются термическим распадом (крекингом) углеводородов и окислением активированных молекул и продуктов крекинга. Появление кислородосодержащих углеводородных молекул определяет способность топлива к самоокислению, протекающему с взрывной скоростью. Наибольшей склонностью к самовоспламенению обладают молекулы гидроперекисей углеводородов с общей химической формулой вида

К—О—О—Н. Самовоспламенение и горение подготовленной топливовоздушной смеси происходит с бледно-голубым свечением пламени без образования сажи и сопровождается увеличением спектральной плотности лучистого потока радикалов C_2 , H_2O , CH и др., что одновременно отражает состав радикалов, образующихся в ходе химических реакций горения. На рис. 2 и 3 приведен характер изменения интенсивности спектральной плотности лучистого потока по углу поворота коленчатого вала в цилиндре дизеля для различных участков видимого диапазона спектра.

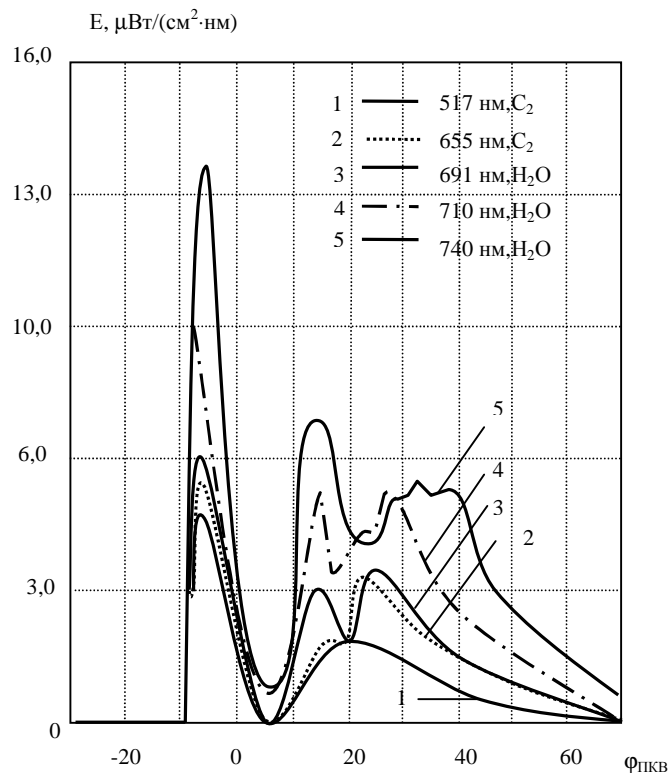


Рис. 2. Изменение спектральной плотности лучистого потока для видимого диапазона длин волн. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5 обозначены зависимости для длин волн 517, 655, 691, 710, 740 нм [2].

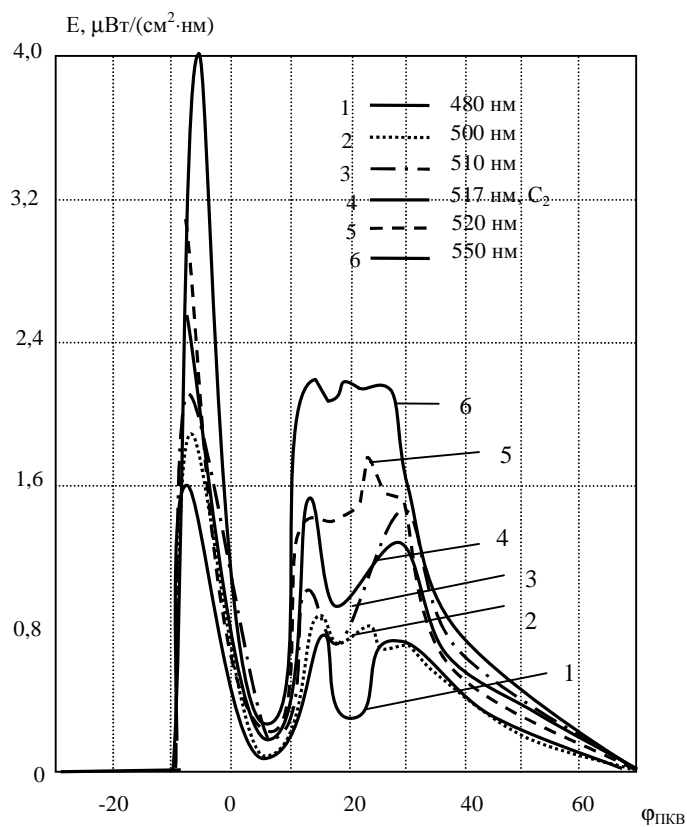


Рис. 3. Изменение спектральной плотности лучистого потока для видимого диапазона длин волн. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6 обозначены зависимости для длин волн 480, 500, 510, 517, 520, 550 нм [2].

Как следует из рис. 2 и 3, интенсивность спектрального излучения в момент воспламенения достигает максимального значения и резко снижается в районе верхней мертвой точки. Это связано с появлением нового качества в ходе химических превращений при локальном повышении температуры до значения выше 1300 К. При таком повышении температуры в отдельных локальных зонах в ходе процессов крекинга и окисления молекул происходит образование более термостойких продуктов с разнообразным сочетанием углерода, водорода и кислорода, в том числе канцерогенных, например бенз(а)пирена и сажистых частиц. Сажистые частицы окрашивают пламя в желтый цвет. Повышение температуры и давления многократно ускоряет также процессы образования молекул, содержащих кислород в упаковке —O—O— , заканчивающиеся взрывным сгоранием при достижении концентрации и температуры самовоспламенения топливовоздушной смеси. Это приводит к повторному повышению интенсивности спектрального излучения в диапазоне углов поворота коленчатого вала $10\text{—}15^\circ$ после верхней мертвой точки.

Многократное взрывное воспламенение и горение гидропероксидов приводит к резкому многократному повышению давления в цилиндре дизеля. Это фиксируется на индикаторной диаграмме в виде пиков давления. На рис. 4 приведен фрагмент индикаторной диаграммы, в виде зависимости давления в цилиндре дизеля от номеров точек опроса, на котором выделен участок *ab* нерегулярных колебаний давления (многоочаговое воспламенение и горение), сопровождающих диффузионное горение топливовоздушной смеси, и участок *bc*, соответствующий регулярным затухающим акустическим колебаниям давления (диффузионное догорание топлива).

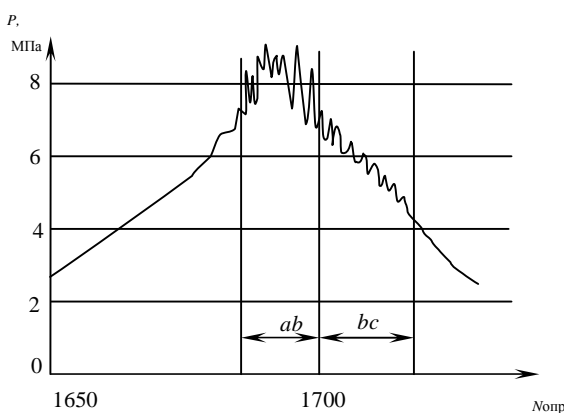


Рис. 4. Характерные участки индикаторной диаграммы: *ab* – участок нерегулярных колебаний давления; *bc* – участок регулярных затухающих акустических колебаний давления [3].

Частота опроса канала измерения давления составляла 24,38 кГц, шаг опроса в градусах поворота коленчатого вала — $0,202^\circ$. Как следует из рисунка, локализация нерегулярного колебательного процесса наблюдается в диапазоне кодов опроса 1680-1710.

Для анализа процесса регулярных затухающих акустических колебаний исключили на участке *bc* детерминированную составляющую процесса, полученную методом рекуррентного сглаживания, и изобразили участок *bc* в увеличенном масштабе (см. рис. 5).

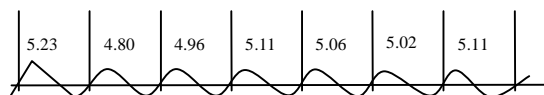


Рис. 5. Сглаженный участок затухающих акустических колебаний (детерминированная составляющая исключена). Цифрами на поле рисунка указано количество точек опроса, приходящихся на каждый период колебаний. [4]

Представленная зависимость позволяет оценить частоту наблюдающихся пульсаций и их амплитуду, определить характеристики (вид и моду) затухающих акустических колебаний. В камере сгорания могут возникнуть продольные и поперечные колебания давления. Поперечные

колебания давления могут иметь тангенциальную и радиальную форму. Моды тангенциальных колебаний давления определяются числом узловых диаметров, моды радиальных колебаний давления определяются числом узловых окружностей. Так как частота затухающих колебаний не изменяется в процессе расширения, можно утверждать, что в камере сгорания возникают поперечные колебания давления. Расчеты показали, что частота колебаний давления составляет 4515 Гц, что соответствует поперечным радиальным колебаниям (вторая мода).

Таким образом, воспламенение топливовоздушной смеси в дизелях носит многоочаговый характер и охватывает всю подготовленную к самовоспламенению топливовоздушную смесь. Топливоздушная смесь воспламеняется и выгорает при различных температурах, определяемых локальным соотношением топлива и воздуха.

Горение в дизеле имеет в целом диффузионный характер с наложенным на него кинетическим механизмом многоочагового воспламенения и сгорания смеси, подготовленной за период задержки воспламенения и в процессе горения. Современные форсированные среднеоборотные дизели характеризуются малыми задержками воспламенения и, как правило, незначительными фазами кинетического сгорания. Преобладающим процессом в них является диффузионное сгорание, в ходе которого выгорает основное количество топлива. В режиме диффузионного сгорания после воспламенения топливовоздушной смеси в цилиндрах дизеля происходят сложные термохимические превращения, приводящие к образованию широкого спектра токсичных и нетоксичных составляющих продуктов сгорания.

В этой связи сокращение продолжительности диффузионного сгорания — основная цель совершенствования смесеобразования в дизелях этого типа, которая достигается как на основе комплексных экспериментальных исследований, так и путем расчетов и оптимизации на базе разрабатываемых математических моделей.

При описании сложных термохимических превращений наибольшее распространение получили феноменологические модели, позволяющие при относительно небольшой трудоемкости расчетов и приемлемых затратах машинного времени достаточно полно отразить основные закономерности изучаемых физических процессов и получить необходимую информацию для решения задач оптимизации на современном уровне. Феноменологические модели основаны на сочетании фундаментальной теории, соображений подобия, прямых и косвенных данных и зависимостей, полученных экспериментально и расчетом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носырев Д.Я., Скачкова Е.А., Росляков А.Д. Выбросы вредных веществ локомотивными энергетическими установками. М.: Маршрут, 2006. – 248 с.
2. Kazuhiko Nadase, Kohji Funatsu. Behavior of Band Spectra in Diesel Combustion Flames // OR of RTRJ. – Vol. 29. № 2. 88 May.
3. Носырев Д.Я. Особенности процесса самовоспламенения и горения в тепловозных дизелях // Экономика, эксплуатация и содержание железных дорог в современных условиях: Межвуз. сб. науч. тр. – Самара, СамИИТ, 1999. Вып. 17. – С. 179-182.
4. Носырев Д.Я., Тарасов Е.М., Левченко А.С., Мохонько В.П. Научные основы контроля и диагностирования тепловозных дизелей по параметрам рабочих процессов. Самара: СамИИТ, 2001. – 174 с.