

СНИЖЕНИЕ СКЛОННОСТИ К ДЕТОНАЦИИ В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ ПУТЕМ ОБЪЕМНОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ*

А.А. Шейпак, И.В. Кузнецов



**ШЕЙПАК
Анатолий
Александрович**

Профессор кафедры «Электротехника, теплотехника, гидравлика и энергетические машины» Московского государственного индустриального университета (МГИУ), доктор технических наук. Академик Российской академии транспорта, профессор и действительный член Международной академии наук Сан-Марино, действительный член Международной академии наук и искусств. Заместитель председателя Научно-методического совета по теплотехнике, член Научно-методического совета по механике и председатель Научно-методической комиссии по гидравлике Министерства образования и науки Российской Федерации. Специалист в области термодинамики и теплотехники, гидравлических и тепловых машин различного назначения. Автор более 200 работ, в том числе трех монографий, учебника, 40 изобретений.

Введение

Известно, что в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием детонация является крайне нежелательным явлением, вызывающим разрушение конструкции и значительно ухудшающим эффективность работы двигателя. Детонация представляет собой сложный химический процесс, который возникает и развивается в горючей смеси до подхода фронта пламени нормального сгорания и возникает в ДВС при работе



**КУЗНЕЦОВ
Игорь
Валентинович**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИС МГИУ. Специалист в области тепловых двигателей. Автор 60 научных трудов и 33 изобретений.

* Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ по проекту № 05-08-33614 и гранта Министерства образования и науки по проекту РНП.2.1.2.9437.

© А.А. Шейпак, И.В. Кузнецов, 2007

на смесях, близких по составу к стехиометрическому. В зонах возникновения детонации в горючей смеси протекают предпламенные реакции с образованием химически активных промежуточных продуктов сгорания (свободных радикалов, свободных атомов и др.), которые способствуют самовоспламенению смеси с самоускоряющимися цепными процессами. Сгорание приобретает взрывной характер с резким локальным повышением температуры и образованием ударной волны, скорость перемещения которой может достигать более 2000 м/с. Отражаясь от стенок камеры сгорания, ударная волна образует новые очаги воспламенения, приводящие к развитию диссоциации и образованию монооксида углерода, атомарного углерода и поглощению большого количества тепла. При этом резко возрастает отвод тепла в стенки камеры сгорания, увеличиваются механические, тепловые и ударные нагрузки на детали ДВС. Сгорание осуществляется неэффективно, что приводит к резкому снижению мощности, ухудшению экономических показателей, перегреву деталей ДВС и дымлению на выпуске.

Возникновению детонации в ДВС способствуют высокие степени сжатия (ϵ), большие нагрузки, перегрев стенок камеры сгорания, снижение частоты вращения коленчатого вала (n) и увеличенные угла опережения зажигания (θ).

Процесс сгорания в ДВС с искровым зажиганием

Процесс сгорания в ДВС с искровым зажиганием принято условно разделять на три фазы, которые определяют на индикаторной диаграмме по изменению давления p и температуры T в цилиндре от угла ϕ поворота коленчатого вала (рис.1). При положении в верхней мертвой точке (в.м.т.) поршень образует с головкой цилиндра объем камеры сгорания.

Первая фаза (I) – воспламенение смеси и формирование начального очага пламени. Длительностью первой фазы сгорания принято называть период от начала момента зажигания

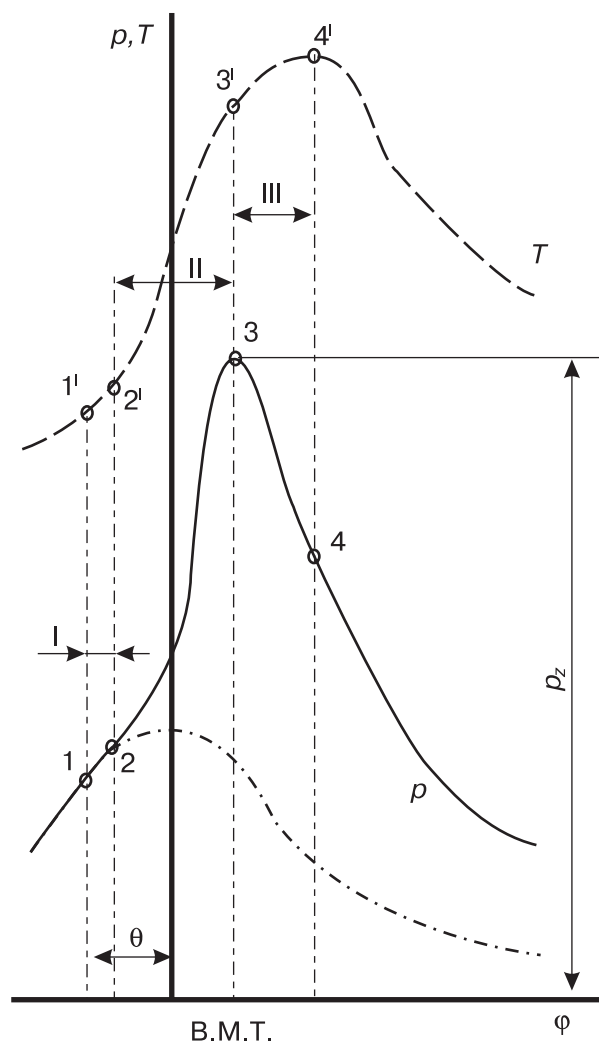


Рис. 1. Индикаторная диаграмма изменения давления и температуры в цилиндре ДВС:

— — — — — давление в цилиндре при отключенном зажигании;
— — — — — температура в цилиндре;
————— давление в цилиндре;

(точка 1) до отрыва линии давления при сгорании от линии давления при отключенном зажигании (точка 2).

Вторая фаза (II) – распространение пламени по всему объему камеры сгорания. Принято считать, что вторая фаза сгорания завершается к моменту достижения в цилиндре максимального давления сгорания p_z (точка 3).

Третья фаза (III) – догорание смеси. Третья фаза сгорания считается завершенной при достижении в цилиндре максимальной температуры (точка 4).

Значительную часть продолжительности первой фазы составляет период воспламенения смеси от электрической искры, т. е. время от момента искрового разряда до момента образования начального очага пламени. При отклонении значения коэффициента избытка воздуха α от значений 0,8–0,9 как в сторону уменьшения, так и увеличения, это время увеличивается и особенно сильно возрастает при обеднении горючей смеси.

Развитие первой фазы сгорания зависит от соотношения между скоростью тепловыделения от реакции и скоростью теплоотвода в окружающий свежий заряд и в стенки камеры сгорания. Для эффективного формирования пламени необходимо, чтобы скорость выделения тепла превышала скорость его передачи в свежую смесь и в стенки камеры сгорания. Соотношение между скоростями тепловыделения и теплоотвода зависит в основном от степени завихрения свежей смеси перед сгоранием. Чем оно больше, тем больше теплоотвод в стенки и труднее формируется фронт пламени. Переход от первой ко второй фазе сгорания сопровождается резким увеличением скорости сгорания (скорости распространения пламени), которая определяется в основном интенсивностью крупномасштабной турбулентности. При этом чем больше передача тепла от фронта пламени в свежую смесь, тем быстрее сгорание. После окончания второй фазы смесь догорает в небольших объемах при расширении до точки с максимальной температурой сгорания. Протекание второй и третьей фаз сгорания зависит в основном от интенсивности турбулентности в заряде.

Таким образом, процессу сгорания в ДВС с искровым зажиганием присуще противоречие между первой фазой, требующей снижения турбулентности, и второй фазой, требующей интенсивного завихрения смеси. В третьей фазе скорость сгорания зависит, главным образом, от химической (нормальной) скорости пламени. На сгорание в первой и в третьей фазах большое значение оказывает

состав смеси, обеднение которой увеличивает продолжительность сгорания.

На практике обеднение смеси ограничивается не только увеличением продолжительности сгорания, но и неустойчивой работой ДВС вследствие нарушения однообразия процесса сгорания в последовательных циклах. Причиной неустойчивости сгорания является, главным образом, неустойчивость первой фазы горения.

Одним из препятствий на пути эффективного сжигания бедных смесей является детонация. Исследования показали, что наименьшей склонностью к детонации обладают смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=0,5-0,7$, имеющие низкую температуру горения и характеризующиеся наличием охлаждающего эффекта, создаваемого при испарении топлива. Смесям с $\alpha=0,8-0,9$ свойственна высокая скорость сгорания, при которой давление и температура имеют максимальные значения. При работе ДВС на этих смесях детонация может возникнуть при увеличенных углах θ и высоких ϵ .

Наибольшей склонностью к детонации подвержены смеси с $\alpha=1,0-1,1$, что в основном обусловлено снижением скорости сгорания, которое проходит при высоких температурах, из-за чего часть смеси, сгорающая последней, проходит относительно длительный период химической подготовки. Дальнейшее обеднение смеси сопровождается значительным снижением давления и температуры, при которых детонация затруднена. Обычно детонация возникает в конце второй фазы процесса сгорания. В отличие от детонации, нарушение нормального сгорания может быть и при калильном зажигании, которое происходит в начале второй фазы сгорания.

Противоречивые требования, предъявляемые к первой и последующим фазам сгорания в ДВС с искровым зажиганием, можно устранить при объемном воспламенении смеси в камере сгорания. При этом снижается склонность к детонации, поскольку воспламенение и сгорание происходит одновременно во всем объеме камеры сгорания.

Исследования объемного воспламенения смеси в камере сгорания

Фундаментальные исследования по изучению процесса сгорания в ДВС и в других тепловых двигателях были проведены в Институте химической физики (ИХФ) АН СССР. В основу этих исследований были положены теоретические разработки о цепных разветвленных химических реакциях и о цепочно-тепловом механизме воспламенения и горения, предложенных академиком Н.Н. Семеновым. Исследования, проведенные В.Г. Воронковым и М.А. Ривиным в 1935 г., показали возможность значительного увеличения скорости сгорания углеводородного топлива в камере сгорания, разделенной на две части перемычкой с узким каналом. Одна часть камеры сгорания имела открытый конец, а в другой части была расположена свеча зажигания. Обе части камеры сгорания заполнялись стехиометрической смесью пропана с воздухом. После искрового зажигания смеси в закрытой части камеры сгорания распространялся фронт пламени, и через короткий промежуток времени продукты сгорания выбрасывались через канал в перемычке в открытую часть камеры, вызывая в ней взрывное горение. Авторы обнаружили сильное влияние несгоревшего газа, вытекающего из первой камеры, на скорость сгорания в открытой камере, а также незначительное влияние его температуры на процесс горения. Исследования показали, что время задержки взрывного горения от момента впрыскивания горящего газа и величина пика давления, вызванного взрывным горением, меняются в зависимости от диаметра канала. Результаты этих очень важных научных исследований были подтверждены в 1955 г. более обстоятельными исследованиями, проведенными в ИХФ Л.А. Гусаком, в бомбах постоянного объема при условиях сгорания, аналогичных сгоранию в камере ДВС. В результате этих исследований была показана высокая химическая активность продуктов неполного сгорания богатой топливоздушной

смеси с коэффициентом избытка воздуха $\alpha=0,5-0,7$ [1, 2]. Поступая в топливоздушную смесь, активные продукты инициируют быстрые разветвленные цепные химические реакции, уменьшая эффективную энергию активации и сокращая период задержки воспламенения. Процесс сгорания начинает развиваться лавинообразно с большой скоростью, высокой полнотой и исключительной устойчивостью.

Экспериментальные зависимости, иллюстрирующие описанное выше явление, показывают изменение содержания активных продуктов сгорания (CH , CH_3 , H и др.) в зависимости от коэффициента избытка воздуха α в горючей смеси и времени τ от начала их образования (рис. 2).

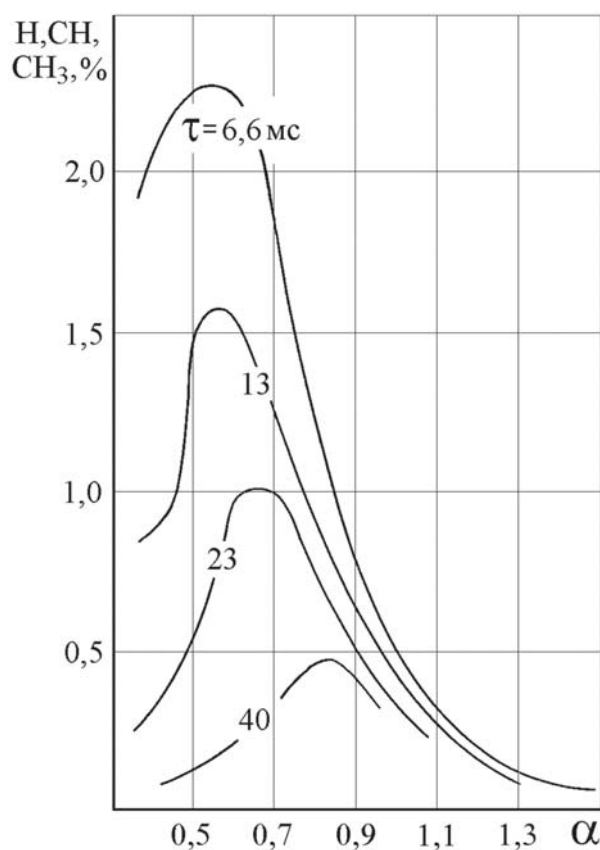


Рис. 2. Изменение содержания активных продуктов сгорания в зависимости от α при различных τ

Таким образом, было установлено, что наибольшему содержанию активных продуктов соответствует сгорание смесей с $\alpha = 0,5 - 0,6$. Кроме того, очень важно, чтобы активные час-

тицы продуктов сгорания достаточно быстро были введены в свежую топливовоздушную смесь.

Надо иметь в виду, что сама по себе высокая химическая активность продуктов сгорания не является решающим средством улучшения процесса сгорания, поскольку во фронте пламени уже содержится значительная концентрация активных частиц. Тем не менее, процесс распространения фронта пламени развивается медленно, недостаточно полно и устойчиво, в особенности при обеднении смеси. Это объясняется слабой диффузией и малой скоростью движения активных частиц из фронта пламени в свежую смесь. Таким образом, активные частицы не могут быстро, одновременно и равномерно распределиться по всему объему горючей смеси в камере сгорания, поэтому одновременное воспламенение и объемное сгорание невозможно. Смесь воспламеняется и сгорает в отдельных очагах, от которых медленно и неустойчиво распространяется фронт пламени. Причем увеличение скорости фронта пламени может вызвать детонационное сгорание.

Улучшение процесса сгорания с помощью введения химически активных частиц может быть получено организацией в свежей смеси множества очагов воспламенения малого размера. Источником получения активных частиц может быть форкамера малого объема, которая соединена с основной камерой сгорания одним или несколькими сопловыми каналами относительно малого сечения. К моменту зажигания в форкамере должна быть образована смесь с $\alpha_{\phi}=0,5-0,6$, продукты сгорания которой обладают наибольшей химической активностью.

Исследования показали, что при горении топливовоздушной смеси в форкамере с объемом 2–3 % от объема основной камеры сгорания и с малым сечением соплового канала (3–4 мм² на 1 см³ объема форкамеры) между форкамерой и основной камерой сгорания образуется заметный перепад давления. Из форкамеры вытекает не непрерывно распростра-

няющийся факел пламени, а продукты сгорания, которые перемешиваются в основной камере сгорания со свежей горючей смесью и воспламеняют ее через короткий промежуток времени. При этом процесс сгорания проходит с исключительной полнотой и устойчивостью.

Примером ДВС с объемным воспламенением бедной смеси в камере сгорания является ДВС ЗМЗ-4022.10 с форкамерным зажиганием (рис. 3).

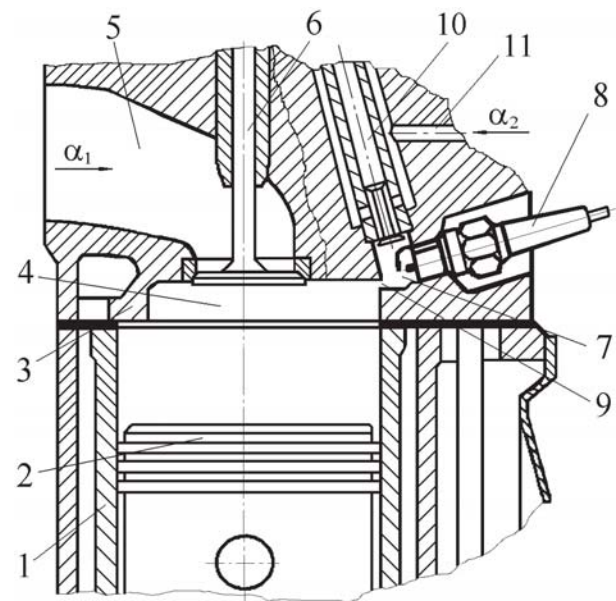


Рис. 3. Схема форкамерного ДВС

ДВС содержит цилиндр 1, в котором находится поршень 2, который в положении в. м. т. образует с головкой 3 цилиндра 1 камеру сгорания 4. В головке 3 расположен основной впускной патрубок 5, соединенный с объемом цилиндра 1 через основной впускной клапан 6. В головке 3 также расположена форкамера 7, в которой размещена свеча зажигания 8. Форкамера 7 соединена с камерой сгорания 4 сопловым каналом 9, а через вспомогательный впускной клапан 10 – с каналом 11 для подвода богатой смеси. При работе ДВС через основной впускной клапан 6 в цилиндр 1 поступает бедная смесь с коэффициентом избытка воздуха α_1 , а в форкамеру 7 – богатая смесь с коэффициентом избытка воздуха α_2 , которая поступает из канала 11 через вспомогательный

впускной клапан 10. Часть богатой смеси через сопловой канал 9 поступает в цилиндр 1, в котором она частично разбавляется бедной смесью и образует смесь промежуточного состава с коэффициентом избытка воздуха α' . При сжатии эта смесь будет вытесняться в форкамеру 7, в которой, соединяясь с богатой смесью, образует к моменту зажигания легко воспламеняемую форкамерную смесь с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{\text{ф}}$. Свечой 8 зажигается смесь с $\alpha_{\text{ф}}$, и факелом продуктов ее сгорания через сопловой канал 9 осуществляется воспламенение бедной смеси в камере сгорания 4. Очень важно, чтобы в форкамере 7 к моменту зажигания была образована относительно богатая смесь с $\alpha_{\text{ф}}=0,5-0,6$, горение которой сопровождается образованием продуктов неполного сгорания (см. рис. 2), обладающих высокой химической активностью. В связи с тем, что форкамера 7 отделена от основной камеры сгорания 4 сопловым каналом 9 с относительно малым проходным сечением, первая фаза горения происходит в форкамере 7 исключительно стабильно при малом теплотводе и низкой турбулизации смеси. Это создает благоприятные условия для образования начального очага воспламенения и формирования пламени. Факел продуктов сгорания через сопловой канал 9 форкамеры 7 поступает в основную камеру сгорания 4 с большой скоростью, значительно увеличивает турбулентность в камере сгорания 4, способствует увеличению скорости и полноты сгорания, что сокращает продолжительность второй фазы сгорания. Таким образом, в самом принципе факельного зажигания нет противоречия между первой и второй фазами сгорания, присущего обычному искровому зажиганию.

Проведенные авторами экспериментальные исследования показали, что форкамерное воспламенение заряда способствует полному сгоранию смесей даже при очень глубоком обеднении ($\alpha_1 \geq 2,0$). Факельная система обеспечивает наименьшую продолжительность первой фазы горения, ускоряет процесс горения во второй фазе, и, что особенно важно, сокра-

щает продолжительность третьей фазы, т. е. догорание в процессе расширения. В результате этого тепловая напряженность деталей двигателя снижается, и затрудняются предпламенные реакции в локальных объемах основной камеры сгорания 4, что уменьшает возможность возникновения детонации. Таким образом, факельная система зажигания является не только средством, обеспечивающим быстрое и стабильное сгорание бедных смесей, но и мощным средством подавления детонации.

Детонационные характеристики, полученные при сравнительных исследованиях форкамерного ДВС и обычного ДВС с искровым зажиганием при работе на стехиометрических смесях ($\alpha = 1,0$) на топливах с различным октановым числом (ОЧ), указывают на то, что антидетонационный эффект при использовании форкамерной системы зажигания составляет 8–10 пунктов октановой шкалы (рис. 4). Это дает возможность поднять степень сжатия форкамерного ДВС на единицу по сравнению с ДВС с обычным искровым зажиганием при использовании одного и того же топлива [3].

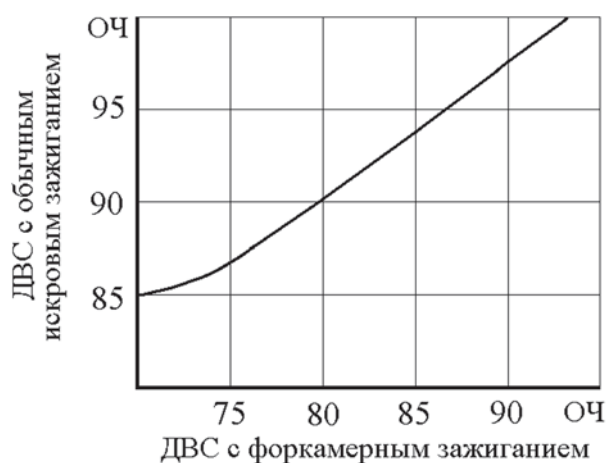


Рис. 4. Зависимость между октановыми числами топлива для ДВС с форкамерным зажиганием и ДВС с обычным искровым зажиганием

Известно, что угол опережения зажигания θ , на котором работает ДВС, оказывает значительное влияние на возникновение детонации: его увеличение приводит к тому, что смесь в камере сгорания успевает перегреться и под-

вергается интенсивному сжатию до подхода фронта пламени. Это способствует быстрому развитию предпламенных реакций в отдаленных локальных зонах камеры сгорания, в которых возникает самовоспламенение и, как следствие, появление детонации. При объемном воспламенении в камере сгорания, которое характерно для форкамерного ДВС, горение охватывает весь объем камеры, что препятствует появлению детонации в отдельных ее зонах.

Исследования влияния угла θ на крутящий момент (M_e) коленчатого вала ДВС и возможность появления детонации проводились при работе серийного четырехцилиндрового форкамерного ДВС ЗМЗ-4022.10 с $\varepsilon = 8,0$ на бензине А-92 согласно ТУ 38.001.165-87.

Регулировочные характеристики ДВС по углу θ на режиме $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 5) и на режиме $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 6) были получены при различных разрежениях $\Delta p_{вп}$ во впускной трубе при работе ДВС на стехиометрических смесях ($\alpha \approx 1,0$).

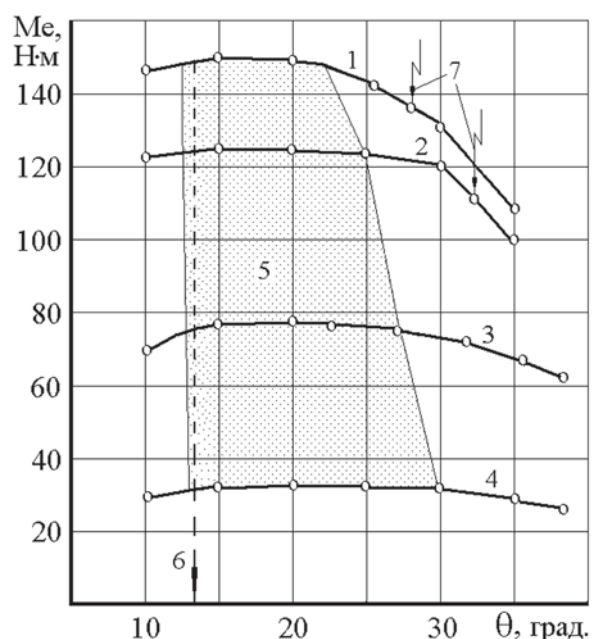


Рис. 5. Регулировочные характеристики по углу θ при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$:

- 1 — при работе по внешней скоростной характеристике; 2 — $\Delta p_{вп} = 13 \text{ КПа}$; 3 — $\Delta p_{вп} = 27 \text{ КПа}$; 4 — $\Delta p_{вп} = 53 \text{ КПа}$; 5 — область оптимальных углов θ ; 6 — серийная регулировка угла θ ; 7 — начало появления признаков детонации

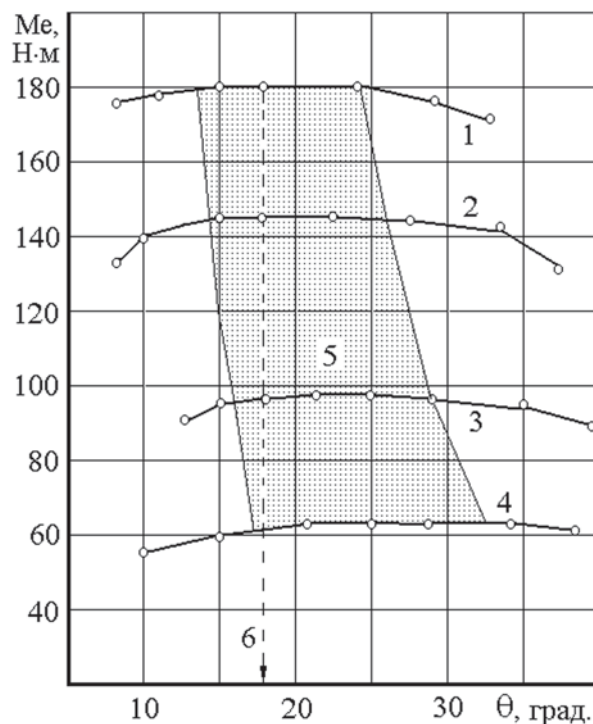


Рис. 6. Регулировочные характеристики по углу θ при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$:

- 1 — при работе по внешней скоростной характеристике; 2 — $\Delta p_{вп} = 13 \text{ КПа}$; 3 — $\Delta p_{вп} = 27 \text{ КПа}$; 4 — $\Delta p_{вп} = 40 \text{ КПа}$; 5 — область оптимальных углов θ ; 6 — серийная регулировка угла θ

Характеристики показывают, что влияние угла θ на M_e форкамерного ДВС в определенных пределах незначительно. Признаки детонации, возникающие при работе ДВС на низких значениях n , больших нагрузках и относительно больших углах θ , объясняются тем, что на этих режимах работы в форкамерах к моменту зажигания образуются относительно бедные смеси с α_{ϕ} , состав которых не оптимален для образования эффективного очага пламени при первой фазе сгорания и, соответственно, для эффективного воспламенения и горения во второй и третьей фазах сгорания, которые происходят в основной камере сгорания. Обеднение смеси с α_{ϕ} происходит потому, что при работе ДВС с малыми $\Delta p_{вп}$ значительно снижается расход воздуха, поступающего в форкамеры, и дозирование топлива форкамерной секцией карбюратора К-156 четырехцилиндрового ДВС затрудняется [4]. При увеличении ско-

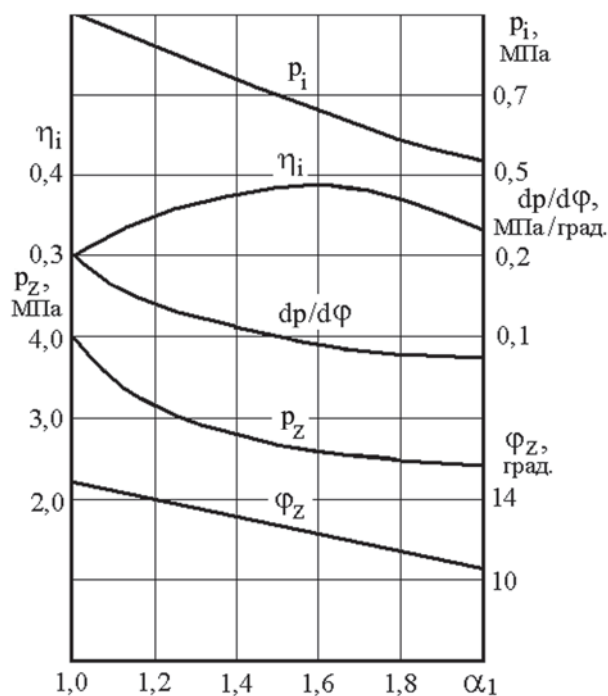


Рис. 7. Изменение показателей рабочего процесса от состава смеси с α_1 , поступающей в цилиндры

ростного режима работы ДВС расход воздуха через форкамеры на высоких нагрузках увеличивается, улучшается дозирование топлива из форкамерной секции карбюратора и признаков детонации не наблюдается (рис. 6). При работе форкамерного ДВС на малых и средних нагрузках при изменении угла θ в оптимальном, с точки зрения получения наилучших мощностных и экономических показателей, диапазоне признаков детонации не было обнаружено.

Показатели процесса сгорания в форкамерном ДВС с $\epsilon = 7,0$ на режиме $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, коэффициенте наполнения $\eta_v = 0,78$ и $\theta = 14^\circ$ (рис. 7) указывают на быстрое и эффективное сгорание в цилиндре очень бедных рабочих смесей с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_1 \geq 1,8$, поступающих в цилиндры. Показатели были получены при обработке индикаторных диаграмм (рис. 8).

Максимальное давление сгорания в форкамере $p_{\phi z} \approx 1,4 \text{ МПа}$ и величина угла $\phi_{\phi z} = 10-12^\circ$, при котором оно получено, были практически постоянными во всем диапазоне изменения смеси с α_1 . Здесь необходимо отметить, что по

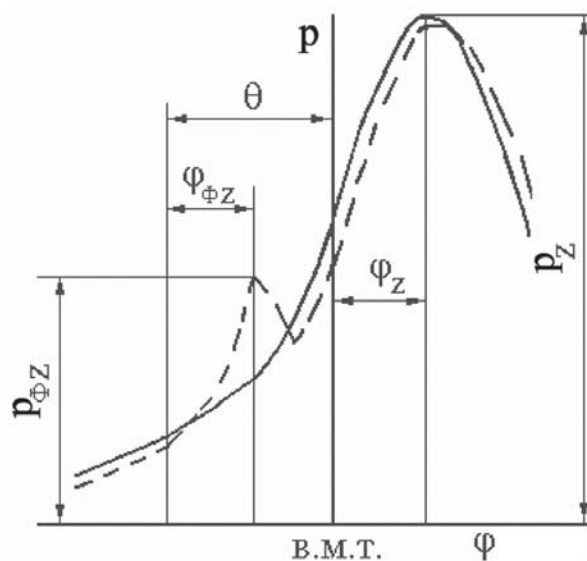


Рис. 8. Индикаторные диаграммы форкамерного ДВС:

— - изменение давления в цилиндре;
- - - - изменение давления в форкамере

отношению к давлению в цилиндре, давление в форкамере изменяется с некоторым запаздыванием по углу ϕ , которое вызвано дросселирующим действием соплового канала (рис. 8). Скорость нарастания давления $dp/d\phi$ в форкамерном ДВС не намного больше, чем в обычном ДВС с искровым зажиганием, но значительно меньше, чем у дизеля. Наиболее эффективному сгоранию, исходя из среднего индикаторного давления $p_i = 0,6-0,7$ и индикаторного коэффициента полезного действия $\eta_i \approx 0,39$, соответствует сгорание смеси с $\alpha_1 = 1,55-1,65$ при этом в форкамеры поступали смеси с $\alpha_2 = 0,23-0,24$.

Сравнительные скорости распространения пламени u_c и оптимальные углы θ в форкамерном ДВС ($\epsilon = 7,0$) и обычном искровом ДВС ($\epsilon = 6,7$) при работе на режиме $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ с различными α_1 в смеси, поступающей в цилиндры, показывают, что процесс сгорания в форкамерном ДВС происходит в 2,0-2,5 раза быстрее, чем в обычном ДВС с искровым зажиганием (рис. 9).

Скорость сгорания u_c определялась по времени τ , затраченному от начала зажигания до достижения максимального давления p_z на индикаторной диаграмме. Путем прохождения

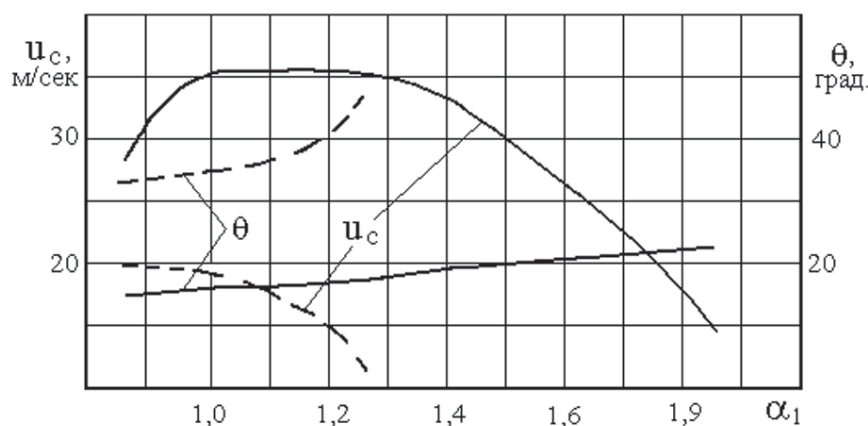


Рис. 9. Изменение скорости сгорания u_c и оптимального угла опережения зажигания θ от состава смеси с α_1 : — — — — — форкамерный ДВС; - - - - - искровой ДВС

пламени являлось расстояние от свечи зажигания до датчика давления ($L = 60$ мм – обычное зажигание, $L_1 = 70$ мм – форкамерное зажигание), который в сравниваемых ДВС был расположен в стенке камеры сгорания четвертого цилиндра около выпускного клапана (рис.10). Время сгорания рассчитывалось по формуле: $\tau = (\theta + \varphi_z)/6\pi$, сек.

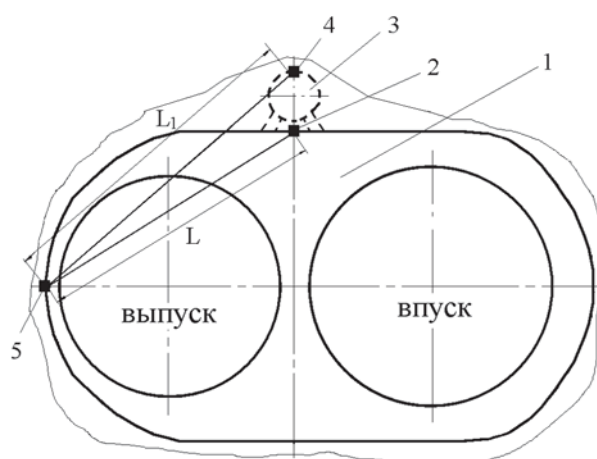


Рис. 10. Схема камеры сгорания в форкамерном ДВС:
1 – камера сгорания; 2, 4 – точки расположения свечи зажигания; 3 – форкамера;
5 – точка расположения датчика давления

Высокая скорость и полнота сгорания в форкамерном ДВС при малых углах θ способствует снижению детонации, улучшению топливной экономичности на 10 %, а также снижению в отработанных газах содержания оксида углерода (СО) в 5,5 раза, углеводородов (СН) на 38 % и оксидов азота (NO_x) в 2,8 раза (см. таблицу).

Таблица

Результаты сравнительных испытаний различных моделей ДВС
автомобиля «Волга» по ездовому циклу ЕЭК ООН

Модель ДВС	Выбросы вредных веществ, г/испытание			Расход топлива, л/100 км
	СО	СН	NO_x	
Форкамерный ДВС ЗМЗ-4022.10	9,3	7,2	3,3	13,8
Искровой ДВС ЗМЗ-4021.10	52	11,7	9,2	15,3

Разработка ДВС с детонационным сгоранием в форкамере

Известный советский физик Я.Б. Зельдович еще в 1940 г. высказал предположение о возможности создания эффективных тепловых двигателей, использующих явление детонации. Эта идея в последние годы развивается для создания нового типа двигателя – пульсирующего детонационного двигателя (ПДД), работа

которого основана на периодической детонации смеси горючего и окислителя в детонационной камере. В Институте высоких температур РАН разработана и успешно действует детонационная камера (ДК) сгорания, которая может длительное время работать в пульсирующем режиме как на газообразном топливе, так и на жидком с частотой до 90 Гц.

Каждый цикл ПДД представляет собой совокупность определенных процессов, происходящих в ДК (рис. 11).

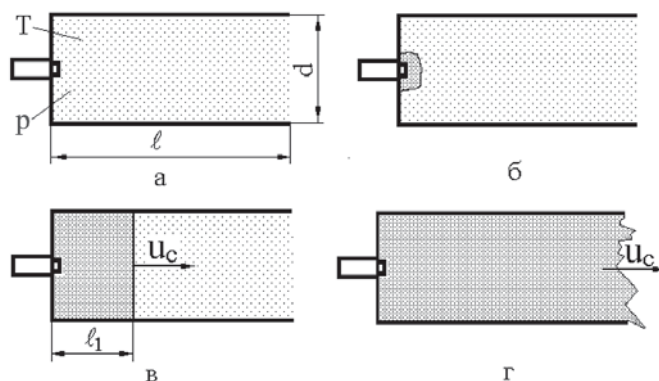


Рис. 11. Принципиальная схема детонационной камеры сгорания:

а – заполнение ДК рабочей смесью при давлении p и температуре T ;

б – зажигание рабочей смеси и формирование фронта пламени; в – возникновение фронта пламени с детонационным сгоранием, скорость которого u_c ; г – развитие детонационного сгорания во всем объеме рабочей смеси и истечение продуктов сгорания через выходное отверстие

После осуществления сгорания происходит очистка ДК от продуктов сгорания, заполнение ее горючей смесью и цикл повторяется.

Очень важным параметром для развития детонационного сгорания в ДК является величина $\mu = d/\ell$ (d – диаметр ДК; ℓ – ее длина), которая должна быть равна или более 0,02 при атмосферном давлении p и температуре T горючей смеси в детонационной трубе. При увеличении p и T детонация возникает раньше, величины ℓ и ℓ_1 уменьшаются и μ увеличивается.

Как уже отмечалось, скорость u_c распространения фронта пламени при детонационном сгорании очень высока и достигает более 2000 м/с, что более, чем в 100 раз превышает скорость сгорания в обычном ДВС и в 50 раз – скорость сгорания в форкамерном ДВС. Однако, как указывалось ранее, детонационное сгорание в камерах сгорания ДВС приводит к негативным

последствиям. Тем не менее, возможно организовать детонационное сгорание в форкамере форкамерного ДВС (рис. 12).

ДВС содержит цилиндр 1, в котором расположен поршень 2, совершающий возвратно-поступательное движение, головку 3 цилиндра 1, в которой расположены впускной патрубок 4, основная камера сгорания 5 и сообщенная с ней через выходное отверстие 6 форкамеры 7 со свечой зажигания 8. Впускной патрубок 4 соединен с объемом цилиндра 1 через основной впускной клапан 9, снабжен форсункой 10 и предназначен для подвода в цилиндр 1 топливовоздушной смеси в зависимости от режима работы ДВС. Магистраль 11 изготовлена в головке 3 цилиндра 1 и в трубопроводе 12 для питания форкамеры 7 богатой топливовоздушной смесью. Для этого магистраль 11 подсоединена к форкамере 7 через вспомогательный

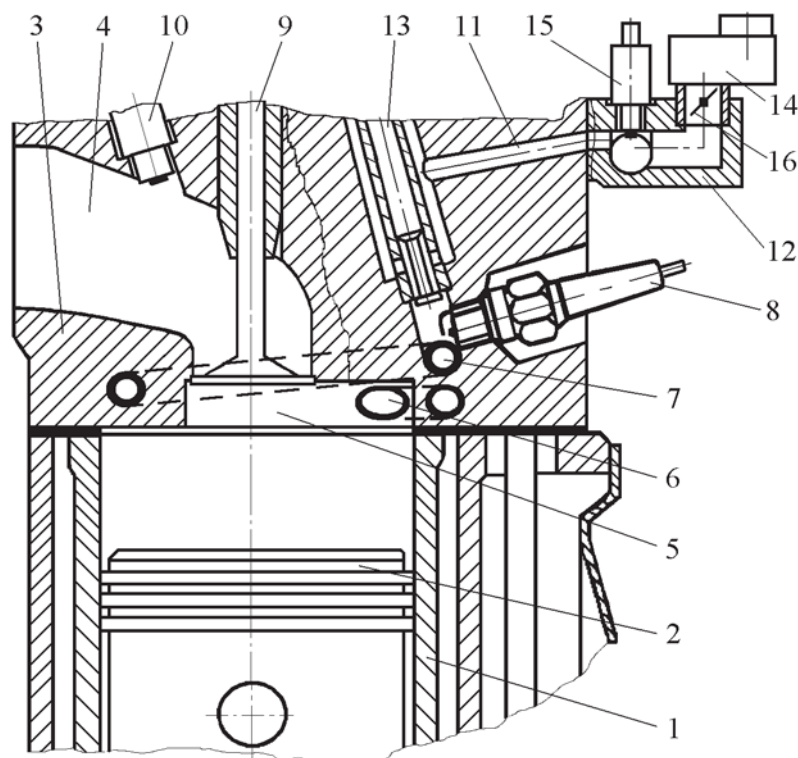


Рис. 12. ДВС с детонационным сгоранием в форкамере

впускной клапан 13, компрессор 14, укрепленный на трубопроводе 12, в котором установлены форсунка 15 для впрыскивания топлива и дроссельная заслонка 16 для дозирования сжатого воздуха в зависимости от режима работы ДВС. Компрессор 14 может иметь привод от аккумулятора, поскольку расходы воздуха через форкамеру 7 относительно малы и не требуют большой затраты энергии.

Форкамера 7 выполнена в виде детонационной трубы с диаметром d и длиной ℓ , которая залита при изготовлении в головку 3 и расположена вокруг основной камеры сгорания 5, причем выходное отверстие 6 форкамеры 7 направлено тангенциально к стенке основной камеры сгорания 5. Отношение объема форкамеры 7 к объему основной камеры сгорания 5 должно находиться в диапазоне 0,07–0,1, а отношение d/ℓ – в диапазоне 0,02–0,04.

При работе ДВС во впускной патрубок 4 поступает воздух, а через форсунку 10 впрыскивается топливо на горячую тарелку основного впускного клапана 9, посредством которого

бедная топливовоздушная смесь поступает в объем цилиндра 1. В то же время из магистрали 11 через открытый вспомогательный впускной клапан 13 в форкамеру 7 поступает богатая топливовоздушная смесь из трубопровода 12, в который компрессором 14 нагнетается воздух, а через форсунку 15 впрыскивается топливо в зависимости от режима работы ДВС. Сжатие воздуха в компрессоре 14 и управление его расхода заслонкой 16 необходимо для очистки форкамеры 7 от остаточных газов, особенно при работе ДВС на режимах с малым разрежением в цилиндре 1, которые характерны для больших нагрузок. Компрессор 14 особенно необходим при использовании наддува цилиндра 1. При работе ДВС на режимах холостого хода и малых нагрузках заслонка 16 уменьшает расход воздуха через форкамеру 7, поскольку разрежение в цилиндре 1 достаточно для заполнения форкамеры 7 свежей смесью. После очистки форкамеры 7 от остаточных газов предыдущего цикла свежая смесь частично поступает в цилиндр 1, где, смешиваясь с бедной смесью,

образует смесь промежуточного состава около выходного отверстия 6 форкамеры 7.

При сжатии в цилиндре 1 смесь промежуточного состава будет вытесняться в форкамеру 7, где, смешиваясь с богатой смесью, образует смесь стехиометрического состава к моменту зажигания в форкамере 7. Свечой 8 зажигают смесь стехиометрического состава, и в форкамере 7 возникают очаги детонации, образующие фронт пламени, выходящий из отверстия 6 со скоростью более 2000 м/с в основную камеру сгорания 5 и быстро охватывающий весь ее объем. Поскольку в основной камере сгорания 5 находится чистая смесь с очень бедным составом, детонация в ней затухает при сохранении высокой скорости сгорания. Таким образом, можно значительно увеличить скорость сгорания в ДВС и улучшить топливную экономичность при снижении образования вредных веществ в процессе горения.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования ДВС с объемным сгоранием в цилиндрах позволяют сделать следующие выводы.

1. Объемное сгорание устраняет основные противоречия между первой и последующими фазами процесса сгорания в ДВС с искровым зажиганием, увеличивает скорость сгорания в 2,0 – 2,5 раза, снижает склонность к появлению детонации на 8–10 пунктов октановой шкалы и дает возможность поднять на единицу сте-

пень сжатия при использовании одного и того же топлива.

2. Установлено слабое влияние угла опережения зажигания на мощность и топливную экономичность форкамерного ДВС с объемным воспламенением, что позволяет упростить систему зажигания и снизить в отработавших газах содержание оксида углерода, углеводородов и оксидов азота.

3. Разработана конструкция ДВС, в котором может быть использован принцип детонационного сгорания в форкамере.

Список литературы

1. Гуссак Л.А. Новый принцип воспламенения и горения в двигателях // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1965. № 12. С. 3–5.
2. Диплом № 142 (СССР). Явление высокой химической активности продуктов неполного сгорания богатой горючей смеси/ Л.А. Гуссак (СССР) // Открытия. Изобретения. 1974. № 38.
3. Исследование факельной системы зажигания применительно к авиационным двигателям / Под ред. С.В. Румянцева. – М.: Оборонгиз. 1958. С. 34–38.
4. Кузнецов И.В. Смесеобразование в ДВС с продуваемой форкамерой // Автомобильная промышленность. 2005. № 5. С. 12–15.
5. Кузнецов И.В. Экологические характеристики автомобиля «Волга» // Экология и промышленность России. 2005. Май. С. 25–27.