

УДК 621.436.019

**ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ВЫСОКОНАПОРНОЙ СТРУИ
ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ**

А. А. Бузуков, Б. П. Тимошенко

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

Один из радикальных путей повышения топливной экономичности дизельных двигателей и улучшения экологических характеристик их работы — использование водотопливных эмульсий (ВТЭ) [1]. Однако, несмотря на большое количество расчетных и экспериментальных исследований, физико-химический механизм влияния эмульгированной в топливе воды на процессы смесеобразования, воспламенения и сгорания в условиях, характерных для работы дизельного двигателя, во многом остается неясным. В частности, принято считать, что ведущим механизмом высвобождения воды и причиной дополнительного диспергирования капель ВТЭ при их нагреве является тепловой микровзрыв мельчайших водяных глобул [2, 3], который, по мнению некоторых исследователей, приводит и к механическому разбрасыванию сердцевин струи топливовоздушной смеси [1, 4]. Эти обстоятельства говорят о том, что эмульгирование топлива не только ведет к изменению химико-кинетических характеристик воспламенения и сгорания смеси, но и проявляется на стадии ее подготовки к воспламенению, оказывая влияние на процесс смесеобразования. Но оценки показывают, что реализация микровзрывного механизма возможна лишь при небольших статических давлениях в среде [3], а сам микровзрыв, если он и происходит, осуществляется с большим временем индукции, необходимым для прогрева капель ВТЭ, только после того, как значительная часть топлива испарилась [5]. Таким образом, возможность влияния эмульгирования топлива через механизм теплового микровзрыва глобул воды на процесс развития струи смеси, по крайней мере на начальной его стадии, оспаривается.

В [6] предложена альтернативная модель развития струи ВТЭ-воздушной смеси, которая рассматривает эмульгирование как один из физических факторов, способствующих увеличению угла конусности струи сразу же при истечении ее из сопла распылителя. Известно, что при высоконапорном впрыске жидкости в газовую среду на срезе сопла струя разгружается и кавитирует, изначально представляя собой поток достаточно плотно упакованных частиц [7]. В результате такого кавитационного разрушения целостности струи ее частицы наряду с продольной скоростью u_x приобретают и радиальную составляющую u_r (рис. 1, а), которая определяет корневой угол раскрытия газожидкостного потока.

Явление нарушения сплошности жидкости при быстрой разгрузке хорошо известно в физике ударных волн [8]. При этом скорость разлета поверхностных слоев (явление «откола») определяется разницей амплитуды сбрасываемого давления p_f и динамической прочности жидкости на разрыв σ_f . Существенно то, что в рассматриваемых условиях σ_f сравнима с интенсивностью нагрузки и, что особенно важно, сильно зависит от наличия в жидкости центров кавитации. Так, для очищенной и дегазированной воды σ_f может достигать 30 МПа [9], а для технической падает до 0,8 МПа [8]. Поэтому эмульгирование топлива, т. е. искусственное введение в его массу межфазных разрывов в виде глобул воды, приводит к интенсификации разрушения струи, увеличению скорости радиального разлета ма-

териала и соответственно к возрастанию угла конусности. Не исключено также, что распыляемая ВТЭ содержит капли более мелкого фракционно-го состава, чем безводное топливо. На рис. 1, б, в схематически изображен процесс диспергирования струи при впрыске безводного топлива и ВТЭ.

Для обоснования действенности фактора кавитационного разрушения струи и влияния энергетики этого процесса на ее форму целесообразно провести следующую оценку. Нетрудно подсчитать, что удельная кинетическая энергия продольного движения, сообщаемая топливу, выбрасываемому из сопла под давлением $p_f = 40$ МПа, составляет $\varepsilon_x = u_x^2/2 \sim 25$ кДж/кг. В практически интересных случаях корневой угол раскрытия струи обычно равен $10-12^\circ$ [10], откуда следует, что $u_r \sim 0,1u_x$. Тогда, принимая закон изменения u_r от радиуса струи линейным, получим, что удельная кинетическая энергия радиального движения жидкости $\varepsilon_r = u_r^2/4 \sim 0,15$ кДж/кг. В то же время удельная упругая энергия $\varepsilon_f = \alpha p_f^2/2\rho_f$, высвобождаемая при разгрузке жидкости и идущая на ее разрушение и разгон, равна $\sim 0,8$ кДж/кг (коэффициент изотермической сжимаемости керосинов $\alpha = -(dv/dp)/v$ составляет $0,8 \text{ ГПа}^{-1}$ [11]). Отсюда видно, что даже небольшое изменение работы, требующейся для разрушения сплошности жидкости, может повлиять на процесс формообразования струи через изменение u_r , но сравнительно мало через u_x . Таким образом, одним из критериев влияния эмульгирования топлива на характер кавитационного разрушения его струи может быть изменение именно ее корневого угла.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, в которых с помощью скоростной киносъемки производилось изучение геометрических характеристик струи безводного топлива или ВТЭ при импульсном высоконапорном впрыске их в газовую среду на самой начальной стадии этого процесса, т. е. заведомо до того, как может начать действовать микровзрывной механизм высвобождения воды.

Эксперименты проводились на установке, порядок работы которой подробно изложен в [7]. Бомба постоянного объема наполнялась азотом с температурой T_0 от 400 до 900 К и с исходным статическим давлением p_0 от 2 до 6 МПа. С помощью штатной дизельной форсунки закрытого типа, оснащенной распылителем с диаметром соплового отверстия $d_c = 0,25$ мм, под давлением от плунжерного насоса в камеру осуществлялся единичный импульсный впрыск дизельного топлива ДЛ или ВТЭ на его основе. Так как в распылителе форсунки установлен запорный игольчатый клапан, срабатывающий лишь при достижении давления в топливной системе 25 МПа, то фактически впрыск начинается и затем в течение 0,5 мс держится на этом же уровне. И только к середине впрыска (полная его длительность 2,5 мс) давление возрастает до 45 МПа. После этого давление начинает спадать и подача топлива прекращается.

Независимо от условий в рабочем объеме масса цикловой подачи безводного топлива была установлена 40 мг, а для ВТЭ с массовым содержанием воды S_m (%) в одних опытах она оставалась такой же, в других увеличивалась настолько, чтобы содержание энергоносителя во впрыскиваемой дозе оставалось постоянным. Это обеспечивалось регулированием длительности впрыска, но характер изменения давления в системе подачи

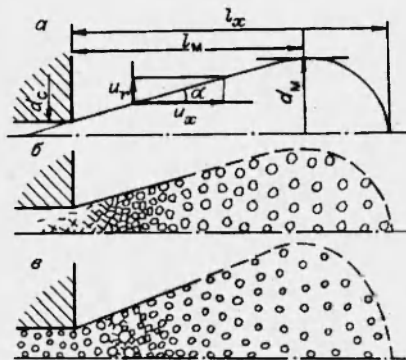


Рис. 1

топлива на стадии его нарастания во всех случаях был одинаковым и, как показали опыты, не зависел от наличия или отсутствия воды в топливе.

В экспериментах использовалась кинокамера СК-2 барабанного типа с призмным компенсатором, работавшая в ждущем режиме со скоростью съемки 5000 кадр/с. Полученное изображение развивающейся струи проецировалось на экран, где снимались следующие параметры (рис. 1,а): l_x — общая протяженность струи, d_m — диаметр струи в максимальном ее сечении, l_m — расстояние плоскости максимального сечения от среза сопла распылителя. Очевидно, что угол раствора струи α , зависящий от соотношения между радиальной u_r и продольной u_x скоростями движения распыливаемой жидкости, может без существенных погрешностей определяться отношением $d_m/2$ к l_m . Оценка, проведенная с учетом особенностей работы кинокамеры, показала, что точность приведенных ниже результатов по измерению угла конусности струи оказывается не хуже 10 %.

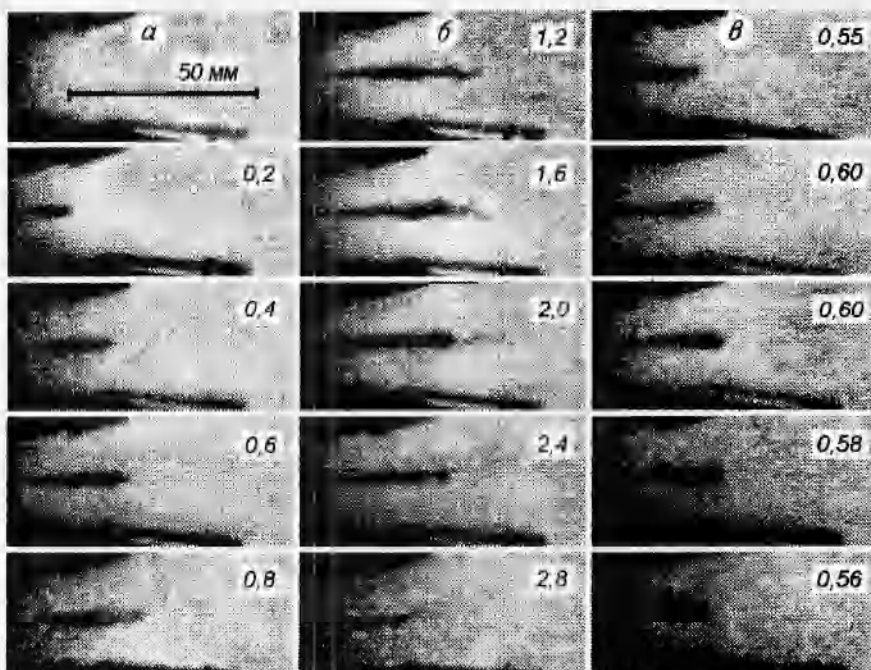


Рис. 2

При выполнении настоящего исследования зачетное измерение производилось по четвертому кадру от начала впрыска, т. е. в момент времени $t = 0,6$ мс. Указанный выбор момента измерений прежде всего связан с повышением их точности (относительная погрешность определения геометрических параметров струи падает при переходе от кадра к кадру). Кроме того, к этому моменту времени протяженность струи составляет 30–40 мм и уже прошла начальную и переходную стадии формирования своей головной части [7]. С другой стороны, струя еще не отошла от сопла на такое расстояние, на котором теряется ее конусоподобная форма и на

котором принятое определение угла α теряет корректность. Существенно также то, что к этому времени еще не проявляется микровзрывной механизм высвобождения воды, так как, согласно оценкам [12], при $t = 0,5$ мс не более 2 % массы впрыснутого топлива может испариться в условиях проводившихся опытов. Дополнительным доводом в пользу выбранного времени регистрации явилось то, что в топливной системе в течение этого периода впрыска поддерживается практически постоянное давление 25 МПа и режим истечения еще не меняется в связи с его дальнейшим нарастанием.

На рис. 2,а,б в качестве примера приведены кадры киносъемки процесса развития струи безводного топлива при впрыске в азот с давлением 4 МПа и температурой 900 К (на кадрах отмечено время в миллисекундах, прошедшее с начала впрыска). Из этой и аналогичных ей кинограмм при визуальном наблюдении следует, что процесс испарения наиболее подверженной тепловому воздействию головной части струи становится заметным лишь через 0,8–1 мс от начала впрыска. Этот факт в определенной степени подтверждает правильность выбора указанного выше методического подхода. На рис. 2,в представлены некоторые из кинокадров, служивших

объектом количественной обработки и отображающих процесс развития струи ВТЭ с массовым содержанием воды $C_M = 0, 5, 10, 20, 30$ %. Такая подборка снимков показывает, что струя ВТЭ выглядит более объемной, чем струя безводного топлива, причем это связано именно с ее уширением.

На рис. 3 приведены зависимости значений α , l_x , l_M (точки 1–3) от содержания воды в топливе для $p_0 = 4$ МПа, $T_0 = 900$ К. Что касается параметра, составляющего предмет исследования, т. е. корневого угла раскрытия струи, то можно видеть, что эмульгирование топлива приводит к возрастанию α на 35 % при изменении C_M от 0 до 10 %. А при дальнейшем увеличении C_M значения угла α несколько снижаются и стабилизируются на уровне, на 25 % превышающем α для безводного топлива. То, что наблюдаемое увеличение угла раскрытия струи однозначно связано с ее расширением непосредственно при истечении из сопла, подтверждают зависимости l_x и l_M от C_M , приведенные на этом же рисунке. Из графиков видно, что l_x и l_M в фиксированный момент времени практически не зависят от содержания воды в ВТЭ.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости α и l_x от температуры среды при фиксированном давлении $p_0 = 4$ МПа и от давления в бомбе при фиксированной температуре $T_0 = 900$ К для безводного топлива (точки 1,

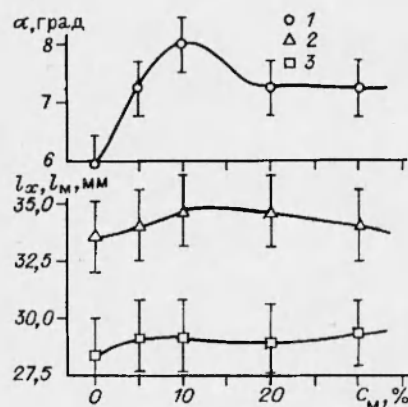


Рис. 3

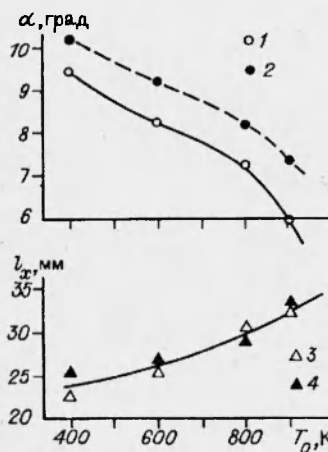


Рис. 4

3) и для ВТЭ 20 % (точки 2, 4). Результаты экспериментов показывают, что наблюдается характерное для таких условий [10] возрастание угла конусности струи и снижение ее протяженности с увеличением плотности среды. И если некоторые особенности изменения l_x от T_0 или p_0 при изменении параметров среды и C_m лежат в пределах экспериментального разброса, то для параметра α во всех случаях происходит систематическое его превышение при $C_m = 20\%$ (штриховая линия) над полученным для безводного топлива (сплошная). Особо следует отметить в этом плане случай со впрыском в холодный азот, когда испарительный механизм заведомо не работает (рис. 4).

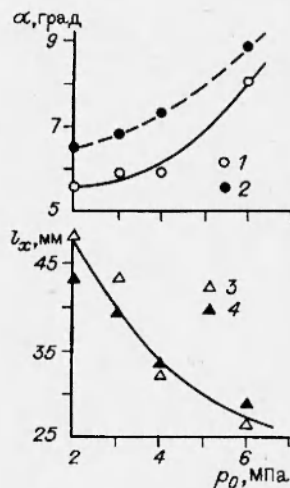


Рис. 5

При увеличении содержания воды до 20–30 %, возможно, происходит из-за существенного изменения реологических свойств жидкости — резкого возрастания (в 5–7 раз) коэффициента внутреннего трения [2], которое приводит к увеличению потерь и перестроению структуры внутрисоплового течения.

Детальное объяснение полученного количественного результата в настоящее время затруднено из-за недостатка информации для построения феноменологически обоснованной физической модели. Поэтому его следует рассматривать, скорее, как качественный, но важный при анализе процессов смесеобразования, воспламенения и сгорания ВТЭ в дизелях. Значимость указанного фактора, связанного с уширением струи ВТЭ-воздушной смеси, очевидна из следующей оценки. При возрастании угла конусности струи всего на 20 % (берем $\alpha \sim 6^\circ$) ее объем при той же протяженности увеличивается на 40 %. Следовательно, в соответствующие моменты времени средняя плотность топливного компонента в струе снижается уже более чем на 40 %, так как часть топлива замещена водой. Это, несомненно, приводит к существенному изменению характера воспламенения и начальной фазы горения смеси [6].

Основные выводы работы можно сформулировать следующим образом. Эмульгирование топлива ведет прежде всего к изменению динамики формообразования струи смеси, начинающемуся сразу же после выброса ВТЭ из сопла распылителя. При этом изменение характера смесеобразования при переходе на ВТЭ связано с увеличением корневого угла раскрытия струи, достигающим своего максимального значения 35 % при содержании воды 10 %. И уже во вторую очередь форма струи может меняться в связи

Таким образом, в результате экспериментов установлено, что высоконапорная струя эмульгированного топлива выходит из сопла распылителя под большим углом раскрытия, чем безводного. При этом никакими другими факторами, включая и тепловое воздействие, кроме такого внутреннего свойства ВТЭ, как изменение прочности на разрыв при внезапной разгрузке, объяснить этот феномен нельзя. Что же касается нелинейности зависимости угла конусности от содержания воды в топливе, то можно полагать, что возрастание α при изменении C_m от 0 до 10 % связано с увеличением количества межфазных разрывов, чем обеспечиваются более благоприятные условия для диспергирования жидкости. А снижение эффекта уширения струи при увеличении содержания воды до 20–30 %, возможно, происходит из-за существенного изменения реологических свойств жидкости — резкого возрастания (в 5–7 раз) коэффициента внутреннего трения [2], которое приводит к увеличению потерь и перестроению структуры внутрисоплового течения.

с тепловыми процессами, в том числе может осуществляться микровзрывной механизм высвобождения воды, выступающей в роли как инертного теплопроводящего тела, так и химического реагента. Причиной более интенсивного разброса струи ВТЭ при ее высоконапорном впрыске является снижение ее динамической прочности на разрыв при разгрузке за счет содержащихся в массе топлива большого количества межфазных разрывов в виде мельчайших глобул воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев О. Н., Сомов В. А., Сисин В. Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1988.
2. Иванов В. М. Топливные эмульсии. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
3. Исаков А. Я. Некоторые особенности микровзрыва капли водотопливной эмульсии // ФГВ. 1985. № 1. С. 125-126.
4. Лебедев О. Н. Некоторые особенности горения капель водотопливных эмульсий в дизелях // ФГВ. 1978. № 2. С. 142-145.
5. Малов Р. В. К вопросу о механизме внутрикапельного распыливания эмульсий // Двигателестроение. 1991. № 4. С. 12-13.
6. Бузуков А. А., Тимошенко Б. П. Самовоспламенение и сгорание водотопливной эмульсии при впрыске ее в нагретый воздух. I. Период задержки воспламенения моторного топлива ДЛ // ФГВ. 1994. № 4. С. 3-10.
7. Баев В. К., Бажайкин А. Н., Болдырев И. В. и др. Начальная стадия развития топливного факела, выброшенного из форсунки под большим давлением // ФГВ. 1979. № 1. С. 26-32.
8. Степанов В. Г., Сипилин П. М., Навагин Ю. С., Панкратов В. П. Гидровзрывная штамповка элементов судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1966.
9. Briggs L. J. Limiting negative pressure of water // J. Appl. Phys. 1950. V. 21, N 7. P. 721-722.
10. Лышевский А. С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. М.; Л.: Машгиз, 1963.
11. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы. Киев: Наук. думка, 1989.
12. Свиридов Ю. Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л.: Машиностроение, 1972.

*Поступила в редакцию 15/II 1994 г.,
в окончательном варианте — 26/IV 1994 г.*