

**САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ И СГОРАНИЕ
ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ
ПРИ ВПРЫСКЕ ЕЕ В НАГРЕТЫЙ ВОЗДУХ.
III. ПОЛНОТА СГОРАНИЯ МАЗУТА М-40**

А. А. Бузуков, Б. П. Тимошенко

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск*

Экспериментально установлена зависимость полноты сгорания жидкого топлива при импульсном впрыске его в нагретый воздух от параметров среды и условий подачи и показано, что эмульгирование топлива не влияет на интегральную полноту сгорания. Поэтому повышение топливной экономичности дизельных двигателей при переводе их на водотопливную эмульсию может быть достигнуто только за счет благоприятного изменения динамики цикла.

Основной показатель эффективности дизельного двигателя — топливная экономичность, которую чаще всего определяют количеством чистого энергоносителя, необходимого для производства единицы механической энергии (г/кВт·ч) при работе двигателя в номинальном режиме. Некоторое повышение экономичности, как показали исследования [1–4 и др.], может быть достигнуто путем использования водотопливных эмульсий (ВТЭ) на базе традиционных безводных топлив нефтяного происхождения. Установлено, что перевод дизелей на ВТЭ ведет к снижению максимального и среднего значений индикаторного давления в камере сгорания, но при этом увеличивается скорость его нарастания. В результате такая трансформация динамики цикла при удачном стечении обстоятельств приводит к повышению термомеханического КПД или дает возможность форсировать двигатель по мощности при сохранении экономичности на прежнем уровне [5]. При этом предполагается, что процесс тепловыделения в камере сгорания оптимален.

Мощностные и экологические показатели работы дизелей зависят прежде всего от качества сгорания топливовоздушной смеси. Как известно [6], скорость и полнота сгорания определяются местными значениями температуры и концентрации реагирующих компонентов, а следовательно всем ходом процесса смесеобразования. Именно его недостатки ведут к обильному выделению сажи. Поэтому считают [7], что повышение экономичности при использовании ВТЭ может иметь также и химическую природу и в основном связано с избыточным количеством водяных паров, ускоряющих процесс сгорания промежуточного продукта — окиси углерода. Особенно это относится к центральной переобогащенной топливом части струи, где из-за низкого локального коэффициента избытка воздуха сажеобразование идет наиболее интенсивно. Не исключают также и каталитическое действие паров воды на процессы газификации и окисления углерода [8].

Эксперименты показывают, что эмульгирование топлива приводит не только к изменению химизма реакции, но и к механическому перестроению структуры струи. Оно заключается в том, что струя ВТЭ оказывается более рыхлой из-за усиленного кавитационного разброса жидкости непосредственно при истечении ее из сопла распылителя [9]. А на поздних стадиях процесса смесеобразования сердцевина струи претерпевает вторичное распыливание [10] за счет тепловых микровзрывов мельчайших глобул воды, заключенных в каплях диспергированного топлива [1]. Эти

факторы снижают удельное содержание топливного компонента в струе [11], что может ускорить сгорание в центральной ее части. Но, с другой стороны, воспламенение смеси происходит с увеличенным периодом задержки [12], что объясняется замедлением прогрева и испарения капель ВТЭ из-за ее повышенной интегральной теплоты парообразования [7, 12].

Таким образом, оказывается, что при эмульгировании меняются гидромеханические, теплотехнические и химико-кинетические характеристики процессов смесеобразования, воспламенения и горения топлива. Многопараметричность и взаимопроникаемость этих явлений в значительной мере осложняет установление их причинно-следственных связей. Усугубляется это еще и тем, что подавляющее количество экспериментальных исследований и испытаний проводилось на моторных стендах, оснащенных штатными, непригодными для ВТЭ двигателями, в условиях ограниченных диагностических возможностей. Поэтому вопросы выбора оптимальных условий для перевода на ВТЭ двигателей различных мощностей и размерностей и организации оптимального рабочего процесса до настоящего времени не решены.

В представляемой работе изучалось влияние степени эмульгирования топлива на полноту его сгорания при параметрах среды и условиях впрыска, характерных для работы дизельных двигателей. Для исключения фактора нестационарности всех процессов, связанного с работой машины, опыты проводились в бомбе постоянного объема.

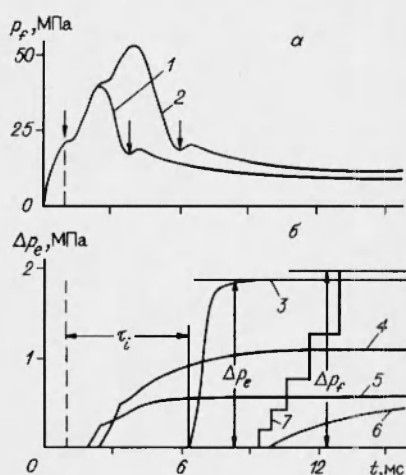


Рис. 1. Эпюры давления в топливной системе (а) и в камере сгорания (б) при впрыске безводного мазута М-40.

Масса впрыскиваемого энергоносителя m_f , мг: 1, 5, 6 — 40, 2-4 — 100; давление воздуха в камере p_0 , МПа: 6 — 3,3, 4 — 4,9, 3, 5 — 6,5; температура воздуха T_0 , К: 6 — 700, 3 — 750, 4, 5 — 870; 7 — расчет.

Порядок работы установки и методика выполнения эксперимента подробно изложены в [12, 13]. Перед впрыском топлива камера сгорания объемом 800 см^3 наполнялась сжатым и подогретым воздухом (исходная температура T_0 в различных опытах менялась от 600 до 950 К, а статическое давление p_0 составляло 3,3, 4,9 или 6,5 МПа). С помощью дизельной форсунки закрытого типа, оснащенной однодырчатым распылителем с диаметром сопла 0,3 мм, в камеру осуществлялся единственный впрыск подогретого до 100°C мазута М-40 или ВТЭ на его основе. В качестве иллюстраций, характеризующих работу топливной системы, на рис. 1, а приведены осциллограммы давления впрыска p_f . С их помощью в каждом опыте контролировалось качество и стабильность впрыска и определялись начало и конец подачи топлива в объем (отмечено стрелками). Ее изменение от малых (40 мг) до повышенных (100 мг) доз осуществлялось увеличением продолжительности впрыска путем регули-

ровки хода рейки топливного насоса. При этом, как следует из осциллограмм 1, 2, возрастала не только длительность, но и давление впрыска.

При переходе на эмульгированный мазут в зависимости от содержания воды подаваемая доза увеличивалась на столько, чтобы в ней сохранялось постоянное количество энергоносителя. Поэтому при малой или повышенной подачах безводного топлива соответствующее им количество ВТЭ составляло 44 или 110 мг при массовом содержании воды $c = 10 \%$,

48 или 120 мг при $c = 20\%$ и 52 или 130 мг при $c = 30\%$. Проверка показала, что при регулировании цикловой подачи в указанных относительно небольших пределах существенных изменений режима впрыска не происходит, а вообще отклонения дозы от заданной условиями эксперимента во всех случаях не превышали 3% [12].

На рис. 1,б показаны осциллограммы давления в камере при воспламенении и сгорании впрыскиваемого в нее безводного топлива, а также принципы измерения периода задержки воспламенения τ_i и амплитуды давления сгорания Δp_e . При высоких температурах эти параметры определяются достаточно надежно с точностью до 5% [12]. Но при $T_0 < 700\text{ К}$, когда значения τ_i и времени сгорания смеси велики (линия б на рис. 1,б), Δp_e фиксируется с большой погрешностью. Это связано с заметными потерями давления за счет теплоотвода в стенки камеры сгорания, протечками и др. В этом случае погрешность измерений может достигать 15% . Эпюры давления, получающиеся от сгорания ВТЭ, качественно ничем не отличаются от показанных на рис. 1,б.

Установим связь между измеряемыми параметрами и полнотой сгорания $\alpha_e = q_e/q_f$, где q_e — фактическое тепловыделение в камере ко времени окончания горения, а q_f — тепловыделение при полном сгорании в тех же условиях всего впрыснутого топлива массы m_f . Очевидно, что величина $q_f = h_f m_f$, где h_f — низшая теплотворная способность топлива. Но значение q_e непосредственно на опыте не определяется и о нем можно судить по приросту давления Δp_e в камере после завершения горения.

Проведем простейший расчет величины Δp_e , считая, что в замкнутом объеме V_0 произошло тепловыделение от сгорания массы топлива m_e . Допуская равновесность протекания всех газо- и термодинамических процессов и считая содержащийся в камере воздух массы m_0 и смешавшийся с ним продукты сгорания идеальным газом (см. ниже), можно записать $q_e = (m_0 + m_e)c_V \Delta T_e$, где c_V — удельная теплоемкость этого газа, а ΔT_e — приращение температуры. Оценка показывает, что даже в крайнем случае ($p_0 = 3,3\text{ МПа}$, $T_0 = 950\text{ К}$) масса воздушного заряда (9 г) на два порядка превышает массу впрыскиваемого топлива (100 мг). Поэтому, пренебрегая m_e (по сравнению с m_0), получим $q_e = c_V m_0 (T_e - T_0)$, где T_e — температура среды после сгорания топлива.

Используя уравнение состояния идеального газа, получим

$$p_e = \frac{m_0 R}{\mu V_0} \left(T_0 + \frac{q_e}{m_0 c_V} \right),$$

где μ и R — молекулярная масса и универсальная газовая постоянная воздуха, p_e — полное давление в камере после сгорания топлива массы m_e (и аналогично при полном сгорании m_f). Отсюда

$$\Delta p_e = \frac{R q_e}{\mu c_V V_0}, \quad \Delta p_f = \frac{R q_f}{\mu c_V V_0}.$$

Таким образом, можно считать, что α_e в экспериментах определяется отношением измеренного повышения давления в камере к расчетному при условии полного сгорания всего топлива:

$$\alpha_e = \frac{\Delta p_e}{\Delta p_f}, \quad \text{где } \Delta p_f = \frac{R h_f m_f}{\mu c_V V_0}.$$

Для более точного расчета Δp_f в работе использована следующая процедура. На первом этапе считается, что происходит мгновенное и полное сгорание малой доли подаваемого топлива в объеме воздуха, определяемом стехиометрическим соотношением. После этого продукты сгорания

адиабатически расширяются до состояния, при котором выравнивается давление в них и к окружающему (тоже адиабатически сжимаемому) воздуху. При этом теплообмен между газом в элементарном объеме, в котором произошло тепловыделение, и в остальной части камеры сгорания, а также их перемешивание исключаются, а для определения теплотехнических характеристик продуктов сгорания используются справочные данные [14]. В результате такого расчета получается значение первичного повышения давления в камере сгорания. На втором этапе рассматривается сгорание следующей элементарной порции топлива, также в объеме со стехиометрическим содержанием воздуха, но уже подогретого предыдущим сжатием. После этого происходит новое адиабатическое расширение продуктов сгорания до установления равного с окружающей средой давления. Такой расчет повторяется до тех пор, пока не будет «сожжено» все впрыскиваемое топливо, в результате чего получается искомое значение избыточного давления Δp_f . То, что в расчете не учитывается разбавление среды продуктами сгорания, оправдывается общим высоким коэффициентом избытка воздуха (не менее 7) и тем, что перед воспламенением смеси в камере не образуется сколько-нибудь интенсивных движений воздушного заряда. На рис. 1,б схематически показано изменение давления в камере сгорания в процессе вычисления (зависимость 7).

Описанная простая схема расчета давления сгорания топливозвдушной смеси в условиях проводившихся экспериментов дает результат, мало отличающийся от получаемого с помощью более совершенных, но трудоемких методик [15]. В то же время отличие от результатов вычислений по указанной выше упрощенной формуле достигает 20 %.

Процесс сгорания и все остальные характеристики тепловыделения (изменение давления и температуры в камере, длительность и скорость горения и др.) сложным образом зависят от условий экспериментов. Но неполнота сгорания, выражающаяся в увеличении содержания в продуктах горения сажевых и коксовых частиц, несгоревших или недоокисленных углеводородов и т. п., связана прежде всего с неоднородностями в топливозвдушной смеси [7, 15]. Причем, речь здесь идет и о локальных временных и пространственных флуктуациях плотности распределения топливного компонента в струе [16], и о степени ее макроскопической гомогенизации. Количественно охарактеризовать это свойство процесса смесеобразования нельзя, но косвенной его мерой может стать период задержки воспламенения τ_i . Идея связать основные характеристики сгорания с τ_i предложена и реализована в [15], а успешно использована в [17, 18]. В этих работах показано, что такой подход позволяет получать достаточно емкую информацию и логично объяснять наблюдаемые закономерности. В настоящей работе основные данные экспериментов представлены именно в такой форме.

Прежде всего рассмотрим результаты экспериментов, в которых установлены особенности сгорания топливозвдушной смеси в свободной камере сгорания постоянного объема. На рис. 2 приведены характерные зависимости полноты сгорания α_e от периода задержки воспламенения τ_i для одной из серий опытов со впрыском безводного мазута М-40. Измерения показывают, что во всех случаях при относительно малых τ_i (и, соответственно, при высоких температурах) $\alpha_e = 0,4 \div 0,6$ и возрастает до 0,5–1 при увеличении τ_i до 5–7 мс. Но при дальнейшем росте τ_i значения α_e снова уменьшаются до исчезающе малых величин.

Наряду с этими общими результатами можно указать и некоторые их особенности. Они касаются прежде всего зависимости α_e от дозы впрыскиваемого топлива. При малых цикловых подачах (кривые 1, 2, 3) значения α_e в высокотемпературном диапазоне практически не зависят от исходного давления в среде, а в максимуме ($\tau_i = 4$ мс) реализуется полное сгорание

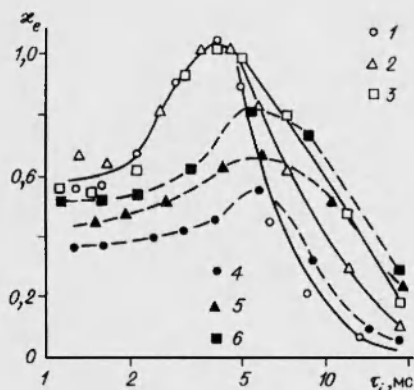


Рис. 2. Зависимость полноты сгорания от периода задержки воспламенения при впрыске безводного мазута М-40:

m_f , мг: 1-3 — 40, 4-6 — 100; p_0 , МПа: 1, 4 — 3,3, 2, 5 — 4,9, 3, 6 — 6,5.

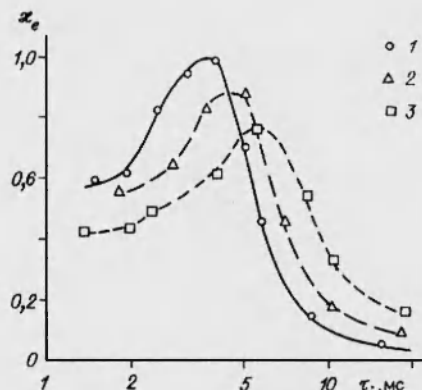


Рис. 3. Зависимость полноты сгорания от периода задержки воспламенения при впрыске 10 %-й ВТЭ на основе дизельного топлива ДЛ:

m_f , мг: 1 — 40, 2 — 60, 3 — 100; p_0 = 3,3 МПа.

топлива. Но при снижении температуры среды значения x_e спадают тем более интенсивно, чем меньше давление воздуха в камере. Так, например, при $\tau_i = 10$ мс полнота сгорания снижается до 0,6, 0,4 и 0,2 при $p_0 = 6,5, 4,9, 3,3$ МПа соответственно.

При повышенных цикловых подачах (линии 4, 5, 6) характер зависимостей $x_e(\tau_i)$ меняется. Во-первых, полнота сгорания оказывается зависящей от p_0 во всем исследованном диапазоне температур, причем при увеличении p_0 значения x_e при соответствующих τ_i возрастают. Во-вторых, максимум x_e меньше 1, зависит от p_0 и, кроме того, смещен в область более низких температур ($\tau_i \approx 7$ мс). И, в-третьих, при больших τ_i показатели полноты сгорания для различных цикловых подач становятся близкими, хотя и по-прежнему сепарированными по давлению.

Описанный качественный и в определенной степени количественный ход зависимостей $x_e(\tau_i)$ в условиях проводившихся экспериментов универсален. Это подтверждается большим количеством опытов. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты экспериментов с ВТЭ-10 на основе дизельного топлива ДЛ [12]. Из графиков следует, что зависимости 1 на рис. 2 и 3 (по 40 мг близкого по теплотворной способности энергоносителя) практически совпадают. Но при повышенных тепловых подачах (рис. 2, 4 и рис. 3, 3) количественное различие достигает 30 %, но качественное соответствие и здесь и во всех других случаях сохраняется.

Установленные закономерности зависимостей $x_e(\tau_i)$ объясняются следующим образом. При значениях τ_i , меньших длительности впрыска, воспламеняется и быстро сгорает только та доля подаваемого топлива, которая находится в головной и оболочечной частях струи и успела пройти стадию предпламенной подготовки и первоначальных химико-кинетических превращений (начальные участки осциллограмм 4, 5 на рис. 1, б). Остальное топливо поступает в зону, уже заполненную продуктами сгорания, где в отсутствие окислителя происходит его термическая деструкция, производные которой лишь частично догорают на поздних стадиях процесса. Поэтому, чем выше общее количество впрыскиваемого топлива (в основном регулируется длительностью его подачи) или чем ниже давление среды (т. е. объемное содержание окислителя в теле струи), тем меньшая доля энергоносителя сгорает «нормально» и соответственно с этим ниже x_e . Таким образом, в высокотемпературном диапазоне спад полноты сгорания связан преимущественно с недостатками гетерогенного горения и

характерен для работы двигателей с ограниченным отводом тепла [19].

Снижение температуры всегда ведет к возрастанию τ_i . Поэтому по истечении некоторого времени (в рассматриваемых условиях $\tau_i = 4,4$ мс) совокупность всех процессов тепло- и массопереноса оказывается такой, что при малых цикловых подачах все впрыснутое топливо успевает пройти предпламенную подготовку и сгорает полностью. Но при больших подачах сгорает от 50 до 80 % впрыскиваемого топлива даже при затягивании начала воспламенения до 7 мс (рис. 2, линии 4, 5, 6 и рис. 3, 2, 3).

В низкотемпературной области причины, обуславливающие падение полноты сгорания, иные. Здесь τ_i определяется не столько динамикой физико-механических процессов при развитии струи смеси, сколько вяло текущими химико-кинетическими превращениями, предшествующими воспламенению [12, 13]. В таких условиях заметная часть топлива успевает пройти стадию термической деструкции, ведущей к саже- и коксообразованию. Этому способствует также и то, что при достаточно длительном времени развития струя частично испарившегося топлива успевает занять в пространстве такой объем, что в отдельных его частях горение уже невозможно из-за переизбытка воздуха [11]. Повышение полноты сгорания в этом случае может быть связано с увеличением давления среды, так как в одни и те же моменты времени струя оказывается более компактной из-за снижения скорости продвижения ее головной части [20]. Описанный механизм сгорания топливовоздушной смеси характерен для пусковых режимов работы холодного двигателя [21].

Результаты экспериментов, содержащие ответ на основной вопрос исследования о влиянии степени эмульгирования топлива на полноту его сгорания, представлены на рис. 4 и 5. На первом графике показаны зависимости $\alpha_e(\tau_i)$ для малых (светлые знаки) и повышенных (темные знаки) цикловых подач при впрыске безводного мазута или ВТЭ на его основе в воздух с давлением 4,9 МПа, откуда следует, что полнота сгорания практически не зависит от степени эмульгирования топлива. Такой же вывод получен и в экспериментах, проводившихся при других значениях p_0 . Отметим, что отдельные опыты подтвердили независимость α_e от s и в случае использования дизельного топлива в качестве основы для приготовления ВТЭ [12]. Поэтому все результаты настоящего исследования удается представить в виде единого обобщенного графика на рис. 5.

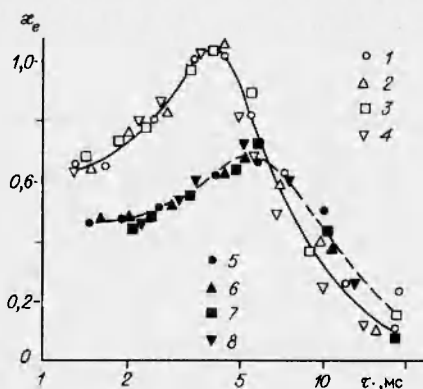


Рис. 4. Зависимость полноты сгорания от периода задержки воспламенения при впрыске безводного мазута М-40 и ВТЭ на его основе.

Массовое содержание воды s , %: 1, 4 — 0, 2, 5 — 10, 3, 6 — 20, 4, 7 — 30; m_f , мг: 1-4 — 40, 5-8 — 100; $p_0 = 4,9$ МПа.

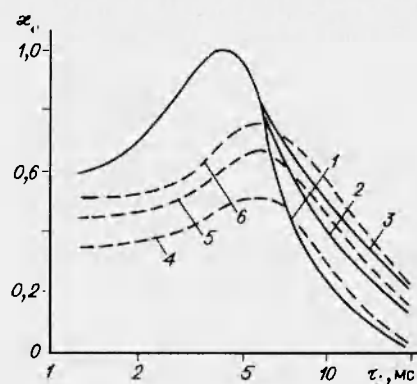


Рис. 5. Обобщенные зависимости полноты сгорания от периода задержки воспламенения при впрыске мазута М-40 и ВТЭ на его основе:

m_f , мг: 1-3 — 40, 4-6 — 100; p_0 , МПа: 1, 4 — 3,3, 2, 5 — 4,9, 3, 6 — 6,5.

Общий характер полученных зависимостей обсуждался выше. Так как он сохраняется неизменным и для безводного топлива, и для эмульгированного, то, очевидно, что все процессы, обеспечивающие тепловыделение, имеют одинаковую физико-химическую природу и могут быть однозначно описаны. Но вывод о количественной независимости полноты сгорания топлива от содержания в нем воды требует обоснования. Это тем более необходимо, что согласно результатам описываемых и других экспериментов при эмульгировании меняются характеристики смесеобразования [9–11], воспламенения [7, 12, 18] и сгорания топлива [7, 8, 18].

С этой целью рассмотрим ход тепловых процессов в камере сгорания, используя для их качественной иллюстрации диаграмму на рис. 6. Как только диспергированное топливо начинает поступать в камеру (линия 1), развивается процесс его термической переработки. С одной стороны, идет испарение капель и образование (2) все большего количества реакционноспособной парогазовой смеси. С другой, нарастает (3) количество топлива, подвергающегося термической деструкции и выбывающего из предстоящего акта тепловыделения. В зависимости от исходной температуры среды оба эти процесса идут с различной скоростью и поэтому по-разному влияют на динамику сгорания смеси. Но в любом случае количество топлива, потенциально готового к нормальному сгоранию (4), сначала возрастает, достигает максимума, а затем спадает.

При низких температурах среды (рис. 6,а) воспламенение затянуто, а скорость сгорания низка [17]. Поэтому ко времени завершения тепловыделения нормально сгорает (5) лишь часть смеси, оставшаяся реакционноспособной.

При некоторой средней температуре (рис. 6,б) и τ_i , и скорость горения оказываются такими, что тепловыделение осуществляется оптимальным образом и полнота сгорания достигает максимально возможного значения. В частности, при малых цикловых подачах процесс подготовки смеси (2) может завершиться настолько быстро, что полнота сгорания становится близкой к 1. Отсюда можно заключить, что кривая распада топлива 3, вообще, является достаточно пологой по крайней мере в начале процесса смесеобразования.

При высоких температурах (рис. 6,в) скорость обоих термических процессов возрастает. При этом период задержки воспламенения снижается вплоть до того, что он становится короче длительности впрыска. В этом случае быстро сгорает (6) оболочечная часть струи, а затем смесь выгорает медленнее (7) в темпе ее подготовки (4). Но наряду с этим резко нарастает и скорость пиролиза (8) топлива, продолжающего поступать в горячую зону, лишенную окислителя. В результате этого наблюдается остановка (9) тепловыделения, а отсюда и высокотемпературное снижение полноты сгорания.

Наиболее характерным образом эмульгирование топлива проявляется в увеличении τ_i . При низких и средних температурах это в основном

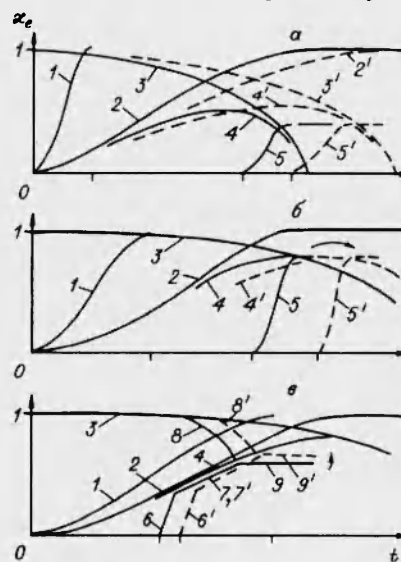


Рис. 6. Качественные диаграммы процессов смесеобразования и сгорания смеси при впрыске безводного топлива (1–9) и ВТЭ (1'–9'). Пояснения в тексте.

связано с замедлением хода предпламенных химических превращений в смеси [12], вызванных более высокими затратами тепла на испарение капель ВТЭ по сравнению с безводным топливом, т. е. носит чисто тепловую природу [11]. В такой же зависимости от температуры (а следовательно, и от содержания воды в ВТЭ) находится и процесс химических преобразований, предопределяющих сажеобразование. Поэтому тепло- и массообменные характеристики смесеобразования для безводного топлива (см. рис. 6, а, б, линии 2–5) преобразуются для ВТЭ (2'–5') путем растяжения координаты t , что соответствует плоскопараллельному сдвигу зависимостей τ_i от T_0 при разной степени эмульгирования топлива [12]. Отсюда следует, что малое (в пределах точности измерений) влияние c на полноту сгорания ВТЭ объясняется действием температурного фактора, в равной степени замедляющего как процесс подготовки реакционноспособной смеси, так и ее деградацию. Интересно, что описанная трансформация характеристик смесеобразования позволяет формально отобразить и наблюдаемое экспериментально [18] снижение скорости сгорания (5 → 5') ВТЭ в низкотемпературном диапазоне.

При общей высокой температуре воздуха роль ее изменения от испарения части безводного топлива или ВТЭ становится малозначимой. Поэтому деформация кривых смесеобразования 2–4 минимальна, а τ_i возрастает относительно мало (6 → 6') [12, 18]. При этом в такой же степени смещаются и кривые, описывающие «изъятие» топлива из режима диффузионного горения (8 → 8'), хотя в области гетерогенного горения (7, 7') тепловыделение идет одинаково в темпе поступления и подготовки смеси (динамика впрыска не меняется при переходе от безводного топлива к ВТЭ). В соответствии с этим предел тепловыделения для ВТЭ оказывается на более высоком уровне (9 → 9'), чем для безводного. Однако в рассматриваемом случае речь идет лишь о количестве перерабатываемой в камере сгорания ВТЭ, а не энергоносителя, удельное содержание которого падает с увеличением степени эмульгирования. Отсюда следует, что независимость α_e от c в высокотемпературном диапазоне связана с компенсацией увеличенной дозы сгоревшей ВТЭ пониженным содержанием в ней топливного компонента.

Проведенные рассуждения не распространяются на особые случаи, связанные с кардинальным изменением динамики развития струи при переходе от безводного топлива к ВТЭ. Такой случай наблюдается, например, при малых (до 1,5 МПа) исходных давлениях в среде, когда по этой причине происходит в зависимости от степени эмульгирования скачкообразное изменение τ_i в несколько раз [12]. Или другой пример: внезапное взрывное разбрасывание сердцевин струи на поздних стадиях процесса смесеобразования при достаточно высоком содержании воды в ВТЭ [11]. Очевидно, что в таких случаях диаграмма на рис. 6 должна быть принципиально изменена. Но в целом с ее помощью становится более наглядным физический смысл сопоставления характера тепловыделения с периодом задержки воспламенения, однозначно связанных с теплотехническими характеристиками смесеобразования.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что путем эмульгирования топлива добиться существенного увеличения полноты сгорания нельзя. Поэтому повышение топливной экономичности дизельных двигателей при переводе их на ВТЭ может быть достигнуто лишь за счет благоприятного изменения динамики цикла (изменение момента воспламенения, скорости и давления сгорания смеси и др.). Эти обстоятельства, впрочем, не исключают положительного влияния эмульгирования топлива на конечный состав продуктов сгорания в смысле снижения в них вредных составляющих.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов В. М.** Топливные эмульсии. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. **Сергеев Л. В.** Исследование работы дизеля на водотопливных эмульсиях // Изв. вузов. Машиностроение. 1965. № 12. С. 57–61.
3. **Сергеев Л. В., Иванов В. М.** О работе дизелей на топливоводяных эмульсиях // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. М.: Наука, 1967. С. 176–183.
4. **Петров В. Н.** О некоторых особенностях рабочего процесса дизеля при использовании топливоводяных эмульсий // Изв. вузов. Машиностроение. 1965. № 5. С. 106–110.
5. **Лебедев О. Н.** Некоторые особенности горения капель водотопливных эмульсий в дизелях // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 2. С. 142–145.
6. **Семенов Б. Н., Иванченко Н. Н.** Задачи повышения топливной экономичности дизелей и пути их решения // Двигателестроение. 1990. № 11. С. 3–7.
7. **Лебедев О. Н., Сомов В. А., Сисин В. Д.** Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1988.
8. **Бабкин В. С., Вьюн А. В.** Влияние воды на нормальную скорость пламени метановоздушной смеси при высоких давлениях // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 3. С. 392–395.
9. **Бузуков А. А., Тимошенко Б. П.** Диспергирование высоконапорной струи водотопливной эмульсии // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 2. С. 106–111.
10. **Егоров В. Г.** Об особенностях сгорания свободных капель водотопливной эмульсии // Совершенствование судовых энергетических установок: Сб. науч. тр. / Новосибир. ин-т инж. водн. трансп. Новосибирск, 1990. С. 42–46.
11. **Бузуков А. А.** Развитие струи водотопливной эмульсии в нагретой газовой среде // Теплофизика и аэромеханика. 1995. Т. 2, № 1. С. 79–88.
12. **Бузуков А. А., Тимошенко Б. П.** Самовоспламенение и сгорание водотопливной эмульсии при впрыске ее в нагретый воздух. I. Период задержки воспламенения моторного топлива ДЛ // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 3–10.
13. **Баев В. К., Бажайкин А. Н., Болдырев И. В. и др.** Задержка воспламенения бензина при впрыске в модель камеры сгорания дизеля // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 2. С. 28–35.
14. **Дубовкин Н. Ф.** Справочник по углеводородным топливам и продуктам их сгорания. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.
15. **Свиридов Ю. Б.** Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.: Машиностроение, 1972.
16. **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.
17. **Петриченко И. Н.** Особенности сгорания мазута М-40, впрыскиваемого в высокотемпературный воздушный заряд // Прикладные задачи гидромеханики на водном транспорте: Сб. науч. тр. / Новосиб. ин-т инж. водн. трансп. Новосибирск, 1990. С. 24–30.
18. **Петриченко И. Н.** Исследование сгорания водотопливной эмульсии мазута в бомбе постоянного объема // Энергетические установки речных судов: Сб. науч. тр. / Новосиб. ин-т инж. водн. трансп. Новосибирск, 1991. С. 68–73.
19. **Бузуков А. А., Тимошенко Б. П.** Особенности тепловыделения при распыливании топлива в высокотемпературном воздушном заряде // Рабочие процессы в ДВС с ограниченным отводом тепла: Тез. докл. Всесоюз. семинара. Новосибирск: Ин-т теор. и прикл. механики СО РАН, 1990. С. 35.
20. **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.
21. **Баев В. К., Бузуков А. А., Тимошенко Б. П.** Воспламенение в условиях взаимодействия струи топливовоздушной смеси со стенкой камеры сгорания дизеля // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 7–17.

Поступила в редакцию 3/XI 1994 г.