

УДК 621.436

А.А. Бузуков, Б.П. Тимошенко

**САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ
И СГОРАНИЕ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ ВПРЫСКЕ ЕЕ
В НАГРЕТЫЙ ВОЗДУХ
I. ПЕРИОД ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛ**

Экспериментально изучено влияние степени эмульгирования водой дизельного топлива ДЛ на период задержки самовоспламенения при импульсном высоконапорном впрыске его в нагретый воздух. Показано, что при относительно малых цикловых подачах эмульгирование затягивает процесс воспламенения, а при больших, когда задержка периода воспламенения безводного топлива резко возрастает, ускоряет. Для объяснения некоторых особенностей процесса самовоспламенения рассматривается механизм кавитационного разрушения целостности струи жидкости при выходе из сопла распылителя, определяющий формообразование потока топливо-воздушной смеси. Эмульгирование топлива в значительной мере интенсифицирует кавитационное разрушение и таким образом влияет на ход смесеобразования и, следовательно, воспламенения.

Одна из актуальных проблем двигателестроения, состоящая в радикальном улучшении экологических показателей работы двигателей при одновременном повышении или хотя бы сохранении достигнутого уровня их топливной экономичности, может быть решена, как показывают исследования, за счет использования водотопливных эмульсий (ВТЭ). В связи с этим уже многие годы ведутся исследования как эффективности использования ВТЭ в качестве энергоносителя для теплоэнергетических установок, так и их свойств как физико-химического тела [1—10 и др.]. Значительное внимание уделяется также вопросам, связанным с приготовлением и стабилизацией ВТЭ [11, 12].

Если сопоставить опубликованные в литературе результаты испытаний двигателей внутреннего сгорания, конвертированных на ВТЭ, то они оказываются неоднозначными. В основном это связано с индивидуальными особенностями самих двигателей или модельных установок. Но в большинстве случаев отмечается, что при переходе на ВТЭ в отработавших газах снижается количество оксидов азота [8, 13—15], окиси углерода [16], дымности [13]. Чаще всего исследователи склоняются к тому мнению, что это происходит из-за некоторого снижения температуры цикла за счет тепловых потерь на испарение воды [13, 14, 17].

Вторым фактором, положительно характеризующим идею использования ВТЭ в двигателях внутреннего сгорания, является некоторое повышение их экономичности. В настоящее время накоплено определенное количество данных, показывающих, что эмульгирование штатных углеводородных топлив (10—30 % воды) может снижать их эффективный расход [4, 8, 13, 17]. Это опять же объясняется преимущественно тем, что на начальной стадии тепловыделения температура в цикле оказывается заниженной [14, 17]. В частности, это может быть связано и с затянутостью процесса поступления чистого топлива в камеру сгорания в силу частичного замещения его водою при тех же характеристиках работы топливной системы [6].

Таким образом, накоплен определенный положительный опыт использования ВТЭ в двигателях внутреннего сгорания и, в частности, в дизелях. Этот опыт нашел свое обобщение в [18], но все же его широкое распространение в значительной мере сдерживается из-за недостатка фундаментальной информации о физико-химических процессах, определяющих те или иные особенности смесеобразования, воспламенения и сгорания ВТЭ в соответствующих реальных условиях.

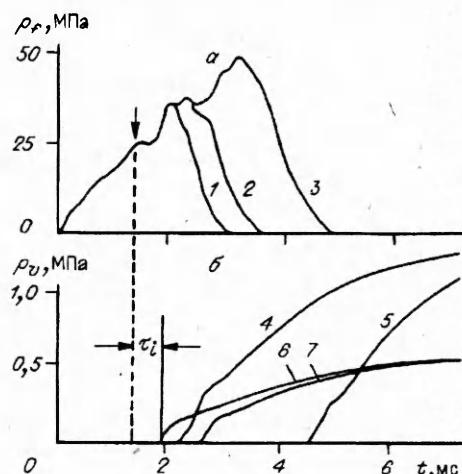
Принято считать, что основной механизм, реализующийся при попадании ВТЭ в нагретую газовую среду при параметрах, характерных для работы дизеля, и ведущий к высвобождению воды, — это микровзрывы распределенных в капельках распыленного топлива глобул воды при их вскипании [7—9, 11, 19, 20]. Правда, эта версия иногда и оспаривается. Так, в [9] проведен достаточно тонкий гидродинамический анализ процесса микровзрыва и показано, что он может происходить лишь в среде с относительно невысоким давлением. Но тем не менее появление свободной воды в массе топливовоздушной смеси несомненно приводит к изменению хода физико-химических процессов, выполняя роль, как указывалось выше, теплоотводящего тела. Кроме того, как считают некоторые исследователи, появление паров воды еще до начала горения может обеспечить предварительную газификацию топлива [11, 19, 20]. Иногда утверждается, что наличие воды в зоне реакции может оказывать каталитическое воздействие на процесс горения, поэтому ВТЭ следует рассматривать как особое вещество — промотор, обладающее повышенной молекулярно-кинетической активностью [17, 20]. А сама идея микровзрывов в основном привлекательна тем, что они ведут к дополнительному распылению топлива [11, 19, 20], а также к механическому разbrasыванию переобогащенной сердцевины топливного факела [7]. Последнее предположение, кстати, нашло определенное экспериментальное подтверждение [8, 21].

Таким образом, имеющиеся в настоящее время данные не позволяют построить обобщенную физическую модель, которая феноменологически достоверно описывала бы все макро- и микрокинетические особенности процессов смесеобразования, предпламеных превращений и характера тепловыделения при использовании ВТЭ в качестве топлива в дизелях. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования характера самовоспламенения моторного топлива ДЛ и ВТЭ на его основе при импульсном высоконапорном впрыске их в нагретый воздух в условиях постоянного объема. Полученные данные позволяют судить о степени влияния динамики топливоподачи на воспламеняемость смеси и воздействии на этот процесс эмульгированной в топливе воды.

Эксперименты проводились на установке, конструкция которой и методика исследования подробно изложены в [22]. Основной элемент этой установки — бомба постоянного объема, наполняемая сжатым и подогретым воздухом (исходная температура T_0 в опытах менялась от 650 до 1000 К, а статическое давление p_0 в различных сериях составляло 1,7, 3,3 или 4,9 МПа). Камера сгорания имела форму короткого цилиндра диаметром 150 мм с размером по образующей 45 мм. С помощью штатной дизельной форсунки закрытого типа, оснащенной однодырчатым распылителем с диаметром сопла 0,3 мм и вмонтированной в боковую стенку, с помощью плунжерного насоса в камеру в радиальном направлении осуществлялся единичный впрыск топлива или ВТЭ. В последнем случае для исключения расслоения ВТЭ в контур прокачки смеси включался непрерывно работающий механический эмульгатор конструкции Новосибирского института инженеров водного транспорта.

Более подробно следует остановиться на особенностях впрыска топлива или ВТЭ. Независимо от условий в камере сгорания было выбрано три режима впрыска, отличавшихся массой цикловой подачи q_c . Для безводного топлива она составляла 37, 57 и 100 мг, а для ВТЭ с массовым содержанием воды $c_m = 10$ или 20 % цикловая подача соответственно увеличивалась на 10 или 20 % в целях сохранения постоянной массы энергоносителя. Таким образом,

Рис. 1. Эпюры давления в топливной системе (а) и в камере сгорания (б) при впрыске безводного топлива.
 q_c , мг: 1, 6, 7 — 37, 2 — 57, 3 — 100; p_0 , МПа: 4, 6 — 4, 9, 5, 7 — 1,7, 6 — 4, 9; T_0 , К: 4, 5 — 900, 6, 7 — 850.



для первого и второго случаев $q_c = 41, 63$ и 110 мг или $45, 69$ и 120 мг. Специально проведенными проверочными опытами установлено, что от одного впрыска к другому величина q_c менялась не более чем на 3% .

Важным является следующее обстоятельство. Изменение значения q_c , как это практически всегда осуществляется при эксплуатации дизельных двигателей, производилось за счет регулировки хода плунжера топливного насоса (скорость его работы установлена постоянной — 375 об/мин). Поэтому соответствующие различным цикловым подачам эпюры давления p_f в топливной системе, определяющего характер впрыска, отличаются длительностью его действия (рис. 1, а). При этом увеличение q_c ведет и к некоторому возрастанию максимального давления в системе. Существенно, что начальная стадия впрыска во всех случаях одинакова и, как показали опыты, не зависит от наличия или отсутствия воды в топливе.

Исходные температура и давление в среде фиксировались с инструментальной погрешностью, не превышающей 2% . Однако независимыми изменениями установлено, что температура воздуха в различных местах камеры сгорания может отличаться на величину до 30 К за счет конвективных течений, развивающихся после включения отсечных клапанов. Поэтому во всех случаях здесь указывается температура T_0 , измеряемая термопарным датчиком в центре объема в 30 мм от оси струи.

Одна из основных характеристик воспламеняемости топливовоздушной смеси — это период задержки воспламенения (ПЗВ). Этот параметр имеет строгий физический смысл для простых реакций, когда кинетические зависимости полностью определяются законом Аррениуса. Тогда для определения ПЗВ используется известное уравнение, построенное на основе модели теплового воспламенения гомогенных газовых смесей:

$$\tau_i = Ap_0^{1-\nu} \exp(E/RT_0),$$

где p_0 и T_0 — исходные давление и температура смеси перед началом процесса; ν — суммарный порядок реакции окисления; R — универсальная газовая постоянная; A — размерный коэффициент; E — энергия активации.

При изучении процессов в двигателях внутреннего сгорания традиционно принято [23] описывать ПЗВ жидким углеводородным топливом, распыляемым в среде нагревенного окислителя, такой же формулой, но в качестве E используется понятие так называемой эффективной энергии активации E_e , что связано со сложным, многоступенчатым и часто неоднозначным характером протекания химической реакции, зависящим как от условий в среде, так и от хода смесеобразования.

ПЗВ в настоящей работе измерялось путем синхронной записи эпюр давления p_f в топливной системе и в камере сгорания p_v (рис. 1, б). Величина τ_i регистрировалась как интервал времени между началом поступления топлива в объем и моментом подъема в нем давления, вызванного начинаяющимся возгоранием смеси. Для отождествления начала впрыска с формой эпюры давления в топливной системе (запорный игольчатый клапан распылителя срабатывает лишь при достижении давления 21 МПа) проводилось специальное исследование, и этот момент в ходе экспериментов фиксировался

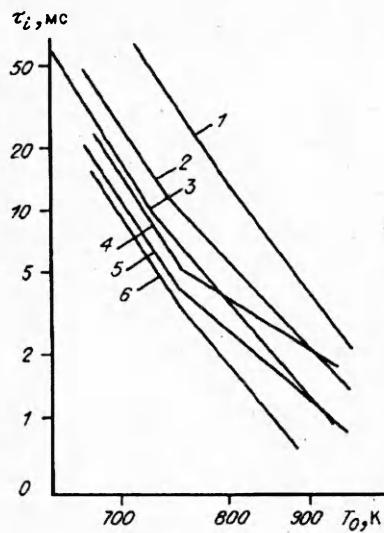


Рис. 2. Зависимость периода задержки воспламенения от исходной температуры в камере.
 q_c , мг: 1—3 — 100, 4—6 — 37—57; p_0 , МПа: 1, 4 — 1,7; 2, 5 — 3,3,
3, 6 — 4, 9.

достаточно надежно (стрелка на рис. 1, а). Оценка показывает, что точность измерения временных интервалов процессов не хуже 5 %. А в целях повышения надежности получаемых результатов измерения производились через каждые 5 К и, как минимум, дважды при изменении температуры сверху вниз и обратно при постоянном давлении p_0 . Таким образом, представленные ниже зависимости есть результат статистической обработки полученного экспериментального материала, попадающего в интервал $T_0 \pm 15$ К, т.е. по 13—15 измерениям.

Первым отметим результат, который в общем-то не является неожиданным, справедливый и для безводного топлива, и для ВТЭ. Установлено, что при относительно низких цикловых подачах их изменение в небольших пределах ($\pm 15\%$) не влияет сколько-нибудь заметно на ПЗВ. Это, очевидно, связано с тем, что в данном случае характер воспламенения определяется в основном динамикой распыления и тепловой переработки первичных порций впрыскиваемого топлива, которая зависит от изменения давления в топливной системе на стадии его нарастания, одинакового во всех случаях. Если же система впрыска настроена на большой расход, то основная масса топлива поступает в камеру сгорания под существенно более высоким давлением, что приводит к значительному увеличению угла раствора струи. Образовавшийся высокоскоростной поток смеси внедряется в предварительно распыленную часть струи, сметает ее, что резко ухудшает условия для самовоспламенения. Поэтому при анализе результатов экспериментов оказалось возможным их объединить по принципу «малая» (40—60 мг) и «большая» (100—120 мг) цикловая подача. Такое обобщение, кстати, нельзя безоглядно распространять на другие характеристики процесса, такие, как полнота сгорания, скорость тепловыделения и др.

Высказанные выше соображения нашли свое отражение на графиках рис. 2, где представлены зависимости ПЗВ от T_0 для безводного топлива при различных давлениях воздуха в камере сгорания. На этом и на следующих рисунках с учетом структуры приведенной ранее формулы данные представлены в координатах, в которых ось ординат линейна относительно $\ln \tau_c$, а ось абсцисс линейна относительно обратной исходной температуры среды T_0 . Для малых цикловых подач полученные зависимости имеют обычный вид [22, 24] и представляют собой два (низко- и высокотемпературный) отрезка прямых. При изменении p_0 зависимости в низкотемпературном диапазоне испытывают плоскопараллельный сдвиг, т.е. линии на графиках имеют одинаковый наклон. С учетом этого может быть получено значение эффективной энергии активации $E_a = 78 \pm 5$ кДж/моль.

Правомерность определения этого параметра как химико-энергетической константы рассматриваемого энергоносителя оправдывается тем, что при относительно низкой температуре среды процесс смесеобразования, включающий распыление, прогрев и испарение необходимого для воспламенения количества топлива, происходит в течение нескольких миллисекунд. А основное время, входящее в τ_c , идет на развитие предпламенных термохимических процессов в квазиравновесной системе воздух — пары топлива (что, кстати, не исключает диффузионного механизма догорания остатков капель топлива в этой зоне).

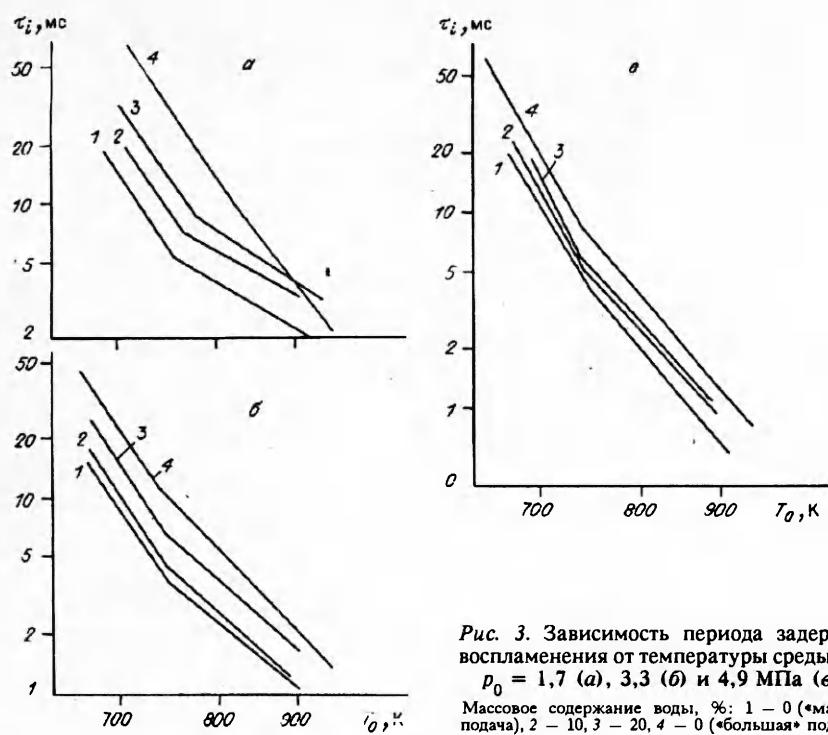


Рис. 3. Зависимость периода задержки воспламенения от температуры среды при $p_0 = 1,7$ (а), 3,3 (б) и 4,9 МПа (в).

Массовое содержание воды, %: 1 – 0 (*малая* подача), 2 – 10, 3 – 20, 4 – 0 (*большая* подача).

С другой стороны, в высокотемпературном диапазоне однозначного значения E_e получить из графиков нельзя, так как в этом случае τ_i сравним со временем формирования реакционноспособной смеси, и макрокинетические явления в виде продолжающегося интенсивного перемешивания компонентов вмешиваются в ход молекуларно-кинетических превращений. При этом, чем ниже давление в среде и соответственно с этим интенсивнее движение потока смеси, тем более замедляется процесс самовоспламенения. А при значительном увеличении массы впрыскиваемого топлива, которое в данном случае сопровождается резким нарастанием скорости его истечения, условия для самовоспламенения еще более ухудшаются, причем и в высокотемпературной и в низкотемпературной областях. Из рис. 2 видно, что при $q_c = 100$ мг в зависимости от p_0 значение τ_i возрастает в 2–4 раза по сравнению со случаями малых цикловых подач. Примечательно, что и в этих условиях наклон линий на графиках (во всяком случае, в низкотемпературном диапазоне) соответствует уже полученному выше значению E_e , так как при возросшей величине τ_i снова успевают создаться квазистационарные условия для развития предпламенных процессов. Но воспламенение здесь происходит уже не в первично образованной смеси, а в какой-то другой зоне после зависания в пространстве всего впрынутого топлива.

Приведенные на рис. 2 данные использованы в качестве опорных на рис. 3 для демонстрации влияния степени эмульгирования топлива на τ_i . Основные результаты экспериментов заключаются в следующем. При малых цикловых подачах эмульгирование топлива приводит к возрастанию τ_i тем большему, чем выше c_m , и это возрастание тем сильнее выражено, чем ниже p_0 . Этот эффект известен [1, 4, 5, 19 и др.] и не противоречит концепции, в соответствии с которой причины увеличения τ_i кроются в дополнительных потерях тепла на испарение воды. Но наиболее интересный результат заключается в том, что при переходе на ВТЭ начинает стираться грань между понятиями «малые» или «большие» цикловые подачи, т.е. значение τ_i впрынутой в камеру эмульсии с $q_c = 110$ или 120 мг (10 или 20 % воды) оказывается таким же, как и при подачах ВТЭ с массой 50 ± 15 мг при

соответствующих c_m . Примечательно то, что в этом случае τ_t , эмульгированного топлива в целом оказывается ниже, чем безводного при таком же впрыске (100 мг) в рабочем диапазоне параметров среды.

Полученный результат следует рассматривать как неординарный, и для его объяснения предлагается следующая физическая модель.

В [25] показано, что при высоконапорном впрыске жидкости в газовую среду сразу же на срезе сопла распылителя струя разгружается и кавитирует, поэтому изначально представляет собой поток достаточно плотно (близко к плотности монолитной жидкости) упакованных частиц. Существенно то, что в результате такого кавитационного разрушения целостности потока его частицы наряду с продольной приобретают еще и радиальную составляющую скорости u_r , которая, собственно, и определяет угол раствора струи топливовоздушной смеси. Газожидкостная струя взаимодействует со средой по квазикумулятивному механизму [26], при котором обеспечивается зависание в виде тумана начальных доз впрынутого топлива в ближней к распылителю зоне, охватывающей по периферии основную продолжающую движение часть струи. Кавитационное разрушение сплошности жидкости при разгрузке хорошо известно в физике ударных волн [27]. При этом скорость разлета поверхностных слоев («откол») может быть оценена [28]: $u_r \sim (2p_f - \sigma_f)/\rho c$, где ρ , c — плотность жидкости и скорость звука в ней, а σ_f — динамическая прочность жидкости на разрыв. В рассматриваемых условиях σ_f сравнима с интенсивностью нагрузки и, кроме того, сильно зависит от наличия центров кавитации (например, для очищенной и дегазированной воды σ_f достигает 30 МПа [29], а для технической падает до 8 МПа [27]). Отсюда следует, что эмульгирование топлива приводит к существенному снижению его динамической прочности и, как следствие, к увеличению начальной скорости радиального разлета струи, т.е. возрастанию ее угла конусности. Причем возрастание угла идет в тем меньшей степени, чем выше начальная нагрузка, т.е. давление впрыска.

Факт уширения струи ВТЭ по сравнению с безводным топливом в литературе описан [7, 8, 21]. Но этот эффект приписывается исключительно явлению теплового взрыва вследствие вскипания включенных в капли топлива микрокапелек воды. Сам по себе такой механизм вполне логичен, но может реализоваться на поздних этапах процесса смесеобразования и лишь после испарения с поверхности капель топлива заметной его части. Поэтому решительное влияние такого теплового микровзрыва глобул воды на процесс самовоспламенения сомнительно. Тем более, что распад отдельных капель топлива под действием расширяющихся пузырьков или вообще от вскипания капель в целом не может заметным образом повлиять на общую геометрию струи, в то время как скорость радиального разлета u_r , распыляемой жидкости непосредственно около сопла составляет десятки метров в секунду и сравнима со скоростью продольного движения.

Рассмотрим полученные результаты с позиций изложенного кавитационного механизма разрушения струи. Что касается экспериментов с безводным топливом, то здесь все ясно, и приведенные выше объяснения особенностей зависимости τ_t от условий в среде полностью соответствуют предлагаемой концепции и имеющимся представлениям о связи динамики развития струи топливовоздушной смеси с ее самовоспламенением. При впрыске же ВТЭ начальный угол раскрытия струи оказывается увеличенным. Поэтому начальная доза впрыскиваемого материала в этом случае распределяется вблизи сопла в более обширной зоне, чем при впрыске безводного топлива. И если ВТЭ впрыскивается с большой цикловой подачей, то, в отличие от случая безводного топлива, последующий поток смеси уже не захватывает эту первичную зону (роль фактора p_f возрастает по сравнению с фактором σ_f). Тогда воспламенение смеси происходит так же, как и при впрыске малых количеств ВТЭ.

В свете этих рассуждений оказывается возможным объяснить также возрастание ПЗВ при эмульгировании топлива при малых цикловых подачах.

Результаты экспериментов, приведенные на рис. 3, показывают, что зависимости $\tau_i(T_0)$ для ВТЭ получаются при плоскопараллельном сдвиге базовых кривых в сторону больших температур. Этот результат не противоречит тепловому механизму возрастания ПЗВ и, с другой стороны, отвергает влияние воды на воспламенение как химического реагента. В противном случае в каком-то диапазоне температур произошло бы изменение наклона линий на графиках (т.е. изменение параметра E , комплексным образом характеризующего энергетику химического процесса). Однако все же возникает сомнение в том, что эффект охлаждения смеси перед самовоспламенением связан исключительно с выделением свободной воды, выполняющей роль инертного теплопоглощающего тела. Действительно, прежде чем произойдет высвобождение заметного количества воды и тем более ее испарение, обязательно испарится и начнет реагировать значительная часть легких фракций топлива, которые, собственно, и обеспечивают воспламенение смеси в целом. А увеличение начального угла раскрытия струи приводит к тому, что из-за различия аэродинамического сопротивления ее головной части дальность струи ВТЭ становится ниже, чем безводного топлива. Благодаря такой деформации формы струи ВТЭ (фактор ее укорочения значительнее фактора расширения [30]) ее объем в соответствующие моменты времени оказывается меньшим по сравнению с чистым топливом. В результате снижается удельное теплосодержание смеси, т.е. запас тепловой энергии воздушного заряда, приходящийся на единицу массы впрыснутого топлива, и, таким образом, наблюдается возрастание ПЗВ.

То, что влияние указанного фактора, сводящегося к изменению геометрических характеристик струи, имеет действенное значение при воспламенении топливовоздушной смеси, подтверждается тем, что по таким же в конечном счете причинам возрастает τ_i при падении исходного давления в среде, что отображено и на рис. 2, и в других подобных случаях [22, 24] как верообразная необходимость высокотемпературных лучей зависимостей $\tau_i(T_0)$. Правда, в данном случае возрастание угла расширения струи и снижение ее дальности связаны с увеличением плотности среды при более высоком давлении в ней [26], хотя повышение теплосодержания воздушного заряда при этом оказывается более эффективным.

Высказанные соображения, однако, не означают, что из физических механизмов, оказывающих влияние на самовоспламенение смеси, следует полностью исключить тепловые потери на парообразование. Возможно, что и этот процесс, и кавитационное распыление топлива, интенсифицированное его эмульгированием, действуют параллельно. Но степень значимости каждого из них пока не определена.

Таким образом, основные результаты работы можно сформулировать следующим образом. Обоснован и предложен к рассмотрению физический механизм воздействия эмульгированной в углеводородном топливе воды на процесс самовоспламенения водотопливно-воздушной смеси. Он заключается в том, что при эмульгировании резко падает динамическая прочность топлива на разрыв, что приводит к усилению разброса жидкости при выходе ее сопла форсунки при импульсном высоконапорном впрыске. В результате этого меняется форма струи смеси, поступающей в нагретую газовую среду, что в определенных условиях может оказать существенное влияние на характер воспламенения. Практически все из полученных экспериментальных результатов находят свое объяснение с позиций рассмотренного кавитационного механизма диспергирования струи ВТЭ, который не исключает действия и других известных механизмов, обеспечивающих физико-химические свойства ВТЭ как альтернативного топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cornet I., Nero W.E. Emulsified Fuels in Compression Ignition Engines // Ind. Eng. Chem. — 1955. — 47, № 10. — P 2133.
2. Иванов В.М. Топливные эмульсии. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 216 с.

3. Агаева Ф.М. Применение эмульсии в двигателях с воспламенением от сжатия // Изв. АН АзССР. Сер. физ.-мат. и техн. наук. — 1961. — № 6. — С. 57.
4. Сергеев Л.В. Исследование работы дизеля на водотопливных эмульсиях // Изв. вузов. Машиностроение. 1965. — № 12. — С. 57.
5. Иванов В.М., Сергеев Л.В. Применение топливоводяных эмульсий в двигателях внутреннего сгорания // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. — М.: Наука, 1965. — С. 162.
6. Петров В.Н. Применение топливоводяных эмульсий в дизелях и некоторые вопросы экономики // Дизельные и электрические судовые установки. — Л.: Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1967. — Вып. LXI. — С. 111.
7. Лебедев О.Н. Некоторые особенности горения капель водотопливных эмульсий в дизелях // ФГВ. — 1978. — 14, № 2. — С. 142.
8. Лебедев О.Н., Марченко В.Н. Исследование процессов испарения и сгорания капель эмульгированного моторного топлива // Двигателестроение. — 1979. — № 12. — С. 26.
9. Исаков А.Я. Некоторые особенности микровзрыва капли водотопливной эмульсии // ФГВ. — 1985. — 21, № 1. — С. 125.
10. Герасимов А.Т., Травкин Ю.В. Применение водотопливной эмульсии для снижения токсичности дизельного двигателя // Изв. вузов. Лесной журнал. — 1992. — № 2. — С. 63.
11. Воржев Ю., Гимбутис К. Водотопливные эмульсии для судовых дизелей // Морской флот. — 1993. — № 12. — С. 44.
12. Шепельский Ю.Л., Тузов Л.В., Русакова Л.Н. Некоторые задачи приготовления эмульсий на основе вязких топлив // Двигателестроение. — 1989. — № 12. — С. 51.
13. Гладков О.А., Данчиков В.В., Закржевский В.П. Повышение эффективности использования водотопливных эмульсий в высокооборотных дизелях // Тез. докл. на Всесоюз. науч.-техн. конф. «Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания». — Киров, 1988. — С. 130.
14. Неудакин В.И., Назаров И.П., Простов В.Н. Влияние состава водно-бензиновой эмульсии на содержание окиси азота // Изв. вузов. Машиностроение. — 1978. — № 3. — С. 171.
15. Galloway W. Emulsifying residual-fuel-oil before burning cuts nitrogen — oxides emulsions // Chem. Eng. — 1988. — 29, № 15. — Р. 19.
16. Заводов В.С., Тайбер Е.Р. Работа двигателя внутреннего сгорания ЗИЛ-375 на водно-бензиновых эмульсиях // Тез. докл. II Всесоюз. конф. по технолог. горению. — Черноголовка, 1978. — С. 157.
17. Гладков О.А., Бернштейн Е.В., Виноградов Д.П. Характер воздействия водотопливной эмульсии на процессы сгорания топлива в дизеле // Двигателестроение. — 1989. — № 10. — С. 10.
18. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Сисин В.Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. — Л.: Судостроение, 1988. — 108 с.
19. Воржев Ю.И., Гимбутис К.К. Об использовании водотопливных эмульсий в судовых дизельных установках // Судостроение. — 1985. — № 7. — С. 18.
20. Воржев Ю.И. Применение водотопливных эмульсий в судовых дизелях // Двигателестроение. — 1986. — № 12. — С. 30.
21. Смайлик В.И., Новиков Л.А., Вольская Н.А. Исследование смесеобразования в дизелях при впрыске топлива и ВТЭ на его основе // Тез. докл. на Всесоюз. науч.-техн. конф. «Альтернативные топлива в двигателях внутреннего сгорания». — Киров, 1988. — С. 122.
22. Баев В.К., Бажайкин А.Н., Болдырев И.В. и др. Задержка воспламенения бензина при впрыске в модель камеры сгорания дизеля // ФГВ. — 1981. — 17, № 2. — С. 28.
23. Семенов В.И. Исследование индикаторного периода задержки воспламенения быстроходного многотопливного дизеля с камерой в поршне // Изв. вузов. Машиностроение. — 1970. — № 1. — С. 81.
24. Гершман Н.И. Воспламенение и горение дизельного топлива в зависимости от качества его распыливания: Тр. науч.-техн. конф. «Сгорание и смесеобразование в дизелях». — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 52.
25. Баев В.К., Бажайкин А.Н., Болдырев И.В. и др. Начальная стадия развития топливного факела, выброшенного из форсунки под большим давлением // ФГВ. — 1979. — 15, № 1. — С. 26.
26. Баев В.К., Бажайкин А.Н., Бузуков А.А., и др. О кумулятивном механизме развития высоконапорной топливной струи // Двигателестроение. — 1981. — № 2. — С. 5.
27. Степанов В.Г., Сипилин П.М., Навагин Ю.С., Панкратов В.П. Гидровзрывная штамповка элементов судовых конструкций. — Л.: Судостроение, 1966. — 291 с.
28. Бузуков А.А., Тесленко В.С. Начальная скорость подъема купола воды при подводном взрыве сферического и шнурового зарядов // ФГВ. — 1970. — 6, № 2. — С. 253.
29. Briggs L.J. Limiting Negative Pressure of Water // J. of Appl. Phys. — 1950. — 21, № 7. — Р. 721.
30. Лышевский А.С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. — М.: ГосНИТИ машиностроят. лит-ры, 1963. — 179 с.

630090, г. Новосибирск,
ИТПМ СО РАН

Поступила в редакцию
3/XI 1993