

Загадки процесса сгорания

АЛЕКСАНДР ХРУЛЕВ
кандидат технических наук

Совсем новый автомобиль ВАЗ-21099, всего 50 км пробега, но с двигателем творится неладное: на холостом ходу его трясет, нет мощности, а из выхлопной трубы идет подозрительный дымок. Гадать не надо: достаточно отсоединить шланг вентиляции картера, чтобы убедиться в большом давлении картерных газов и, соответственно, в поломке поршней. Ага, — скажет кто-нибудь, — наверное, дело в низком качестве сборки! Или детали подвели? Нет, причина другая: детонация. Она и разрушила поршни.



С детонацией сталкивался, пожалуй, каждый водитель. И каждый знает, что это для двигателя плохо. И что появляется она чаще всего из-за низкооктанового бензина и на слух воспринимается стуками («клапанов» и даже «пальцев»). Только вот проблема: оказывается, не все детонацию слышат, а если и слышат, то нередко воспринимают ее как нечто, от них не зависящее, и даже путают ее с другими видами нарушения процесса сгорания.

Кроме того, причин появления детонации много, и несоответствие октанового числа бензина — лишь одна из них. Короче, чтобы разобраться и с причинами, и с последствиями, мы решили начать с самого начала — даже не с самой детонации, а вообще с разговора о том...

Что происходит в цилиндре

Интересующий нас процесс начинается в самом конце такта сжатия, когда поршень, сжимая топливовоздушную смесь, приближается к верхней мертвой точке (ВМТ). Искровой разряд на свече зажигания вызывает мгновенный разогрев смеси до температуры более 10000°C в очень малом объеме между электродами свечи. Фактически за очень короткий промежуток времени, примерно равный длительности разряда (около 10^{-5} с или одной сотой доли микросекунды), в этом объеме происходят нагрев, термическое разложение, ионизация молекул топлива и кислорода и воспламенение смеси. Возникает очаг горения, насыщенный продуктами сгорания, и по

верхность раздела между ним и несгоревшей смесью (фронт пламени).

Если объем очага достаточен для прогрева и воспламенения соприкасающихся с ним слоев смеси (это зависит в основном от мощности искрового разряда и температуры смеси в конце такта сжатия), то процесс сгорания начинает распространяться по объему камеры сгорания от свечи в сторону еще не горевшей смеси.

Вначале скорость распространения пламени невелика — менее 1 м/с. Но длится этот период недолго. В процесс вмешиваются турбулентные пульсации, другими словами, вихри, возникающие в цилиндре и камере сгорания при наполнении и сжатии смеси. Вихри искривляют и разрушают четкие границы фронта пламени: объемы горящих компонентов внедряются в негорящую смесь. Площадь поверхности фронта резко возрастает, а вместе с ней повышается и скорость распространения фронта — до 50-80 м/с.

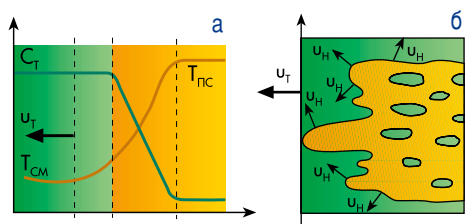
Ускоряющееся движение фронта вызывает все более быстрое воспламенение и сгорание новых порций смеси. В результате температура и давление в камере сгорания резко увеличиваются. Но как только пламя достигнет стенок камеры сгорания (этот момент примерно совпадает с максимумом давления в 3-6 МПа), количество смеси, вступающей в реакцию, станет уменьшаться — слишком мало ее осталось, да и отвод тепла от газов к более холодным стенкам камеры сгорания играет здесь не последнюю роль. Догорание последних порций смеси идет медленно, при этом температура продуктов сгорания, достигнув максимума (более 2000°C) несколько позже, чем давление, начинает падать вместе с началом движения поршня вниз. Все, процесс горе-

ния, занявший 30°–40° поворота коленчатого вала (ПКВ), закончился. Начинается процесс расширения или, как принято говорить, такт рабочего хода.

Как мы уже отметили, на упрощенно описанный процесс влияет немало факторов. Например, температура стенок камеры. Чем она ниже, тем медленнее идет процесс, особенно на последней стадии — ведь снижение температуры замедляет химические реакции.

Очень важен и состав топливовоздушной смеси, точнее говоря, коэффициент избытка воздуха λ . Если топлива слишком много («богатая» смесь, $\lambda < 1$) или, напротив, мало («бедная» смесь, $\lambda > 1$), то «лишние» вещества, не участвующие в реакциях, забирают на себя теплоту и тем самым охлаждают смесь и продукты сгорания. Из-за этого максимальные значения температуры и давления уменьшаются, двигатель недодает мощности, в выхлопных газах появляются продукты неполного сгорания (СО, СН).

Среди прочих факторов отметим такие, как давление и температура смеси в начале сжатия, степень сжатия, режим работы двигателя (частота вращения и нагрузка), угол опережения зажигания, мощность искры, конструкция камеры сгорания и ее размеры, количество нагара на стенках и, конечно, октановое число бензина. Отклонения параметров от их оптимальных значений, естественно, приводят к нарушениям процесса сгорания. И двигатель «плохо работает».



■ — продукты сгорания; ■ — несгоревшая топливовоздушная смесь; u_H, u_T — скорость распространения пламени; T_{CM}, T_{PC} — температура топливовоздушной смеси и продуктов сгорания; C_T — концентрация топлива. Фронт пламени вначале имеет довольно простую форму (а), но быстро искривляется, а его четкие границы разрушаются (б).

Зависимость давления и температуры в цилиндре от угла поворота коленчатого вала (индикаторная диаграмма):

I — момент зажигания;

II — фаза быстрого сгорания; III — фаза догорания;

Θ — угол опережения зажигания.

Почему двигатель работает плохо?

Большое число нарушений в работе двигателя, связанных с процессом горения, возникает из-за переобогащения топливовоздушной смеси, когда возникают пропуски воспламенения, вспышки во впускной и выпускной системах.

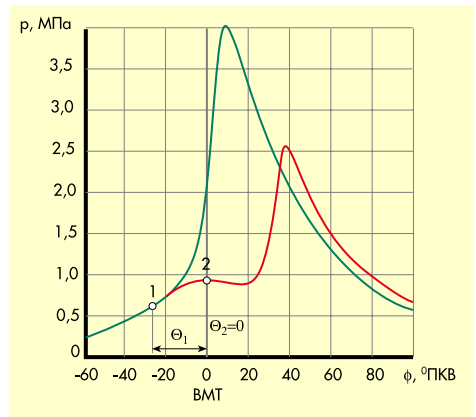
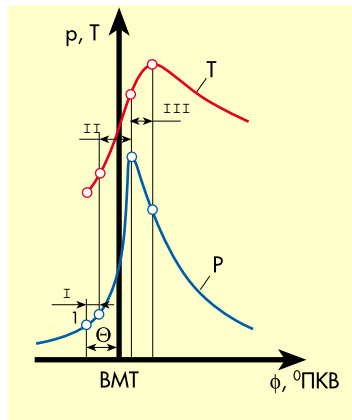
Переобогащение смеси ($\lambda > 1,2 \div 1,3$), возможное при неисправностях системы топливоподдачи, вызывает сильное замедление химических реакций или даже их прекращение в отдельных цилиндрах — тогда мы вправе говорить о пропусках воспламенения (вспышек) в цилиндре. Двигатель при этом, естественно, не развивает мощности. Правда, пропуски воспламенения возможны и из-за неисправности системы зажигания. Например, когда слишком мала мощность искры или искрообразование носит нерегулярный характер.

Вспышки во впускной системе обычно появляются именно тогда, когда топливовоздушная смесь горит слишком медленно. При этом смесь способна продолжать гореть даже на такте выпуска. А поскольку в любом двигателе существует перекрытие клапанов (период, когда в начале выпуска открыты оба клапана), продукты сгорания получают возможность поджечь свежую смесь, начавшую поступать в цилиндр. Тогда быстрое распространение пламени из цилиндра во впускные каналы создает характерный «хлопок» — своеобразный взрыв на выпуске.

Кстати, при слишком «позднем» зажигании, нередко являющемся причиной подобных «хлопков», мощность двигателя заметно падает. Почему это происходит, видно по индикаторной диаграмме: при позднем зажигании пик давления в цилиндре резко уменьшается и сдвигается в сторону фазы выпуска.

Еще более сильный взрыв возможен на выпуске — в глушителе. При пропусках воспламенения в отдельных цилиндрах там может скапливаться горючая смесь, которая способна воспламеняться с характерным «выстрелом», к примеру, при резком открытии дроссельной заслонки.

Описанные отклонения от нормального протекания процесса горения для механической части двигателя никакой опасности не представляют. Однако хлопки во впускной системе способны вывести из строя расположенные там датчики, разорвать воздушный фильтр, а то и вызвать пожар под капотом. «Выстрел» в глушитель иногда заканчивается разрушением элементов выпускной системы. Чтобы до этого не доводить, доста-



точно содержать системы зажигания и топливоподдачи в исправном состоянии.

Совсем другое дело, если при работе двигателя возникает преждевременное самовоспламенение смеси (калильное зажигание). Очевидно, преждевременное это значит — до момента искрообразования на свече зажигания. Такое возможно, если какие-либо поверхности или элементы камеры сгорания нагреты до слишком высокой температуры (700°C и более). Обычно источниками преждевременного самовоспламенения могут стать перегретые электроды свечи зажигания (когда она, например, подобрана неверно), тарелка выпускного клапана (особенно при неплотном прилегании к седлу), а также нагар на некоторых участках стенок камеры сгорания и днища поршня.

Калильное зажигание, в отличие от нормального, возникает сразу на большой поверхности — к тому же раньше, чем искровой разряд на свече. Поэтому данный процесс, хотя и похож по своей физической сущности на нормальное горение, не только начинается раньше, но и идет быстрее. А значит, возрастает максимальное давление в цилиндре при горении.

Все это вызывает рост нагрузок на детали шатунно-поршневой группы, увеличение шумности работы двигателя, в том числе стуки глухого тона, которые довольно сложно выделить из ряда звуков мотора. Но главное — калильное зажигание приводит к значительному росту тепловых нагрузок на поверхности, образующие камеру сгорания. Особенно страдают алюминиевые детали: днище поршня, поверхность головки блока выпускного клапана. Ну и, конечно, свечи зажигания, которые быстро выходят из строя из-за оплавления электродов.

Коварство калильного зажигания состоит в том, что его появление почти не слышно. Из-за этого водитель может заметить неладное только

«Позднее» зажигание заметно уменьшает максимум давления в цилиндре и сдвигает его в сторону выпуска:

— нормальное опережение зажигания (Θ_1);

— «позднее» зажигание (Θ_2).

тогда, когда, например, поршень уже прогорел, и ремонт двигателя неминуем. Для борьбы с этим явлением наиболее действенны профилактические меры. В первую очередь — установка свечей зажигания с калильным числом, соответствующим данному двигателю.

Иногда калильным зажиганием называют и самопроизвольную работу двигателя после выключения зажигания. Обычно это происходит, если в двигатель продолжает поступать топливо (подобное случается обычно при наличии карбюратора). Но этот режим скорее неприятен, чем опасен — нет нагрузки на двигатель, а топлива слишком мало, чтобы сжечь поршни. Борьбаться с таким самовоспламенением нетрудно — обычно бывает достаточно заменить электромагнитный клапан в карбюраторе, свечи зажигания и отрегулировать все, что требуется по инструкции, включая зазоры в приводе клапанов. Бывает и так, что самовоспламенение возникает из-за непонятной смеси, которую вам вместо бензина залили в бак при очередной заправке.

В целом же все описанные отклонения в протекании процесса горения объединены тем, что физическая картина процесса почти не меняется: горение начинается от сильно нагретого источника или поверхности, а далее с большей или меньшей скоростью распространяется в виде фронта пламени по всему объему камеры сгорания, замедляясь и угасая у стенок.

Совершенно другая картина наблюдается при детонации — одном из самых загадочных явлений в двигателях внутреннего сгорания, над которым бьется не одно поколение ученых и конструкторов. Об этом — в следующих номерах журнала. **АБС**



С этим поршнем «поработало» калильное зажигание. Теперь двигателю предстоит серьезный ремонт...