

ДЕТОНАЦИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

М. М. РУСАКОВ

При детонации химическое превращение возбуждается ударной волной, которая при своем распространении сжимает и нагревает вещество (скачок давления и температуры). Детонация может возникать или в результате ускорения медленного горения самого вещества, или воздействия на вещество ударной волны достаточной интенсивности.

Особое значение и особое место среди результатов по исследованию возникновения детонации имеют опыты 1935–1940 гг. К. И. Щёлкина, посвященные исследованию возникновения детонации в более сложных условиях, в частности влияния состояния поверхности трубы, в которой происходит развитие процесса. К. И. Щёлкин создавал грубую шероховатость путем введения внутрь трубы проволоочной спирали, которая помещалась вблизи источника зажигания. Было установлено сильное со-

кращение преддетонационной длины. Обычно в гладких трубах устойчивая детонация возникает на расстоянии 20–40 диаметров трубы, в сильно шероховатых трубах эта длина сократилась до 2–4 диаметров. При наличии сильной шероховатости воспламенение происходило в результате отражения ударной волны от выступов. При этом наблюдалась детонация с очень малыми скоростями (~900 м/с) и ненормально быстрое горение со скоростью ~500 м/с (обычные скорости детонации 2000–2500 м/с, горения 15–20 м/с).

В результате проведения очень большого объема исследований были установлены основные закономерности образования и распространения детонации в газовых средах в цилиндрических каналах в зависимости от различных факторов: начальных параметров потока, условий распространения, формы каналов. Искусственная

турбулизация потока газа перед пламенем (шероховатые стенки, препятствия в виде спиралей, сеток или диафрагм) приводит к существенному сокращению длины преддетонационного участка ускорения пламени.

Продолжением исследований возникновения детонации в горючих газовых смесях явилось исследование сгорания в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Детонация в поршневых ДВС — это быстрый, приближающийся к взрыву процесс горения топливной смеси в цилиндре карбюраторного двигателя, сопровождающийся неустойчивой работой (металлический стук в цилиндре, дымный выхлоп, износ и разрушение деталей).

Детонация в ДВС была обнаружена А. С. Соколиком. Стук в цилиндрах ДВС начал проявляться в 30-х годах прошлого столетия, когда стали

повышать мощность ДВС увеличением степени сжатия ϵ (отношение максимального объема к минимальному). Фотографирование показало, что в конце распространения пламени вблизи стенки сгорание делается почти мгновенным, что вызывает резкий скачок давления, а в дальнейшем — сильные его колебания. На фотографиях фиксируется картина, подобная картине при взрыве быстрогорящих и детонирующих смесей в закрытых цилиндрах и трубах. Мгновенное сгорание и скачки давления вызывают характерный стук в двигателе. Такой режим работы оказывается губельным для двигателя и приводит к уменьшению мощности и экономичности. Сходство описанного явления с обычной детонацией газов при сгорании в трубах позволило назвать режим работы двигателя со

стук «детонационным режимом работы двигателя», а само явление — «детонацией».

Наиболее интересной работой А. С. Соколика и А. Н. Воинова является фоторегистрация пламени в камере сгорания через окно в головке цилиндров. На основании этих работ А. С. Соколик считал установленным наличие обычной детонационной волны при сгорании топливной смеси в камере сгорания (КС) двигателя. Часть горючей смеси в КС, до которой фронт пламени доходит в последнюю очередь, воспламеняется от сжатия. Это самовоспламенение может приобрести взрывной характер и распространяться совместно с фронтом ударной волны по механизму, в принципе вполне аналогичному детонации. Общим для детонации в двигателях и «классической» детонацией является сгорание некоторой части заряда во фронте ударных

волн. Поэтому термин «детонация» вполне оправдан.

Возникновению детонации в форсированных двигателях способствует повышение давления и температуры смеси в конце сжатия, что, в свою очередь, зависит от степени сжатия в двигателе. Детонация сильно зависит и от сорта топлива. Характеристикой стойкости топлива против детонации в двигателе является октановое число. Чем больше это число, тем выше качество топлива, тем оно дороже.

На кафедре «Тепловые двигатели» Тольятинского политехнического института в 1990–1992 гг. проводились экспериментальные исследования влияния различных факторов на пределы детонации и воспламенения с целью использования найденных зависимостей для повышения эффективности работы ДВС.

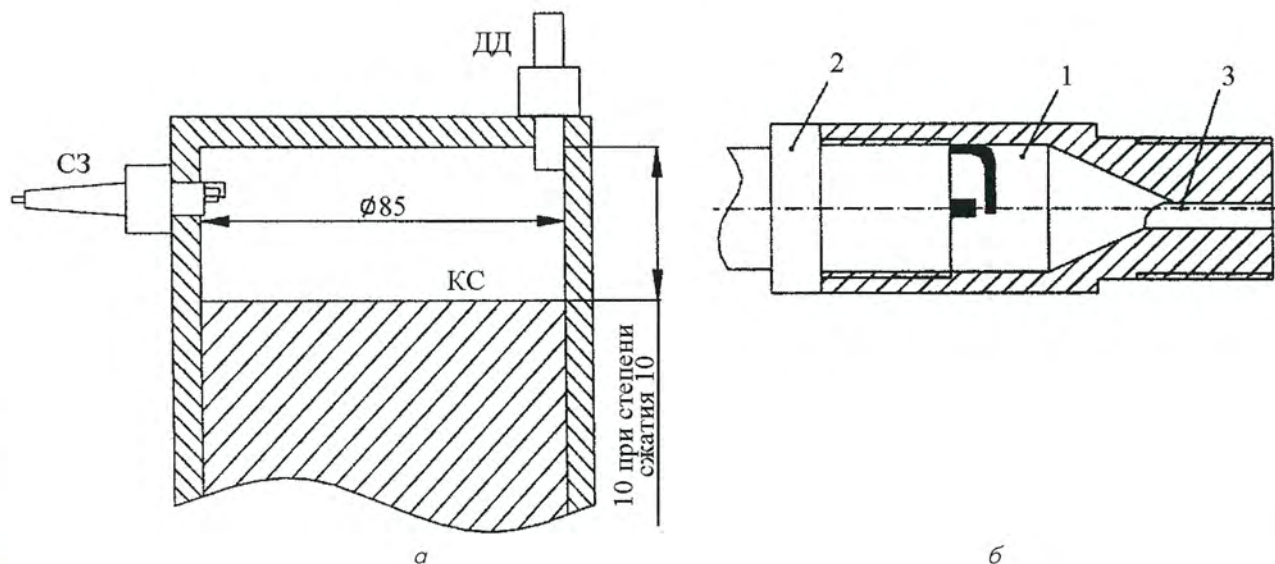


Рис. 1. Схема проведения испытаний, $n = 600$ об/мин: а — камера сгорания установки испытания топлива (УИТ-85): КС — камера сгорания, ДД — датчик детонации, СЗ — свеча зажигания; б — форкамера, обеспечивающая струйное воспламенение, 1 — полость, 2 — свеча, 3 — канал

Исследования проводились на одноцилиндровой установке УИТ-85 с переменной степенью сжатия. Установка, изображенная на рис. 1, имеет плоскую цилиндрическую камеру сгорания (идеальную) с боковым расположением свечи. В опытах определялись пределы воспламенения и детонации при различных степенях сжатия. Пределом воспламенения считалось начало появления пропуска зажигания при установившемся тепловом режиме двигателя. Детонация определялась специальным датчиком (детонометр ДП-77).

Результаты представлены на рис. 2. Такая схема хотя и не охватывает влияние всех

факторов на образование детонации, но наиболее приближена к практическим задачам (устранение детонации в ДВС). Одновременно определялся и предел воспламенения.

На рисунке показаны пределы воспламенения, детонации и область стабильного сгорания топливоздушнoй смеси, в которой может нормально работать ДВС. Работа на пределе воспламенения, в большинстве случаев, обеспечивает работу с минимальным расходом топлива и минимальной токсичностью отработавших газов, а работа на пределе детонации обеспечивает получение максимальной мощности двигателя. Детона-

ция в ДВС ограничивает степень сжатия, а следовательно, не позволяет повысить мощность и КПД двигателя.

В опытах исследовалось влияние состава топливоздушнoй смеси активных (H_2 и O_2), инертных (CO_2) добавок и способа воспламенения (струйное) на пределы воспламенения и детонации в условиях «идеальной» камеры сгорания ДВС. Реальные двигатели имеют более сложную форму камеры сгорания и расположение свечи ближе к центру. Поэтому склонность реального двигателя к детонации от различных факторов может быть более сложной. Струйное зажигание осуществлялось стру-

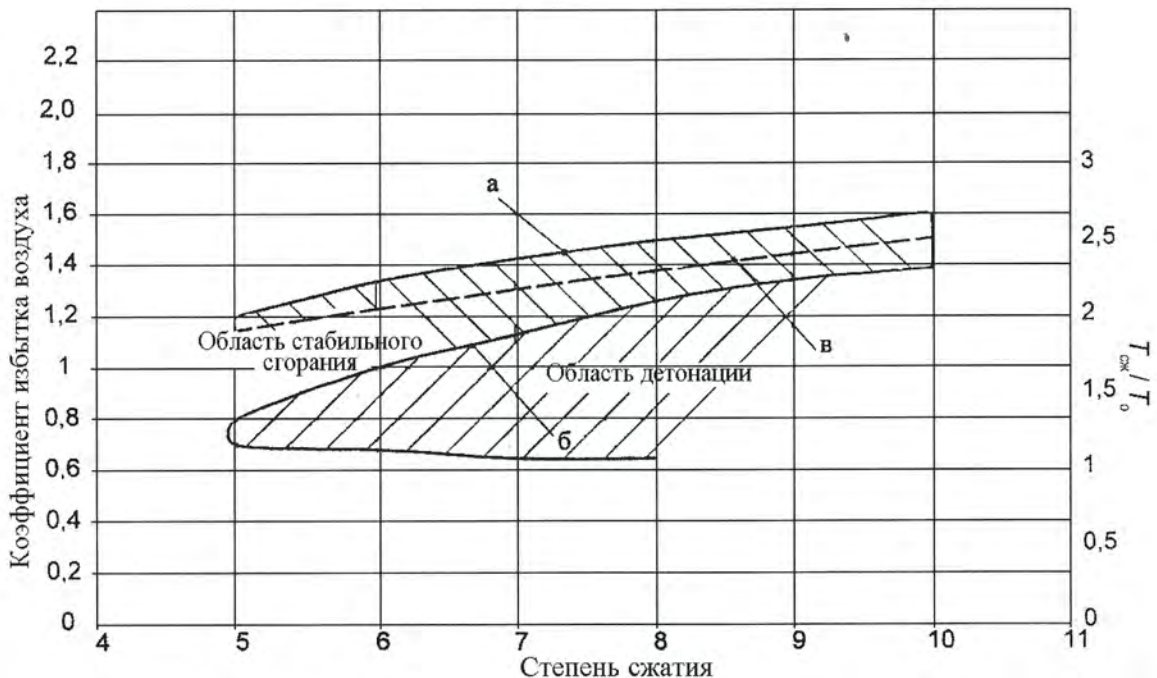


Рис. 2. Пределы воспламенения и детонации бензина А-93: а — предел воспламенения; б — предел детонации; в — повышение температуры ТВС в камере сгорания в конце сжатия

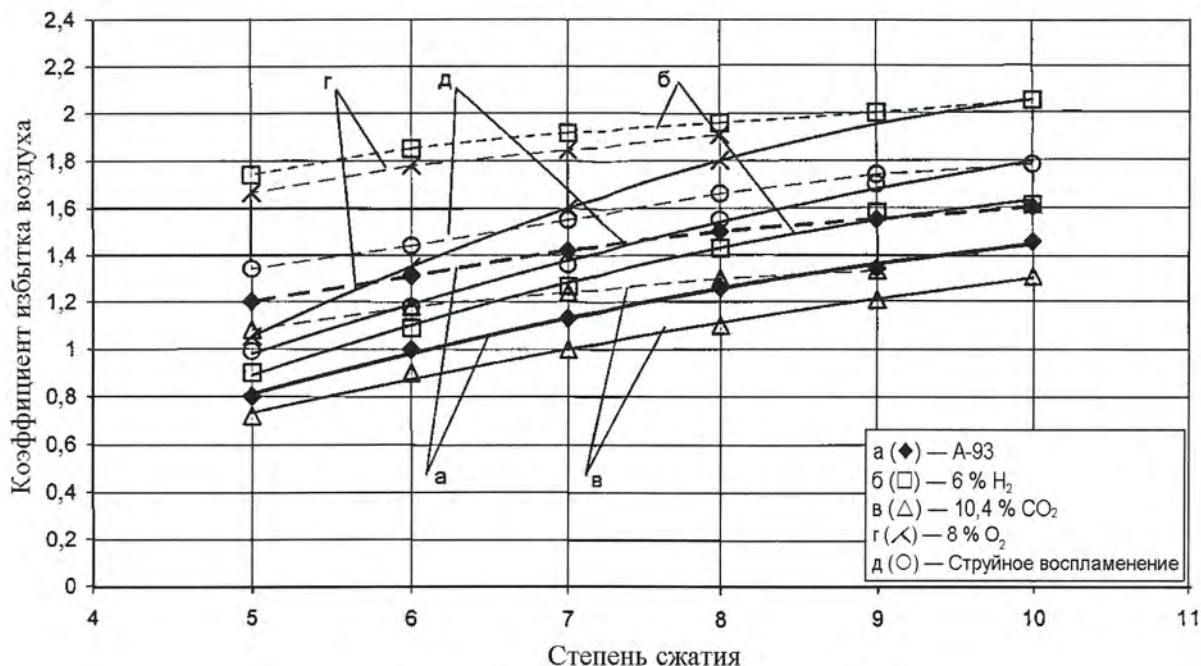


Рис. 3. Пределы воспламенения и детонации с различными добавками в ТВС: сплошная линия — предел детонации, пунктир — предел воспламенения

ей, выходящей из форкамеры и имеющей поперечное завихрение за счет смещения от оси выходного канала.

Результаты проведенных опытов с добавками (рис. 3) показали, что активные добавки (H_2 и O_2) и струйное зажигание смещают пределы воспламенения и детонации в сторону бедных смесей, но с различной интенсивностью. При добавках кислорода и струйном воспламенении предел детонации растет быстрее предела воспламенения и при степени сжатия $\epsilon > 9$ область стабильного сгорания отсутствует. Пассивная добавка (CO_2) снижает предел детонации, т. е. снижает чувствительность двигателя к детонации, что эквивалентно использованию бензина с более

высоким октановым числом.

Если сравнивать эти результаты с результатами исследований детонации в трубах, можно констатировать, что влияние активных и пассивных добавок в обоих случаях одинаково. Влияние завихрений смеси (воспламенение струей) также одинаково. Мелкое завихрение ускоряет возникновение детонации. По всей видимости, в ДВС на последних стадиях сгорания происходит сильное ускорение пламени и возникает настоящая детонация.

Знание зависимостей изменения пределов детонации от различных факторов дает возможность рационально организовывать работу ДВС. Например, добавка водорода может обеспечить работу ДВС на сверхбедных смесях и при этом

снизить расход топлива и токсичность отработанных газов. Однако увеличение пределов детонации при этом уменьшает максимально достижимую мощность. Инертная добавка CO_2 снижает предел детонации и позволяет двигателю работать на более дешевом бензине или увеличить степень сжатия двигателя и повысить КПД, т. е. уменьшить удельный расход топлива и получить экономию.

РУСАКОВ
Михаил Михайлович —
 бывший сотрудник
 РФЯЦ-ВНИИТФ, доктор техн.
 наук, профессор
 Тольяттинского государственного
 университета