

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ВТОРИЧНОГО СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И СГОРАНИЕ ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЕ

УДК 621.43.019.2

А. А. Бузуков, Б. П. Тимошенко

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск

Подтверждена возможность улучшения процесса воспламенения топливовоздушной смеси при оптимальном профилировании поверхности стенки, на которую падает струя. Показано также, что снижение предельной температуры и периода воспламенения приводит, в свою очередь, к повышению полноты сгорания топлива, благодаря чему обеспечивается более быстрый выход двигателя на устойчивый режим работы при пуске. В условиях, соответствующих номинальному режиму работы дизеля, эффект вторичного смесеобразования перестает оказывать активное влияние на процессы воспламенения и сгорания.

В работе [1] показано, что при правильном выборе формы стенки камеры сгорания удастся улучшить процесс воспламенения топливовоздушной смеси в условиях, соответствующих пусковым режимам работы дизельных двигателей. В основе этого явления лежит «эффект вторичного смесеобразования» [2], который, как показали эксперименты, наиболее благоприятным образом реализуется в том случае, когда взаимодействие струи смеси со стенкой при первичном касании носит скользящий характер, а ее вторичный выброс осуществляется путем резкого разворота потока в выемке, спрофилированной специальным образом. Так, например, в [1] показано, что установка на пути струи топливовоздушной смеси пластины, форма которой удовлетворяет указанным условиям, привела к снижению предельной температуры самовоспламенения T_e с 630 до 600 К (дизельное топливо ДЛ), а периода его задержки τ_i — на 30 %.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальной проверки изложенных в [1, 2] рекомендаций по улучшению воспламенения смеси и ее сгорания в условиях, когда топливо впрыскивается в полость, геометрические очертания которой соответствуют форме камеры сгорания реального дизеля. Кроме того, рассмотрены вопросы, связанные с влиянием эффекта вторичного смесеобразования на динамику тепловыделения при впрыске в среду с повышенной температурой, которая соответствует номинальному режиму работы двигателя и когда самовоспламенение уже заведомо обеспечено.

Эксперименты проводили на безмоторной установке по методике, описанной в [1]. В первой серии опытов (вариант А) для получения опорных данных топливо впрыскивалось в свободное пространство 2 (см. рис. 1) замкнутого рабочего объема цилиндрической формы с диаметром 150 мм и расстоянием между торцевыми стенками 65 мм ($V_1 = 1470 \text{ см}^3$). Для изучения влияния вторичного смесеобразования на процессы воспламенения и сгорания в объеме 2 устанавливалась открытая наружу тонкостенная коробчатая конструкция 5, имитирующая сектор плоской камеры сгорания в поршне дизеля

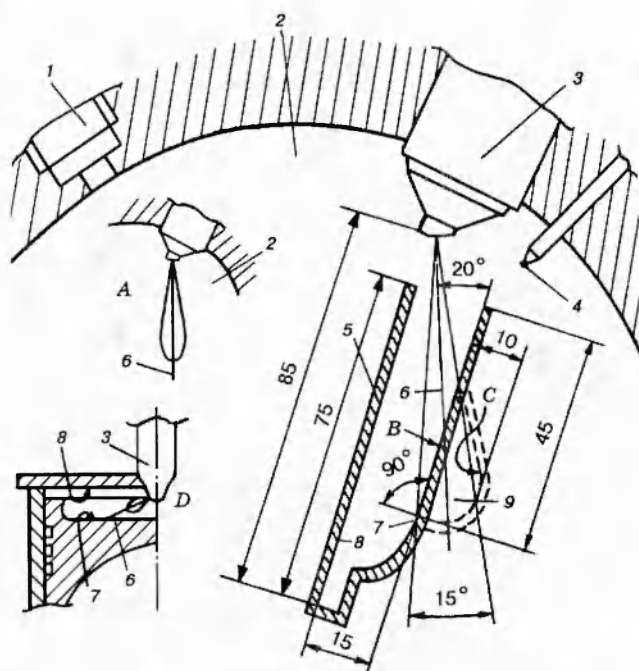


Рис. 1. Схема проведения экспериментов:

1 — пьезоэлектрический датчик давления, 2 — замкнутый рабочий объем установки, 3 — форсунка, 4 — термopара, 5 — незамкнутая коробчатая конструкция, имитирующая камеру сгорания реального дизеля, 6 — ось струи топливовоздушной смеси, 7 — «днище поршня», 8 — «крышка цилиндра», 9 — выемка; A, B, C — различные варианты условий взаимодействия струи с поверхностью стенки камеры сгорания, D — форма камеры сгорания реального двигателя

в ее радиальном сечении, совпадающем с осью одного из распыливающих отверстий. Во второй серии опытов (вариант B) струя топливовоздушной смеси (6 — ее ось) падала на плоский участок поверхности 7 «днища поршня». В третьем случае (вариант C) пластина 7 изгибалась таким образом, что на ее поверхности образовывалась выемка 9. Струя попадала в выемку, из которой поток смеси частично отбрасывался обратно в свободное пространство «камеры сгорания». Форма и размеры (ясны из рисунка) выемки выбраны такими, чтобы она перекрывала сечение струи, которая в рассматриваемых условиях имеет корневой угол раскрытия $\sim 15^\circ$ [3]. На рис. 1 схематически изображена камера сгорания реального дизеля (вариант D).

Для работы использовалось дизельное топливо ДЛ, разовая доза при единичном впрыске 90 ± 3 мг. Зависимость давления p_f в топливной системе от времени представлена на рис. 2, а, где τ_f — длительность впрыска. Все опыты проводили при исходном статическом давлении в объеме $p_V = 0,9$ МПа и в диапазоне начальных температур $T_V = 550 \div 900$ К. Следует отметить, что в указанных условиях коэффициент избытка воздуха α , определяемый по отношению ко всему рабочему объему, в зависимости от температуры T_V меняется от 3,5 до 6,5. Именно благодаря высокому значению α можно использовать апробированную ранее методику расчета давления сгорания смеси (см. ниже). Но по отношению к объему вставки ($V_2 = 75$ см³) $\alpha = 0,2 \div 0,35$. Эти значения коэффициента близки к наблюдаемым при пуске дизеля.

На рис. 2, б приведены осциллограммы прироста давления Δp_V в объеме при сгорании топлива в различных условиях экспериментов. По таким осциллограммам в опытах определяли период задержки воспламенения τ_i , время активного тепловыделения τ_V , прирост давления Δp_V в объеме.

Исходное давление в объеме поддерживалось с точностью до 3%, температура — 1%, а погрешность в измерении временных интервалов оценена в 5%. Основной разброс результатов, возникающий при определении τ_i , вызван нестабильностью термoхимических процессов, идущих в этом интервале времени, и достигает 15% при средних и высоких

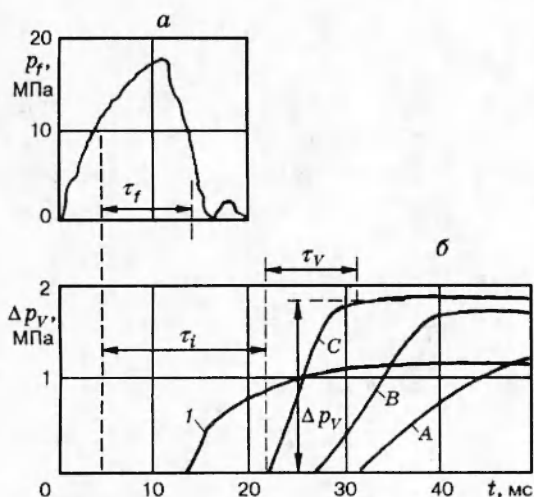


Рис. 2. Эпюры давления в топливной системе (а) и в рабочем объеме (б), записанные синхронно пьезоэлектрическими датчиками:

исходная температура воздуха T_V , К: А, В, С — 700, 1 — 900

температурах среды и 25% — при низких. Поэтому в целях повышения надежности получаемых результатов период задержки воспламенения τ_i измерялся через каждые 5 К (цена деления шкалы потенциометра) и как минимум дважды при изменении температуры снизу вверх и обратно при постоянном давлении в среде. Затем полученные значения τ_i усреднялись в диапазоне $T = T_V - 15 \dots T_V + 15$ К. Оценка показывает, что благодаря такой процедуре относительная погрешность определения τ_i при средних и высоких температурах не превышала 7%, но возрастала до 12% при приближении к предельно низким температурам на границе самовоспламенения. Отметим, что интервал времени между впрысками топлива составлял не менее 40 с, что позволяло осуществлять продувку объема и гарантировать выравнивание температуры воздуха в нем и температуры корпуса вставки.

На рис. 3 приведены зависимости $\bar{\tau}_i$ от температуры среды, полученные для указанных выше трех вариантов взаимодействия струи топливоздушнoй смеси со стенкой камеры сгорания. При построении графика использована обычно применяемая [4–6] для описания этих зависимостей сетка координат: логарифмическая для $\bar{\tau}_i$ и пропорциональная $1/T_V$ для температуры. Но здесь безразмерное значение $\bar{\tau}_i$, в отличие от общепринятого размерного, определено как отношение физического времени задержки воспламенения τ_i к длительности впрыска $\tau_f = 9,5$ мс. Такое представление позволяет связывать особенности самовоспламенения смеси с динамикой смесеобразования и одновременно с энергетикой предпламенных процессов [4].

На графиках для каждой серии опытов темными кружками отмечены предельные температуры T_e , ниже которых никакие эффекты, свидетельствующие о начале тепловыделения (подъем давления и свечение в объеме), не наблюдаются, а также соответствующие этим температурам предельные периоды задержки воспламенения τ_{ie} . Значения предельных параметров выверены путем увеличения количества опытов в их окрестности до 50 и характеризуют температурный режим, за которым вероятность самовоспламенения падает до 10%.

Результаты экспериментов прежде всего подтверждают тот факт [1], что наличие на пути распространения струи смеси препятствия даже в виде плоской пластины (вариант В) ведет к улучшению воспламенения: T_e снижается с 640 до 610 К (первое значение

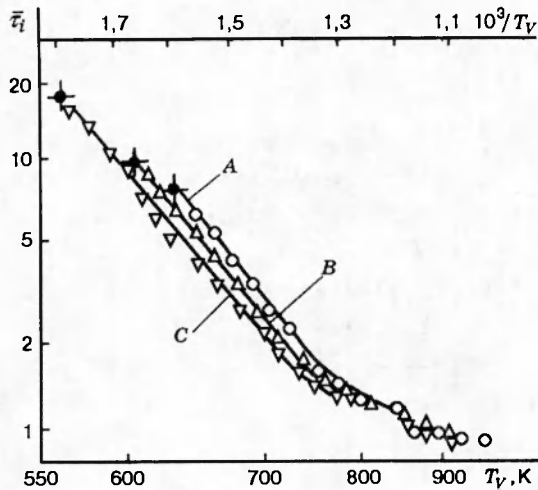


Рис. 3. Зависимость относительного периода задержки воспламенения от исходной температуры среды для вариантов *A*, *B*, *C* условий взаимодействия струи смеси с поверхностью стенки камеры сгорания:

темные точки — предельные значения температуры вспышки T_e и периода задержки воспламенения $\bar{\tau}_{ie}$

получено при впрыске в свободный объем, вариант *A*). При этом нельзя исключать и влияния на процесс воспламенения стесненности условий развития струи [6] из-за наличия другой стенки вставки (позиция 8 на рис. 1). Кроме того, можно полагать, что в полости вставки (с боков она примыкает к поверхности торцевых крышек рабочего объема) возможно возникновение акустических резонансных явлений [3], способствующих воспламенению. А размещение на днище поршня ловушки 9 (вариант *C*), обеспечивающей лобовое торможение и разворот потока смеси, а также организацию зоны застоя [1], приводит к дополнительному падению T_e до 560 К. Этот эффект уже не зависит от стесненности струи.

Интересно, что наряду со снижением температуры вспышки, которое вызвано механическим воздействием на струю смеси, повышаются предельные значения периода задержки воспламенения (для вариантов *A*, *B*, *C* $\bar{\tau}_{ie} = 8, 10$ и 18 соответственно). Это означает, что благодаря образованию зон застоя [1] очаги пламени, инициирующие сгорание первичного заметного (для регистрации датчиков давления) количества топлива, могут возникать и при более низких значениях T_V , но на их развитие требуется более длительное время.

Об улучшении воспламенения смеси свидетельствует также характер зависимости $\bar{\tau}_{ie}(T_V)$. В низкотемпературном диапазоне этот эффект заключается в том, что зависимости испытывают параллельное смещение в сторону более низких значений T_V при переходе от схемы *A* развития струи к *B* и затем к *C*. Это может быть только в том случае, если в условиях действия химико-кинетического механизма воспламенения (прямолинейные участки зависимостей [1, 4]) торможение струи на пластине или тем более в выемке на поверхности пластины приводит к повышению температуры смеси на $20 \div 50^\circ$. Дополнительно этот вывод подтверждается тем, что в рассматриваемом диапазоне температур наклон кривых $\bar{\tau}_{ie}(T_V)$ не меняется при переходе от варианта *A* к *B* или *C*. Это означает, что основная энергетическая характеристика химического процесса, предваряющего воспламенение, — эффективная энергия активации [6] — остается без изменения.

При $T_V = 700 \div 750$ К воспламенение происходит вскоре после завершения впрыска ($\bar{\tau}_i \leq 1,5$), т. е. в условиях продолжающегося интенсивного механического перемешивания смеси. В этом случае устойчивые зоны застоя, в которых формируются очаги пламени, не успевают образоваться. Поэтому макрокинетические процессы начинают играть в про-

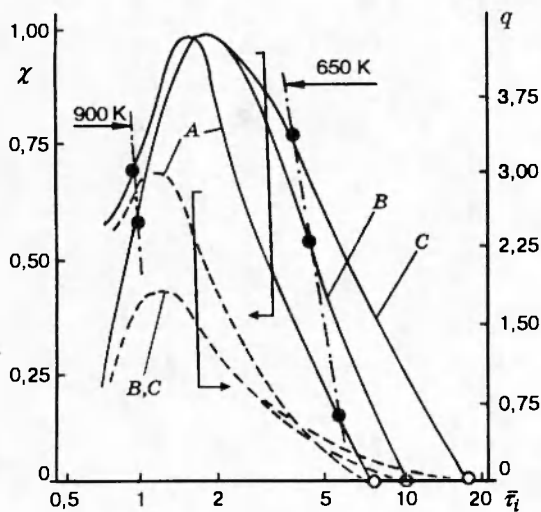


Рис. 4. Зависимость полноты сгорания (сплошные линии) и скорости тепловыделения (штриховые) от относительного периода задержки воспламенения:

штрих-пунктирные линии указывают на изменение полноты сгорания при переходе от варианта А к В и С при одинаковых температурах среды (650 или 900 К)

цессе воспламенения такую же важную роль, как и химико-кинетические [4, 6]. На рис. 3 это отражено в виде изменения наклона всех трех линий. А при $T_V > 850$ К значения $\bar{\tau}_i$ вообще становятся независимыми от наличия или отсутствия каких-либо препятствий на пути развития струи, так как в этом случае очаг воспламенения перемещается в ее оболочечную часть, зависшую в пространстве вблизи сопла распылителя еще на начальной стадии впрыска [1, 7].

Важная информация о влиянии формы стенок камеры сгорания на характер тепловыделения получена при измерении одной из основных характеристик теплового процесса в дизелях — полноты сгорания. В настоящей работе в качестве полноты сгорания χ , согласно [5], принимается отношение реально измеренного приращения давления Δp_V к расчетному Δp_C . Последнее вычисляется в предположении полного сгорания всего впрыснутого топлива в замкнутом объеме. Расчет по предлагаемой в [5] методике показывает, что в условиях проводившихся экспериментов Δp_C меняется от 1,66 до 1,94 МПа в зависимости от начальной температуры воздуха в рабочем объеме установки.

На рис. 4 приведены значения χ (сплошные линии) в зависимости от $\bar{\tau}_i$, полученные в сериях опытов А, В, С. Штрих-пунктирными линиями соединены точки, положение которых свидетельствует об увеличении или, наоборот, снижении χ при переходе от варианта А к В и затем к С при фиксированных температурах среды, диапазоны которых определяют тот или иной механизм самовоспламенения (этот результат подробно анализируется ниже при описании рис. 5). На рис. 4 представлена также зависимость средней скорости сгорания q от $\bar{\tau}_i$ (штриховые линии). Очевидно, что этот параметр целесообразно определить как безразмерный: $q = \Delta p_V \bar{\tau}_i / \Delta p_C \tau_V$. Знание этой характеристики процесса позволяет получить дополнительную информацию о динамике тепловыделения.

Форма представления экспериментальных данных на рис. 4 связана со следующими обстоятельствами. Неполнота сгорания, выражающаяся в наличии в его продуктах сажевых частиц, кокса, в разной степени недоокисленных углеводородов и др., связана, прежде всего, с образованием неоднородностей в горячей топливоздушном смеси [6]. При этом здесь речь идет и о разномасштабных временных и пространственных флуктуациях распределения топливного компонента в струе, и об общем и локальных нарушениях гомогенности смеси. Это неблагоприятное свойство процесса смесеобразования невозможно непо-

средственно охарактеризовать каким-либо количественным параметром, но его косвенной мерой может стать период задержки воспламенения [5, 6]. Действительно, одним из основных параметров, определяющих динамику развития струи топливовоздушной смеси [7], общее распределение топлива в струе [8] и образование в ней разномасштабных неоднородностей [9], является плотность среды. Поэтому от нее в значительной степени зависит полнота сгорания. С другой стороны, этим же параметром определяется теплосодержание воздуха в объеме струи, т. е. интенсивность прогрева и испарения топлива и скорость развития предпламенных химических превращений [10]. Таким образом, между χ , q и $\bar{\tau}_i$ существует и может быть установлена определенная связь. Впервые на это обстоятельство было обращено внимание в [6], а один из примеров реализации указанного принципа содержится в [5].

Приведенные на рис. 4 зависимости имеют общий для такой формы представления данных характер [5]: максимальная полнота сгорания (в других условиях [5] она может оказаться значительно ниже 1) достигается лишь при некоторой средней температуре среды (можно определить с помощью рис. 3). При ее повышении или понижении значения χ резко падают. Скорость выгорания также имеет максимум, но он сдвинут в область более высоких температур. Такой вид полученных кривых объясняется тем, что в диапазоне высоких температур (малые $\bar{\tau}_i$) быстрое воспламенение и сгорание оболочечного слоя струи лишают ее срединную часть доступа необходимого количества окислителя. Поэтому смесь, находящаяся в центре струи (и особенно — поступившая на завершающей стадии впрыска), в условиях глубокого переобогащения подвергается высокотемпературному пиролизу, продукты которого впоследствии догорают лишь частично. Этому же способствует и высокая начальная скорость горения смеси. В низкотемпературном диапазоне τ_i лимитируется вялотекущими химико-кинетическими превращениями, предваряющими воспламенение. За это время в продолжающейся развиваться струе образуется все большее количество зон, заполненных обедненной смесью. При длительном пребывании в подогретом состоянии смесь проходит стадию термической деструкции, ведущей к обильному сажеобразованию, и не участвует в процессе тепловыделения. В этих условиях скорость сгорания определяется скоростью распространения пламени в смеси с предельно низкой концентрацией топливного компонента, а некоторые участки сильно расширившейся струи горение вообще не затрагивает.

На фоне описанных общих закономерностей процесса сгорания можно указать и некоторые его особенности, связанные исключительно с влиянием механического воздействия на струю топливовоздушной смеси. В области высоких температур ($\bar{\tau}_i \leq 2$) наличие ограничивающих струю стенок вставки, имитирующей в рабочем объеме камеру сгорания дизеля, снижает χ . Это становится особенно заметным при предельно малых периодах задержки воспламенения ($\tau_i \sim 1$), которые в рассматриваемых условиях однозначно связаны с температурой (см. рис. 3). Это объясняется дополнительным ограничением притока свежего окислителя к быстро сгорающей оболочке струи. Об этом же свидетельствует и существенное падение средней скорости тепловыделения. Но сколь-нибудь заметного влияния собственно эффекта вторичного смесеобразования (переход от схемы *B* к *C*) в высокотемпературном диапазоне не зафиксировано. Таким образом, выемка на стенке камеры сгорания практически не оказывает влияния на процессы воспламенения и выгорания смеси в то время, когда струя еще продолжает интенсивно развиваться и тепловыделение локализовано вблизи сопла.

Иная картина наблюдается при анализе зависимости $\chi(\bar{\tau}_i)$ в низкотемпературном диа-

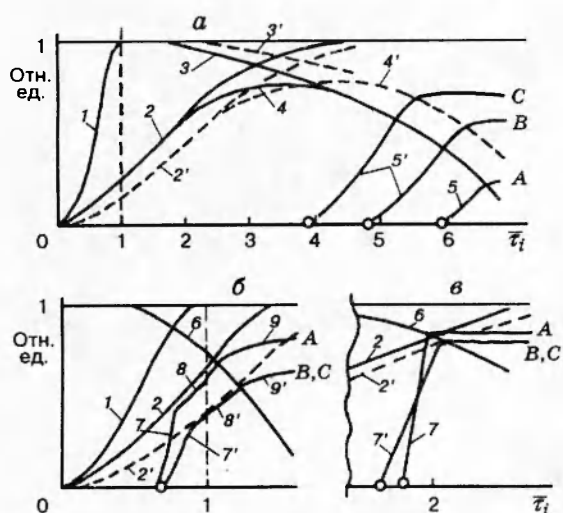


Рис. 5. Качественные диаграммы тепловых процессов в камере сгорания при исходных температурах среды 650 (а), 900 (б), 800 К (в)

пазоне ($\bar{\tau}_i > 3$). Во-первых, полнота сгорания резко увеличивается при переходе от режима свободного развития струи к режиму впрыска в полузамкнутую полость вставки, что, на первый взгляд, представляется парадоксальным. Во-вторых, профилирование поверхности, воспринимающей удар струи, ведет к еще большему возрастанию χ при одних и тех же значениях τ_i . Наиболее вероятной версией, позволяющей объяснить оба указанных эффекта, является следующая. В условиях низких температур и относительно длительных задержек воспламенения струя успевает развиться до такой степени, что в ней практически не остается участков, содержащих переобогащенную смесь. Поэтому в основном все потери реализуются через механизм термической деструкции, сажеобразования и частичного недогорания углеводородных остатков [6]. Из рис. 3 следует, что улучшение условий для воспламенения смеси в последовательности схем $A \rightarrow B \rightarrow C$ приводит к тому, что одинаковым τ_i соответствуют все более низкие температуры и, следовательно, снижение интенсивности потерь. Можно полагать, что именно этим обстоятельством и объясняется поведение зависимостей χ от $\bar{\tau}_i$ на рис. 4. Таким образом, чем раньше смесь воспламеняется, тем ниже оказываются потери, которые начинаются и идут в основном во время смесеобразования, и тем большая доля впрыснутого топлива успевает нормально сгореть.

Чтобы наглядно представить ход тепловых процессов в рабочем объеме установки при различных условиях смесеобразования, рассмотрим диаграмму на рис. 5, принципы построения которой предложены и осуществлены в [5]. Здесь, как и ранее, временной масштаб целесообразно выразить в $\bar{\tau}_i$, но все зависимости на диаграмме носят качественный характер. Как только диспергированное топливо начинает поступать в объем (линия 1), развивается процесс его тепловой обработки. С одной стороны, идет образование все большего количества реакционноспособной парогазовой смеси (линия 2). С другой стороны, нарастает количество топлива (линия 3), подвергающегося термическому разложению и впоследствии не участвующего в процессе тепловыделения. Параллельное действие этих двух факторов приводит к тому, что количество топлива, подготовленного к полноценному сгоранию (линия 4), в любом случае сначала возрастает, достигая максимума, а затем падает. Поэтому результирующая полнота сгорания в значительной мере связана с кривой тепловыделения 5 и ее положением на диаграмме. Но так как характер протекания процессов 1–5 определяется параметрами среды и динамикой впрыска топлива, то разработать

какую-либо обобщенную и однозначную картину происходящего в камере сгорания практически невозможно. В отдельных же случаях, когда круг условий экспериментов сужен, такое рассмотрение можно провести.

В низкотемпературном диапазоне (см. рис. 5,а) в свободно развивающейся струе (сплошные линии), ввиду хороших возможностей ее теплообмена с окружающей средой, процессы 2 и 3 идут несколько интенсивнее, чем в условиях ограничения стенками вставки (штриховые линии 2' и 3'). Поэтому кривые подготовленности смеси к сгоранию 4 и 4' смещены во времени друг относительно друга (возможно, не совпадают и по амплитуде). Из графика видно, что только из-за этого количество сгоревшего топлива, определяющее полноту сгорания, в первом случае (вариант А) ниже, чем во втором (В, С). Но главным фактором, влияющим на χ в рассматриваемых условиях, все же является то, что воспламенение начинается в различные моменты времени при переходе от варианта А к В, а затем к С (см. рис. 3: при одной и той же температуре $\bar{\tau}_i$ падает). Действительно, так как здесь сгорание топлива осуществляется в фазе падающих ветвей зависимостей 4 и 4', то перемещение начала кривых тепловыделения при неизменной его скорости (см. рис. 4) в сторону снижения $\bar{\tau}_i$ ведет к возрастанию χ . Именно это обстоятельство отображено на рис. 4 изотермой 650 К (штрих-пунктирная линия). Таким образом, наблюдаемое в экспериментах (диапазон низких температур среды) повышение полноты сгорания смеси при специальном профилировании стенки, на которую падает струя, можно объяснить ускорением воспламенения. Но на динамику подготовки смеси к сгоранию (линия 4') выемка на поверхности вставки не оказывает существенного влияния.

В условиях высоких температур среды потеря топлива осуществляется не через механизм сажеобразования, реализация которого затянута во времени [5], а за счет быстропротекающего бескислородного пиролиза. На рис. 5,б,в представлены диаграммы, с помощью которых предпринята попытка объяснить взаимосвязь процессов теплопереноса и химических превращений, логически увязанная с результатами экспериментов в описываемых условиях. Здесь целесообразно рассмотреть два варианта. При предельно высоких температурах среды ($\bar{\tau}_i < 1$) кривая тепловыделения может быть отображена тремя участками (см. рис. 5,б): 7, 7' — быстрое сгорание той части топлива, которая к моменту воспламенения уже прошла предпламенную подготовку (в основном это оболочечная часть струи), 8, 8' — горение оставшейся смеси в темпе ее тепловой переработки, 9, 9' — догорание некоторого количества продуктов высокотемпературного бескислородного разложения топлива (б — кривая пиролиза). При этом очевидно, что в свободной струе подготовка горючего идет более интенсивно, чем при ее развитии в стесненных условиях. Это обстоятельство, а также вызванное им заметное увеличение средней скорости сгорания при практических одинаковых $\bar{\tau}_i$ (см. рис. 4) приводят к возрастанию χ в варианте А по сравнению с В и С. В случае же умеренно высоких температур ($1 < \bar{\tau}_i < 2$) участки 8 и 8' перемещаются в верхние пологие ветви кривых подготовленности смеси 2 и 2' и практически исчезают (см. рис. 5,в). А так как интенсивность пиролиза в этих условиях снижается, то значения χ во всех вариантах взаимодействия струи с преградой становятся близкими и достигают относительно высоких значений.

При некоторой средней температуре комплекс всех тепловых процессов становится таким, что полнота сгорания оказывается максимальной (в данном случае $\chi \approx 1$). Характерно, что для варианта А и идентичных вариантов В и С это соответствует различным $\bar{\tau}_i$ (см. рис. 4). С помощью диаграмм, аналогичных рассмотренным выше, нетрудно показать, что такой результат можно получить при синхронном смещении и $\bar{\tau}_i$, и вершин

кривых подготовленности смеси 4 и 4'. Поэтому можно полагать, что он связан в основном с изменением условий развития струи.

Таким образом, проведенное исследование показало, что эффект вторичного смесеобразования оказывает положительное влияние не только на воспламенение, но и на процесс сгорания топливовоздушной смеси и в таких условиях, когда топливо впрыскивается в полость, геометрические очертания которой соответствуют форме камеры сгорания реального двигателя. Путем специального профилирования стенки в месте падения на нее струи смеси удастся снизить пороговую температуру ее воспламенения, но лишь с одновременным увеличением времени, необходимого для вызревания первичных очагов пламени в застойных зонах. Вторым результатом заключается в общем снижении периода задержки воспламенения в условиях низких и умеренных температур среды. Третий результат, являющийся следствием двух первых, — повышение полноты сгорания, которое объясняется уменьшением количества топлива, успевающего за время индукции пройти стадию низкотемпературной деструкции. Факт повышения полноты сгорания при пусковых температурах является не менее важным, чем снижение пороговых параметров первичной вспышки, так как этим облегчается не только запуск двигателя, но и его переход на устойчивый режим самостоятельной работы [11].

Влияние эффекта вторичного смесеобразования не распространяется на диапазон высоких температур (здесь не имеется в виду сравнение случаев свободно развивающейся струи и струи в стесненных условиях). Это свидетельствует о том, что обсуждаемые в настоящей работе меры по улучшению пусковых характеристик двигателя не должны влиять на эффективность его работы в номинальном режиме. И хотя рассмотренный в работе случай ($p_{\gamma} = 0,9$ МПа) не характерен для такого режима, есть основания полагать [1, 5], что при более высоких исходных давлениях в среде полученные выводы будут справедливыми.

В заключение отметим, что качественные и в определенной степени количественные результаты, полученные на модельной установке, подтверждены при натурных испытаниях реального двигателя, где условия постоянства объема камеры сгорания не соблюдаются. Результаты таких испытаний привели к разработке конкретных предложений по доводке существующей камеры сгорания одного из типов двигателей, направленных на улучшение его пусковых и эксплуатационных характеристик [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Воспламенение в условиях взаимодействия струи топливовоздушной смеси со стенками камеры сгорания дизеля // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 7–17.
2. Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Эффект вторичного смесеобразования как средство улучшения воспламеняемости смеси в дизеле // Проблемы совершенствования рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф., Москва, 4–6 февраля 1986. М.: МАДИ, 1986. С. 85–86.
3. Лышевский А. С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. М.: ГосНТИ машиностроит. лит., 1963.
4. Бузуков А. А. Промотирующее влияние алкилнитратов на самовоспламенение керосино-воздушной смеси // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 3. С. 12–20.

5. Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Самовоспламенение и сгорание водотопливной эмульсии при впрыске ее в нагретый воздух. III. Полнота сгорания мазута М-40 // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 5. С. 3–11.
6. Свиридов Ю. Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.: Машиностроение, 1972.
7. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. О кумулятивном механизме развития высоконапорной топливной струи // Двигателестроение. 1981. № 2. С. 5–8.
8. Бузуков А. А. Развитие струи водотопливной эмульсии в нагретой газовой среде // Теплофизика и аэромеханика. 1995. Т. 2, № 1. С. 79–88.
9. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Качественные особенности развития факела при впрыске топлива в среду с противодавлением до 10 атм // ПМТФ. 1981. Т. 22, № 2. С. 66–70.
10. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Болдырев И. В. и др. Задержка воспламенения бензина при впрыске в модель камеры сгорания двигателя // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 2. С. 28–35.
11. Болдырев И. В., Смирнова Т. Н., Пушкин С. Б. Математическая модель пуска двигателя // Двигателестроение. 1984. № 6. С. 14–16.
12. Заявка на изобретение 93-047219/06/047666 от 11.10.93, F 02 В 23/06, F 02 F 3/26. Двигатель с воспламенением от сжатия / В. К. Баев, А. А. Бузуков, Б. П. Тимошенко. Положит. решение ВНИИГПЭ от 06.05.95.

*Поступила в редакцию 20/VI 1995 г.,
в окончательном варианте — 21/III 1996 г.*
