

Загадки процесса сгорания

(Окончание. Начало в № 3, 2000)

В прошлом номере журнала мы рассмотрели процесс сгорания топлива и возможные его нарушения, возникающие при эксплуатации двигателя.

Сегодня речь пойдет о детонации — одном из наиболее распространенных, опасных и одновременно загадочных явлений в двигателе.

Первыми с явлением детонации столкнулись конструкторы авиационных моторов еще в начале 20-го века, когда авиация, обогнав автомобильный транспорт, вышла на новый виток технического прогресса и стала использовать все более мощные и легкие двигатели.

Попытки повысить мощность только за счет увеличения объема цилиндров естественно приводили к возрастанию массы и габаритов двигателей, что для самолетов неприемлемо. Можно было пойти по пути увеличения частоты вращения коленвала. Но в авиации свои законы — при очень быстром вращении винта скорость обтекания воздухом концов лопастей могла приблизиться к скорости звука. А в этом случае сила тяги винта неизбежно падает, даже несмотря на высокую мощность мотора.

Оставался единственный выход — совершенствовать рабочий процесс, в том числе сгорание. И здесь ключевым параметром оказалась степень сжатия.

Зачем повышать степень сжатия?

О том, что степень сжатия — параметр для двигателя важный, свидетельствовали теория и практические результаты испытаний разных двигателей. Простейший анализ индикаторной диаграммы (в те времена уже прекрасно известной) однозначно показывал: увеличение степени сжатия дает рост давления в цилиндре в конце такта сжатия и при сгорании топлива. Значит, увеличивается площадь под кривой диаграммы (она же — работа цикла двигателя). Повышается и мощность, которая пропорциональна работе. КПД двигателя и его экономичность тоже растут. А это хорошо и для автомобиля, и для самолета.

Но испытания двигателей с высокой степенью сжатия показали, что на некоторых режимах они работали шумно, с характерным стуком, и быстро выходили из строя. Ломались поршни, поршневые кольца, прогорали стенки камер сгорания. Стало ясно, что только за счет изменения геометрии камеры сгорания «чистого» повышения мощности двигателя не получить.

И тогда вмешалась наука: были разработаны теории процесса горения, поставлены тысячи экспериментов, прежде чем появилась ясность в понимании того, что же на самом деле происходит в камере сгорания двигателя. И откуда берется этот стук, в конечном счете разрушающий двигатель.

В дальнейшем результаты исследований процесса сгорания, детонации и причин ее возникновения были перенесены с авиационных на автомобильные двигатели внутреннего сгорания.

Откуда берется стук?

Напомним, как развивается процесс сгорания. После образования искры между электродами свечи по объему камеры начинает распространяться фронт пламени. В реакцию горения вступают все новые и новые порции свежей топливовоздушной смеси. В результате выделения тепла в камере быстро возрастает давление, достигая максимума.

Когда основная фаза сгорания заканчивается, начинается фаза догорания. К этому моменту в камере остается еще достаточно большое количество не вступившей в реакцию топливовоздушной смеси. Вот здесь-то нас и поджидают сюрпризы. Давление в камере сгорания сильно увеличилось — значит, повысилась и температура смеси, еще не вступившей в реакцию. При определен-



АЛЕКСАНДР ХРУЛЕВ
кандидат технических наук

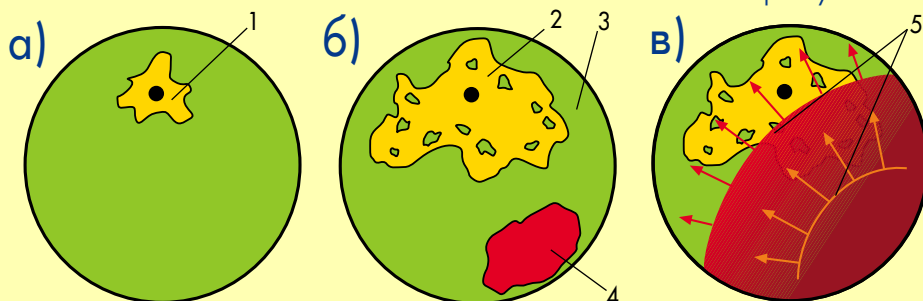
ных условиях она может стать выше температуры самовоспламенения топлива. Но это еще полбеды, ведь для запуска реакции самовоспламенения требуется время. При нормальной работе двигателя быстрое продвижение пламени не приводит к самовоспламенению — для этого просто не хватит времени.

Настоящая беда дает о себе знать, если цилиндр двигателя имеет большой объем и габариты. Тогда длина пути и, соответственно, время распространения фронта пламени увеличиваются, создавая возможность для начала процесса самовоспламенения. В некоторых случаях может уменьшиться само время, необходимое для начала реакции самовоспламенения, — при неправильной установке зажигания, применении низкооктанового бензина и целом ряде других причин.

Возникшее в результате повышения давления

УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

- а) начало горения смеси, появление очага воспламенения у свечи зажигания (1);
- б) распространение фронта пламени (2) по объему топливовоздушной смеси (3), объемное самовоспламенение части смеси, удаленной от свечи зажигания (4);
- в) распространение ударных волн (5) по камере сгорания, воспламеняющих еще не горевшую смесь.

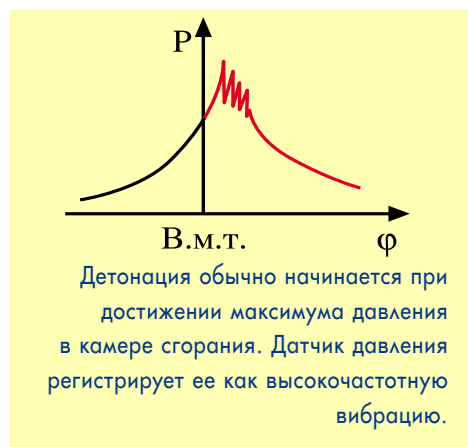


и температуры самовоспламенение происходит не во фронте пламени, как нормальный процесс горения, а за его пределами, в части объема еще не горевшей смеси. Возникает самый настоящий взрыв — резкое, практически мгновенное выделение тепла и повышение давления в той области, где случилось самовоспламенение.

А дальше еще интересней. Как и во время всякого взрыва, образуется ударная волна. Распространяется она со скоростью, превышающей 1000 м/с (напомним, что фронт пламени «движется» намного медленнее — со скоростью не более 50-80 м/с). Во фронте ударной волны, движущейся по камере, не только давление, но и температура скачкообразно возрастают — чем не условия для воспламенения остатков негоревшей смеси?

На практике так и происходит: она воспламеняется со скоростью движения ударной волны. Эта волна, многократно отражаясь от стенок камеры сгорания, и вызывает характерный звонкий металлический стук при работе двигателя.

Описанное явление получило название «детонация», а процесс сгорания, сопровождаемый объемным самовоспламенением последних порций смеси с образованием ударных волн, — детонационным сгоранием (в иностранной литературе детонацию иногда даже обозначают термином *клоск* — стук). Если в камере сгорания устано-



вить датчик давления, то он зарегистрирует высокочастотную вибрацию, частота и амплитуда которой зависят от интенсивности детонации.

Детонация, особенно сильная, не только вызывает стук двигателя под нагрузкой, но и потерю мощности. А разрушение деталей из-за детонации — это вообще особая тема.

Как победили детонацию?

Многолетняя борьба за мощность моторов не прошла даром, тем более что велась она сразу по нескольким направлениям. Так появились высокооктановые марки авиационного и автомобильного бензина. А конструкторам удалось увели-

чить степень сжатия почти вдвое — от 5÷6 в 20-30-х годах до 10÷11 в наше время.

За счет каких ресурсов это было достигнуто? Для ответа на этот вопрос достаточно сравнить современный двигатель с его прародителем.

Первое, что бросается в глаза, — камера сгорания стала компактней, т.е. расстояние от свечи зажигания до самой удаленной точки камеры стало намного меньше. Значит, фронт пламени это расстояние проходит намного быстрее, и процессы самовоспламенения не успевают начаться.

Появились вытеснители — поверхности камеры, к которым поршень в ВМТ подходит практически вплотную. Образуется щель, из которой перед воспламенением часть топливоздушная смеси вытекает с большой скоростью и «завихривает» (турбулизирует) основную массу смеси в камере. Турбулизация смеси препятствует самовоспламенению, одновременно ускоряя движение фронта пламени.

Заметно уменьшился диаметр цилиндра — ведь чем он меньше, тем меньший путь пройдет фронт пламени. На некоторых двигателях стали устанавливать по две свечи зажигания — с той же целью. Значительно усовершенствованы процессы впуска и выпуска, в несколько раз повышены максимальная частота вращения и, соответственно, мощность двигателей. Улучшены условия охлаждения стенок камеры сгорания и днища поршня, на многих двигателях применено масляное охлаждение поршней. Все это позволило снизить температуру смеси там, где обычно начинается самовоспламенение.

Появились, наконец, электронные системы управления углом опережения зажигания, в последние годы — с обратной связью по сигналу с датчика детонации.

Казалось бы, все сделано, чтобы предотвратить детонацию и ездить в свое удовольствие. Но нет, не получается: двигатели продолжают выходить из строя из-за детонации.

Чем опасна детонация?

Ударные волны, «гуляющие» по камере сгорания во время детонации, «бьют» по стенкам и элементам, установленным в камере, в первую очередь по поршню. Заметим, что удары являются не только механическими, но и тепловыми. Это приводит в первую очередь к поломке перемычек между канавками колец на поршне. Удар вначале воспринимает верхнее компрессионное кольцо. Оно передает удар на перемычку, которая при сильной детонации способна треснуть и даже отделиться от поршня в течение всего нескольких минут работы двигателя.

Дальше события будут развиваться в зависимости от режима и времени работы двигателя.



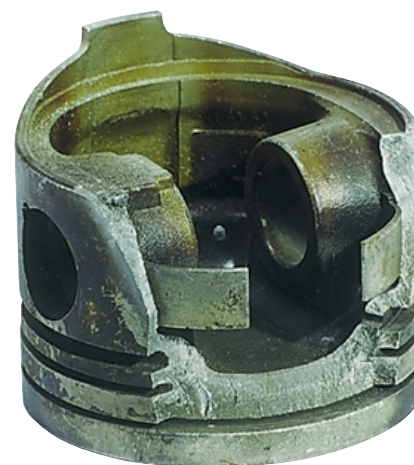
Поломанная перемычка на поршне — типичный результат детонации.

Очевидно, поломка перемычки на поршне вызовет резкое падение компрессии в этом цилиндре и значительное увеличение расхода масла. Если водитель этого не заметит или проигнорирует, ситуация продолжит развитие. Верхнее кольцо, потеряв тепловой контакт с поршнем, не сможет выполнять свою основную функцию — отводить тепло от нагретого поршня к более холодному цилиндру. Последующий перегрев поршня, сопровождаемый прорывом горячих газов из камеры сгорания, приведет к выгоранию верхней части поршня.

Иногда страдают и края днища поршня — ударные волны способны выбивать из него частицы металла. На поверхности образуются каверны, которые затем углубляются и расширяются. Разрушения при этом будут несколько схожи с теми, которые характерны для калильного зажигания (см. «АБС-авто», № 3, 2000). С той лишь разницей, что детонация больше «бьет» по краям поршня (там образуются ударные волны при самовоспламенении топлива), а калильное зажигание обычно сжигает поршень ближе к центру, там, где расположена свеча зажигания.

От детонации страдают и край окантовки прокладки, и выступающие элементы камеры сгорания, в том числе свеча зажигания. На привалочной плоскости головки блока вблизи окантовки

Сильная детонация в конечном счете привела к поломке юбки поршня.





А на этом поршне детонация выжгла хороший кусок — результат отказа регулятора давления турбонаддува.

детонация способна выжечь глубокие каверны, приводящие к потере герметичности и прогоранию прокладки ГБЦ. В дальнейшем такие повреждения головки удастся устранить только с помощью сварки.

Реже встречается поломка поршневых колец. Верхнее кольцо из высокопрочного чугуна прекрасно противостоит детонации. Но если, к примеру, при ремонте использованы кольца сомнительного происхождения, они могут сломаться, и последствия будут почти такими же, что и при поломке перемычки на поршне.

Детонация вызывает и другие, менее заметные, но не менее серьезные дефекты. Например, ударные волны разрушают пленку масла на поверхности цилиндра, из-за чего износ верхней его части и поршневых колец заметно ускоряется. Да и вообще удары по поршню не проходят бесследно для соединений поршня с пальцем и шатунного вкладыша — с шейкой коленвала.

Кстати, канавка верхнего кольца при детонации тоже быстрее изнашивается, а иногда вообще разбивается. Известны также случаи деформации перемычек на поршне, при которых нижние кольца оказывались зажатыми, то есть теряли подвижность в канавках и, соответствен-

но, работоспособность. Как видим, опасностей в детонации таится немало. И чтобы двигатель не пострадал, надо их избегать. А для этого хорошо бы знать...

Когда появляется детонация?

Она возникает, как известно, не на всех режимах работы двигателя. Например, на холостом ходу и малых нагрузках ее не будет — слишком мало давление в цилиндре, чтобы при сгорании могло произойти поджатие и самовоспламенение последних порций топливовоздушной смеси. Маловероятна детонация и при высоких частотах вращения. Время горения (распространения фронта пламени) здесь мало, процесс горения при этом более растянут по углу поворота коленвала, а нарастание давления идет с относительно меньшей скоростью. Из-за этого не хватает времени на развитие процесса самовоспламенения отдельных зон смеси.

Практика подтверждает эти рассуждения: детонация, как правило, возникает при больших нагрузках на малой и средней частоте вращения. Но режимы эти неизбежны при работе двигателя, поэтому важно знать факторы, влияющие на возникновение детонации и поддающиеся регулировке. Главными и первыми следует назвать угол опережения зажигания и октановое число бензина. Слишком раннее зажигание приводит к увеличению скорости нарастания давления и повышению его максимального значения, а низкое октановое число бензина гарантирует окисление (самовоспламенение) топлива при сравнительно низких температурах.

На появление детонации влияет и тепловой режим двигателя. Поскольку последние порции смеси, определяющие появление детонации, расположены у стенок цилиндра, высокая температура стенок дополнительно нагревает смесь, делая ее самовоспламенение более вероятным.

Вот почему при перегреве двигатель нередко «детонирует».

Естественно, возникает вопрос...

Как избежать детонации?

Распознать ее можно по характерному стуку. Поэтому надо научиться слушать двигатель. Правда, на некоторых современных автомобилях услышать детонацию непросто — слишком хорошо изолирован салон. В этом случае слышен слабый детонационный «шелест», не характерный для нормального работающего мотора, но уловить его на слух здесь намного труднее.

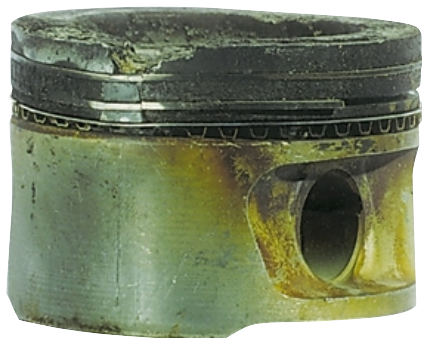
Гарантия от детонации — правильная установка угла опережения зажигания и применение бензина с требуемым для данного двигателя октановым числом. Если же такое несоответствие обнаружилось (например, на АЗС бензин оказался «не той системы»), придется или исключить режимы больших нагрузок на низких и средних частотах вращения, или сдвинуть зажигание на более позднее (если, конечно, конструкция двигателя позволяет изменить угол опережения зажигания).

Иногда появлению детонации способствуют и совсем неожиданные факторы. К примеру, при ремонте головки блока пришлось снять большой слой металла с ее привалочной плоскости. Значит, степень сжатия увеличилась, и придется использовать бензин с более высоким октановым числом. Конечно, в подобной ситуации можно попробовать уменьшить угол опережения зажигания, но тогда возрастет опасность прогара выпускных клапанов: ведь при позднем зажигании температура выхлопных газов увеличится.

Поэтому бороться с детонацией лучше самыми простыми способами. И в первую очередь — содержать двигатель в исправном состоянии и применять соответствующее ему топливо. **АБС**

Если продолжать движение с большой скоростью, легко сжечь сломанный детонацией поршень (в некотором смысле и двигатель тоже):

а) деформация перемычек и колец из-за перегрева;



б) начало плавления поврежденного поршня;



в) прогар верхнего уплотнительного пояса поршня.

