

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ И СГОРАНИЕ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПРИ ВПРЫСКЕ ЕЕ В НАГРЕТЫЙ ВОЗДУХ. II. ПЕРИОД ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МАЗУТА М-40*А. А. Бузуков; Б. П. Тимошенко**Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
630090 Новосибирск*

Экспериментально изучено влияние степени эмульгирования водю мазута М-40, подогретого до температуры кипения воды, на период самовоспламенения при импульсном высоконапорном впрыске в горячий воздух. Показано, что присадка воды не меняет химизма реакции, а подогрев водотопливной эмульсии ведет к стиранию различий в характере воспламенения эмульсии и безводного топлива. Подтверждена решающая роль условий смесеобразования на особенности самовоспламенения. Получены косвенные свидетельства того, что на процесс первичного диспергирования струи при выходе ее из сопла распылителя активно влияет динамическая прочность жидкости на разрыв.

До настоящего времени не ослабевает интерес к исследованию возможностей и целесообразности использования водотопливных эмульсий (ВТЭ) в двигателях внутреннего сгорания в целях повышения их экономичности и экологических характеристик. При этом определенные успехи достигнуты в ходе натурных испытаний [1–6], а в процессе поисковых исследований разработано несколько физических моделей, описывающих поведение ВТЭ как физико-химического тела в условиях, характерных для камер сгорания двигателей и, в частности, дизелей [1, 2, 7–10]. Наиболее широкое распространение получила модель теплового микровзрыва глобул воды в каплях распыленной эмульсии [7, 8, 11–13], который, по мнению некоторых исследователей, приводит не только к высвобождению воды для последующего ее участия в реакции, но и механическому разбрасыванию сердцевины струи [1, 9, 11]. Тем самым изменяется структура потока, а с ней и характеристики воспламенения смеси.

При исследовании особенностей смесеобразования и тепловыделения, связанных с использованием ВТЭ в дизелях, сравнительно небольшое внимание уделялось мазутам как базовому топливу, хотя, кроме упомянутых положительных характеристик ВТЭ на его основе, интерес к ним возрос в связи с тем, что практически без ухудшения экономичности эмульгированным мазутом можно частично заменить более легкие и дорогие дизельные топлива [1, 14], а также использовать эмульгированные высокосернистые мазуты без увеличения содержания вредных примесей в отработавших газах [14].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов, в которых изучалось влияние степени эмульгирования мазута марки М-40 (массовое содержание воды $c = 0 \div 30$ %) на период задержки воспламенения τ_i при импульсном высоконапорном впрыске его в бомбу постоянного объема, заполненную сжатым нагретым воздухом. В первой части исследования [15], где в качестве основного топлива использовалось дизельное марки ДЛ, показано, что при его эмульгировании в зависимости от впрыскиваемой дозы величина τ_i может как увеличиваться, так и уменьшаться. Для объяснения этого и других особенностей воспламенения предложена модель развития струи топливовоздушной смеси, в которой элемент эмульги-

рования является одним из главных физических факторов, определяющих формообразование струи. Но в отличие от схемы, в соответствии с которой происходят дополнительное дробление капель ВТЭ и разбрасывание материала вследствие вскипания и теплового микровзрыва мельчайших глобул воды, здесь предполагается, что изменение структуры струи смеси осуществляется через кавитационный механизм. Он заключается в том, что угол радиального разлета струи жидкости вследствие кавитационного разрушения сразу же при выбросе ее из сопла распылителя определяется не только давлением впрыска и условиями в окружающей среде, но и динамической прочностью жидкости на разрыв, так как именно она влияет на скорость движения «отколовшихся» слоев материала после прохождения волны разгрузки. Наличие в струе истекающего из сопла топлива инородных включений в виде микрокапель воды существенно снижает усилие, требующееся для нарушения сплошности потока, поэтому изначально струя ВТЭ имеет больший угол раскрытия, чем струя безводного топлива. Соответственно и смесеобразование в этих случаях идет по-разному. Прямое экспериментальное подтверждение этого явления представлено в [16].

Очевидно, что кавитационное дробление и разбрасывание струи не исключают и теплового микровзрыва. Однако последний реализуется в отдельных участках уже сформировавшейся струи лишь через определенное время, требующееся для прогрева смеси. Кроме того, и сам процесс выделения свободной воды растянут во времени [17]. Поэтому можно допустить, что в условиях импульсного впрыска топлива наличие в нем эмульгированной воды оказывает основное влияние на воспламенение и начальные стадии горения через механизм кавитационного разрушения струи, а на горение в основной стадии — через механизм теплового высвобождения воды при переходе ее в парообразное состояние. Именно с указанных позиций рассматриваются приведенные ниже результаты.

Следует отметить, что полученный материал не является дополнением к опубликованному в [15], лишь расширяя круг испытываемых топлив. Действительно, по сравнению с использовавшимся в [15] дизельным топливом в данном случае в камеру сгорания впрыскивается мазут и ВТЭ на его основе, но подогретые до 100 °С, т. е. микровзрыв глобул воды, если он имеет место, происходит на более ранней стадии процесса смесеобразования, а последующие тепловые потери на парообразование остаются такими же. Поэтому эмульгирование топлива в случае его подогрева в соответствии с версией микровзрывов должно в значительной степени сказаться на воспламеняемости смеси. И наоборот, принятие кавитационного механизма диспергирования топлива в качестве ведущего предполагает, что нагрев как топлива, так и ВТЭ на его основе ведет к стиранию различий между ними, так как динамическая прочность жидкости на разрыв при нагреве резко снижается и характер воспламенения в таком случае оказывается в меньшей степени зависящим от степени эмульгирования топлива.

Подробное описание установки и методики эксперимента изложено в [15, 18]. Отличительной особенностью в данном случае являлось то, что и безводный мазут, и ВТЭ подогревались в водяной бане до температуры кипения воды и в таком состоянии подавались к форсунке по теплоизолированной топливоподающей магистрали. Для экспериментов было выбрано два режима единичного [15, 18] впрыска с малой и большой цикловыми подачами. Для безводного топлива они составляли 40 и 100 мг, а для ВТЭ масса впрыскиваемого материала (в целях сохранения количества энергоносителя постоянным) увеличивалось до 44, 48 и 52 мг или 110, 120 и 130 мг при $c = 10, 20$ и 30% соответственно. Точность дозировки удерживалась на уровне 2%.

На рис. 1 приведены осциллограммы давления p_f в топливной системе для различных режимов впрыска и давления p_v в камере сгорания, а также указан принцип определения τ_i . Изменение цикловой подачи производилось, как это обычно осуществляется в дизелях, за счет изменения рабочего хода плунжера топливного насоса, т. е. в основном за счет изменения длительности впрыска. Но это, как следует из рис. 1, а, ведет к некоторому изменению амплитудного давления впрыска. Но его начальная стадия во всех случаях одинакова.

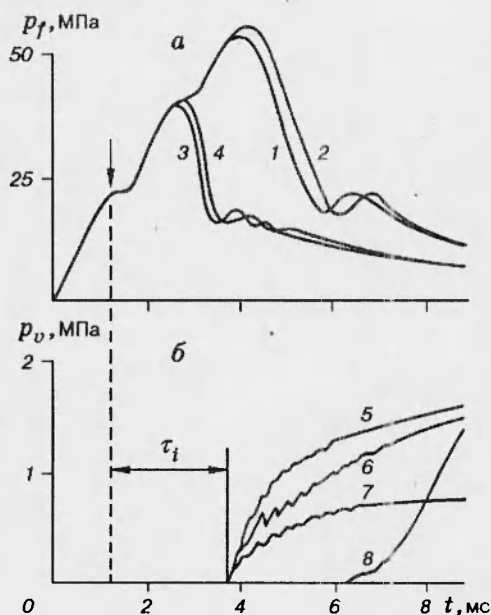


Рис. 1. Эпюры давления в топливной системе (а) и камере сгорания (б) ($p_0 = 4,9$ МПа, $T_0 = 800$ К) при впрыске дозы безводного топлива, мг: 40 (3, 7), 100 (1, 6); ВТЭ ($c = 20\%$), мг: 48 (4), 120 (2, 5), 8 — 120 при $T_0 = 750$ К.

лом, разделяющий низко- и высокотемпературные ветви. Для безводного топлива τ_i зависит от впрыскиваемой дозы, причем переход от малой цикловой подачи к большой на графиках отражается как плоскопараллельный сдвиг зависимостей в сторону увеличения τ_i во всем температурном диапазоне (см. рис. 2, 1, 2). В низкотемпературной области зависимости $\tau_i(T_0)$ при изменении p_0 и дозы впрыскиваемого топлива имеют одинаковый наклон и, согласно [15, 18], по нему может быть определена эффективная энергия активации, характеризующая процесс воспламенения. В данном случае она составляет 110 ± 10 кДж/моль (для топлива ДЛ она равна 78 ± 5 кДж/моль [15]). Высокотемпературные ветви зависимостей при изменении давления в среде располагаются на графиках веерообразно: наклон линий растет с возрастанием p_0 . Поэтому определение эффективной энергии активации по данным экспериментов здесь принципиально несостоятельно. Следующий вывод заключается в том, что эмульгирование топлива ведет к увеличению τ_i . На графиках оно выглядит как плоскопараллельное смещение низко- и высокотемпературных ветвей зависимостей, тем большее, чем выше содержание воды в ВТЭ при соответствующем давлении среды (зависимости 3, 4, 5). И, наконец, значения τ_i при впрыске больших доз ВТЭ оказываются практически такими же, как и при впрыске малых.

Все описанные закономерности воспламенения в значительной степени связаны с динамикой смесеобразования, зависящей и от режима впрыска, и от условий в среде. Но количественные изменения, наблюдающиеся при замене холодного эмульгированного топлива ДЛ на подогретую водомазутную эмульсию непосредственно касаются лишь двух

также указан принцип определения τ_i . Изменение цикловой подачи производилось, как это обычно осуществляется в дизелях, за счет изменения рабочего хода плунжера топливного насоса, т. е. в основном за счет изменения длительности впрыска. Но это, как следует из рис. 1, а, ведет к некоторому изменению амплитудного давления впрыска. Но его начальная стадия во всех случаях одинакова.

На рис. 2 приведены полученные зависимости τ_i от T_0 . На графиках значения τ_i отложены в логарифмическом масштабе, а шкала температур линейна относительно обратной исходной температуры воздуха в камере сгорания. Результаты экспериментов качественно соответствуют выводам предыдущей серии, когда в опытах использовалось дизельное топливо ДЛ и ВТЭ на его основе [15], т. е. все зависимости имеют обычный характер [18]: при $T_0 = 720-750$ К наблюдается из-

последних выводов из перечисленных выше, так как именно они определяются наличием в топливе инородных включений, лимитирующих его диспергирование при истечении из сопла распылителя. Действительно, из рис. 2, а-в видно, что значения τ_i в диапазоне низких температур при $c = 10\%$ (зависимости 3) или близки к полученным для безводного мазута ($p_0 = 3,3$ МПа), или даже ниже их ($p_0 = 4,9$ или $6,5$ МПа), а в высокотемпературном диапазоне они сравниваются. Для ВТЭ с более высоким содержанием воды (20 или 30%) зависимости $\tau_i(T_0)$ лежат выше опорных, но это превышение проявляется все же в значительно меньшей степени, чем при использовании холодной ВТЭ [15] даже при более низком значении c .

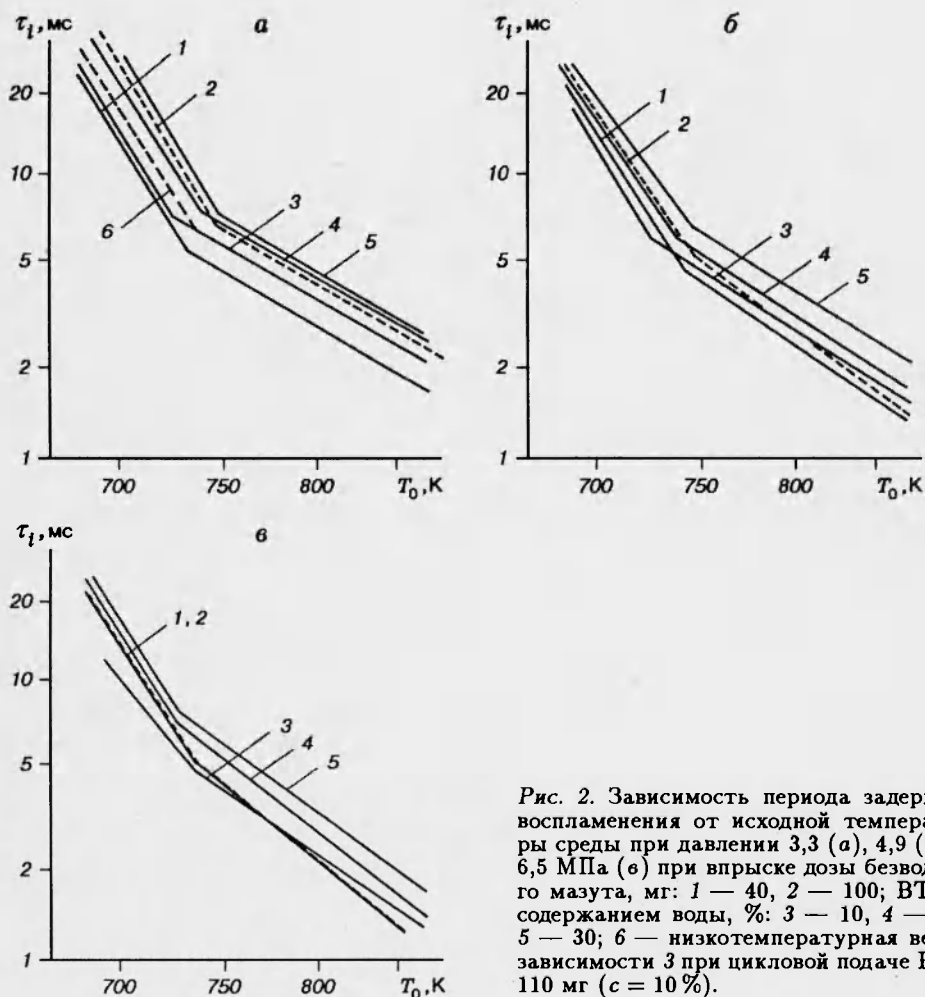


Рис. 2. Зависимость периода задержки воспламенения от исходной температуры среды при давлении 3,3 (а), 4,9 (б) и 6,5 МПа (в) при впрыске дозы безводного мазута, мг: 1 — 40, 2 — 100; ВТЭ с содержанием воды, %: 3 — 10, 4 — 20, 5 — 30; 6 — низкотемпературная ветвь зависимости 3 при цикловой подаче ВТЭ 110 мг ($c = 10\%$).

Объясняется полученный результат следующим образом. При впрыске подогретой ВТЭ (в данном случае на основе мазута) для глобул воды, нарушающих целостность основного материала, облегчается процесс вскипания и расширения, т. е. нагрев как бы улучшает условия для кавитационного взрыва струи при ее разгрузке. Но, с другой стороны, и сама динамическая прочность базовой жидкости с ростом температуры резко падает [19]. Отсюда получается, что и без эмульгирования процесс разрушения горячей или газонасыщенной струи [20] идет более интен-

сивно, чем холодной, поэтому влияние эмульгирования на формообразование струи оказывается менее заметным. Таким образом, данные экспериментов подтверждают сформулированные выше соображения о том, что при подогреве влияние эмульгирования топлива на процесс воспламенения ослабевает или вообще исчезает. При этом можно допустить, что некоторый рост τ_i при высоких значениях s связан с падением содержания топливного компонента в струе, механически замещенного водой, и соответственно со снижением скорости накопления активных центров, обеспечивающих воспламенение [21].

Рассматриваемая концепция дополнительно поддерживается следующими наблюдениями. Одним из проявлений кавитационного механизма формообразования струи при холодном впрыске служило то, что существенное изменение дозы безводного топлива приводит к значительному смещению зависимости $\tau_i(T_0)$, а при переходе на ВТЭ этот эффект исчезает [15]. Результаты настоящих экспериментов показывают, что при горячем безводном впрыске также наблюдается зависимость τ_i от цикловой подачи, но в существенно меньшей степени. А при $p_0 = 6,5$ МПа она практически исчезает (зависимости 1, 2 на рис. 2,б). При переходе же на ВТЭ, наоборот, при $p_0 = 3,3$ МПа различия в значениях τ_i сохраняются (ветвь б зависимости 3 на рис. 2,а), т. е. в рассматриваемом примере снижается степень влияния добавки воды на процесс самовоспламенения топливовоздушной смеси.

Основные результаты исследования с учетом [15] заключаются в том, что на начальной стадии процесса воспламенения ВТЭ вода практически не участвует как химический реагент. А ее свойства как инертного теплоотводящего тела могут проявляться лишь при больших s и в тех условиях, когда происходит ее массивное и быстрое высвобождение (высокие температуры среды), в том числе и через механизм микровзрывов. Основное же влияние эмульгирования топлива заключается в интенсификации кавитационного разрушения струи при выходе ее из сопла распылителя и соответственно с этим в изменении концентрационных характеристик распределения топлива в струе.

Следует отметить, что и результаты данных экспериментов, и представленные в [15] лишь косвенным образом свидетельствуют о действенности рассматриваемого механизма, определяющего влияние эмульгированной в топливе воды на его воспламеняемость. Результаты прямых экспериментов, подтверждающих описанную физическую модель, приведены в [16, 22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев О. Н., Сомов В. А., Сисин В. Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1988.
2. Гладков О. А., Бернштейн Е. В., Виноградов Д. П. Характер воздействия водотопливной эмульсии на процессы сгорания топлива в дизелях // Двигателестроение. 1989. № 10. С. 10-12, 33.
3. Тузов Л. В., Викторов В. П., Горбачев Ю. А., Иванченко А. А. Эффективность работы главных судовых двигателей с пониженной частотой вращения при работе на водотопливных эмульсиях // Двигателестроение. 1989. № 11. С. 41-42.
4. Школьный А. А., Семенов Б. Н. Применение водотопливных эмульсий в дизелях // Актуальные проблемы развития двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок: Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. Л.: Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1990. С. 32-33.
5. Герасимов А. Т., Травкин Ю. В. Применение водотопливной эмульсии для снижения токсичности дизельного двигателя // Изв. вузов. Лесн. журн. 1992. № 2. С. 63-67.

6. Малов Р. В., Пекшев В. В. Эмульгирование топлива и экологические характеристики дизеля // *Автомоб. пром-сть*. 1992. № 8. С. 15–18.
7. Лебедев О. Н., Марченко В. Н. Исследование процесса испарения и сгорания капель эмульгированного моторного топлива // *Двигателестроение*. 1979. № 11. С. 26–27.
8. Воржев Ю. И. Применение водотопливных эмульсий в судовых дизелях // *Двигателестроение*. 1986. № 12. С. 30–33, 35.
9. Егоров В. Г., Загоровский В. В., Сисин В. Д. Об особенностях сгорания водотопливных эмульсий в дизелях // *Повышение эффективности судовых энергетических установок*. Новосибирск: Новосиб. ин-т инж. водн. трансп., 1989. С. 11–15.
10. Петриченко И. Н. Исследование сгорания водотопливной эмульсии мазута в бомбе постоянного объема // *Энергетические установки речных судов*. Новосибирск: Новосиб. ин-т инж. водн. трансп., 1991. С. 68–73.
11. Лебедев О. Н. Некоторые особенности горения капель водотопливных эмульсий в дизелях // *Физика горения и взрыва*. 1978. Т. 14, № 2. С. 142–145.
12. Приходько А. М. Феноменология микровзрыва капли эмульгированного топлива // *Изв. вузов. Машиностроение*. 1980. № 4. С. 74–76.
13. Исаков А. Я. Некоторые особенности микровзрыва капли водотопливной эмульсии // *Физика горения и взрыва*. 1985. Т. 21, № 1. С. 125–126.
14. Сергеев Л. В. Исследование работы дизеля на водотопливных эмульсиях // *Изв. вузов. Машиностроение*. 1965. № 12. С. 57–61.
15. 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.
16. Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Диспергирование высоконапорной струи водотопливной эмульсии // *ПМТФ*. 1995. Т. 36, № 2. С. 106–111.
17. Малов Р. В. К вопросу о механизме внутрикапельного распыливания эмульсий // *Двигателестроение*. 1991. № 4. С. 12–13.
18. 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.
19. Гавриленко Т. П., Топчиян М. Е. Исследование динамической прочности воды на разрыв // *ПМТФ*. 1966. Т. 7, № 4. С. 172–174.
20. Виноградов В. Е., Кусков Г. В., Сеницын Е. Н. Распад струи газонасыщенной воды // *Теплофизика высоких температур*. 1994. Т. 32, № 1. С. 72–78.
21. Петров В. П. Применение топливоводяных эмульсий в дизелях и некоторые вопросы экономики // *Дизельные и электрические судовые установки*. Л.: Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1967. Вып. LXI. С. 111–117.
22. Бузуков А. А. Развитие струи водотопливной эмульсии в нагретой газовой среде // *Теплофизика и аэромеханика*. 1995. Т. 2, № 1. С. 79–88.

Поступила в редакцию 6/1 1994 г.