

НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНОГО ФАКЕЛА, ВЫБРОШЕННОГО ИЗ ФОРСУНКИ ПОД БОЛЬШИМ ДАВЛЕНИЕМ

*В. К. Баев, А. Н. Бажайкин, И. В. Болдырев,
А. А. Бузуков, В. А. Терентьев, Б. П. Тимошенко*

(Новосибирск)

Несмотря на значительное количество теоретических и экспериментальных исследований, до настоящего времени не создано единой и достаточно хорошо согласующейся с практикой теории развития факела топлива, выбрасываемого под большим давлением, например, в условиях работы дизельного двигателя. В большинстве случаев исследователи проводят теоретические построения на базе упрощенных физических моделей явления и в каждом конкретном решении для получения расчетных зависимостей используют эмпирические связи между параметрами, характеризующими процесс, и определяют числовые значения коэффициентов. Кроме того, практически все модели описывают явление в квазистационарном приближении. Все это не позволяет рассматривать процесс во всей его полноте и получать обобщающие зависимости.

Можно указать несколько основных концепций, в соответствии с которыми строятся модели, описывающие развитие факела. Согласно одной из них, предполагается, что образование топливно-воздушной смеси происходит по механизму распространения свободной турбулентной струи [1] и используется соответствующая теоретическая база. Более совершенная, но по-прежнему стационарная схема представлена в [2], где в свободную струю вводится паровая и жидкая фазы. Распыленная топливно-воздушная струя сохраняет общее движение потока, расширяясь за счет поперечных компонентов скорости турбулентных пульсаций.

Согласно другому направлению, процесс развития факела топлива представляется как продвижение в газе комплекса капель, испытывающих аэродинамическое сопротивление [3]. Экспериментальные наблюдения [4] привели к созданию модели, в которой различаются так называемые зона фронта и зона шлейфа [5]. Фронтальная, более плотная, часть топливно-воздушной смеси перемещается в среде, принимая на себя усилия от аэродинамического сопротивления воздуха. Шлейфовая часть смеси движется за головной со скоростью впрыска и, испытывая в спутном потоке газа меньшее сопротивление, догоняет и непрерывно ее подпитывает. На основе таких представлений построена одномерная модель явления, описываемая уравнениями движения тела с переменной массой.

В работах [6, 7] установлено, что существенное значение могут иметь такие важные стороны явления, как эффекты кумулятивного взаимодействия струи распыленного топлива со средой [8] и особенности газодинамики топливно-воздушной смеси, связанные с изменением характера распространения волн сжатия по телу топливного факела [9, 10]. Однако законченного описания явления в указанной постановке в [6, 7] не приводится.

Ни в одной из указанных выше работ не принимаются во внимание процессы, идущие на самой начальной стадии развития факела, когда регулируется истечение топлива из сопла форсунки. Этот момент важен, так как именно у сопла форсунки формируется головная часть

струи, определяется конфигурация, распределение плотности жидкой фазы и т. д.

В настоящей работе описываются качественные результаты наблюдений с помощью микрофотографирования начальной стадии развития топливного факела — выхода первых порций топлива из сопла распылителя и прохождения ими начального участка пути.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема установки для микрофотографирования струи приведена на рис. 1. Топливо из резервуара 1 с помощью подкачивающей помпы 2 и плунжерного насоса 3 через нагнетательный клапан 4 подавалось в дизельную форсунку закрытого типа 9 с однодырчатым распылителем с диаметром сопла 0,3 мм. Эпюра давления в топливной системе записывалась на осциллографе С8-7А 5 с помощью стандартного пьезокварцевого датчика 8 типа ЛХ-600. Оптическая схема установки состояла из микроскопа 12 и фотоаппарата 11, позволявших получать изображение на 35-миллиметровой фотопленке с 20-кратным увеличением.

Для получения «стоп-кадра» в описываемых экспериментах в качестве подсвечивающего устройства использовался импульсный лазер ОГМ-20 с рубиновым активным элементом 13. При энергии излучения 0,24 Дж время действия светового импульса составляло около 30 нс. Синхронизация обеспечивалась подачей запускающего импульса на пульт управления лазером 14 от фотодиода 6 при прохождении перед ним отверстия в диске 7, жестко связанном с валом топливного насоса. Блок формирования и задержки импульса 15 позволял смещать время подачи сигнала на пульт управления лазером и тем самым осуществлять подсветку на требуемой стадии развития явления. С целью блокировки изображения от люминесценции, сопровождающей процесс взаимодействия лазерного излучения с веществом, перед объективом фотоаппарата был размещен фильтр 10 типа КС-10 с полосой пропускания свыше 0,7 мкм.

Попытки осуществить микрофотографирование топливного факела предпринимались ранее. Однако использование в качестве регистрирующего устройства относительно низкоскоростной кинокамеры СКС-1М [11, 12] не позволило регистрировать отдельные элементы струи в развитии. Действительно, при скорости движения частиц порядка 100 м/с расстояние в 1 мм перекрывается ими за время 10 мкс, в то же время экспозиция каждого кадра при работе с камерой СКС-1М составляет около 1 мс. В [13] основное внимание уделено отработке принципиальных методических основ применения голографии для регистрации быстротекающих процессов, но конкретной физической информации не приводится.

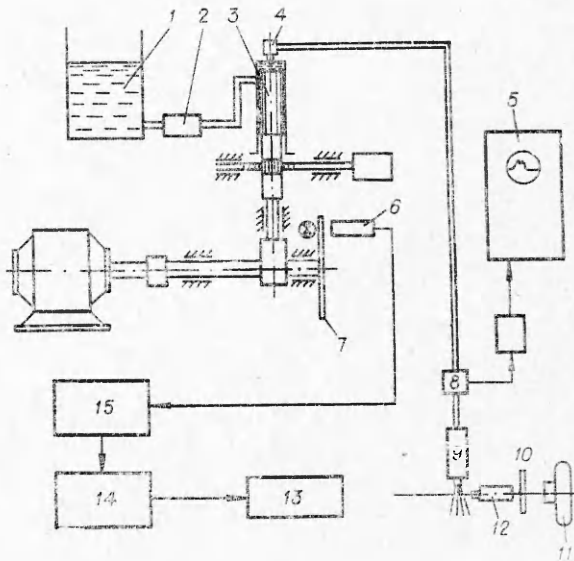


Рис. 1. Схема установки.

Применение лазерной подсветки в настоящей работе позволило получать единичные четкие микрофотографии элементов топливного факела даже при околосвуковых скоростях их движения. Во всех опытах использовалось зимнее дизельное топливо с плотностью $0,822 \text{ г/см}^3$. Впрыск его осуществлялся в воздух при нормальных условиях. Скорость вращения вала плунжерного насоса постоянна — 906 об/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2 приведена типичная осциллограмма давления в топливной системе перед форсункой. Начальная стадия развития топливного факела определяется в основном характером нарастания давления в жидкости перед распылителем. Измерения показали, что крутизна нарастания импульса давления составляет 470 атм/мс, а время полного нарастания давления до максимального (850 атм) — около 2 мс. На эюру давления накладывается сигнал с частотой 5—6 кГц, что обусловлено пульсациями стенок трубопроводов, подающих топливо к форсунке, возникающими при действии импульсной нагрузки. Однако непосредственно перед распылителем темп нарастания давления оказывается несколько ниже, так как топливо поступает в полость перед соплом через щелевые фильтры тонкой очистки. Кроме того, происходит демпфирование высокочастотных импульсов давления за счет деформаций топливоподающих коммуникаций и утечек в зазорах движущихся частей форсунки. Непосредственно перед соплом форсунки внутри нее находится игольчатый клапан, который начинает подниматься при достижении давления топлива около 100 атм. Поэтому истечение жидкости начинается не с момента начала подъема давления в системе, которое фиксируется датчиком давления, а на 40—50 мкс позже.

На рис. 3 приведена серия микрофотографий процесса выхода струи топлива из форсунки. Кадры не являются последовательными, снятыми при одном и том же впрыске. Но поскольку картина развития факела стабильно повторяется от опыта к опыту, на рис. 3 сделана подборка, отображающая характер этого процесса. На всех кадрах развитие струи идет слева направо. На первых семи слева видны контуры головки распылителя форсунки.

В первые несколько микросекунд с момента начала подъема клапанной иглы из сопла распылителя начинает выдавливаться топливо и накапливаться в виде капли диаметром, в 1,5—2 раза превышающим диаметр сопла (см. рис. 3, а). Через 20—30 мкс капля под действием выходящей с ускорением струи отрывается от поверхности распылителя (см. рис. 3, б, в), и в ней развивается течение, подобное тому, которое существует в кольцевом вихре [14]. Длительное существование жидкого кольцевого вихря в газе невозможно, так как силы, удерживающие жидкость в компактном виде, не могут воспрепятствовать ее разлету от действия центробежных сил при циркуляции. Для относительно крупных кольцевых вихрей (15—20 см диаметром) наблюдались случаи кратковременного их выхода в воздух при взаимодействии со сво-

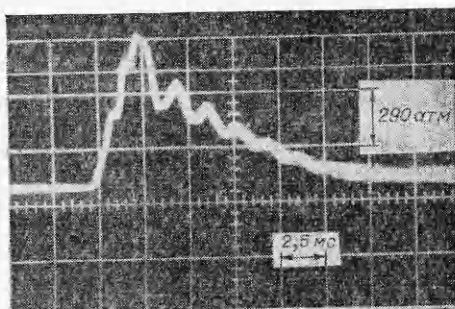


Рис. 2. Импульс давления в топливной системе. Чувствительность 290 атм/деление, масштаб времени 2,5 мс/деление. Масштаб на рис.

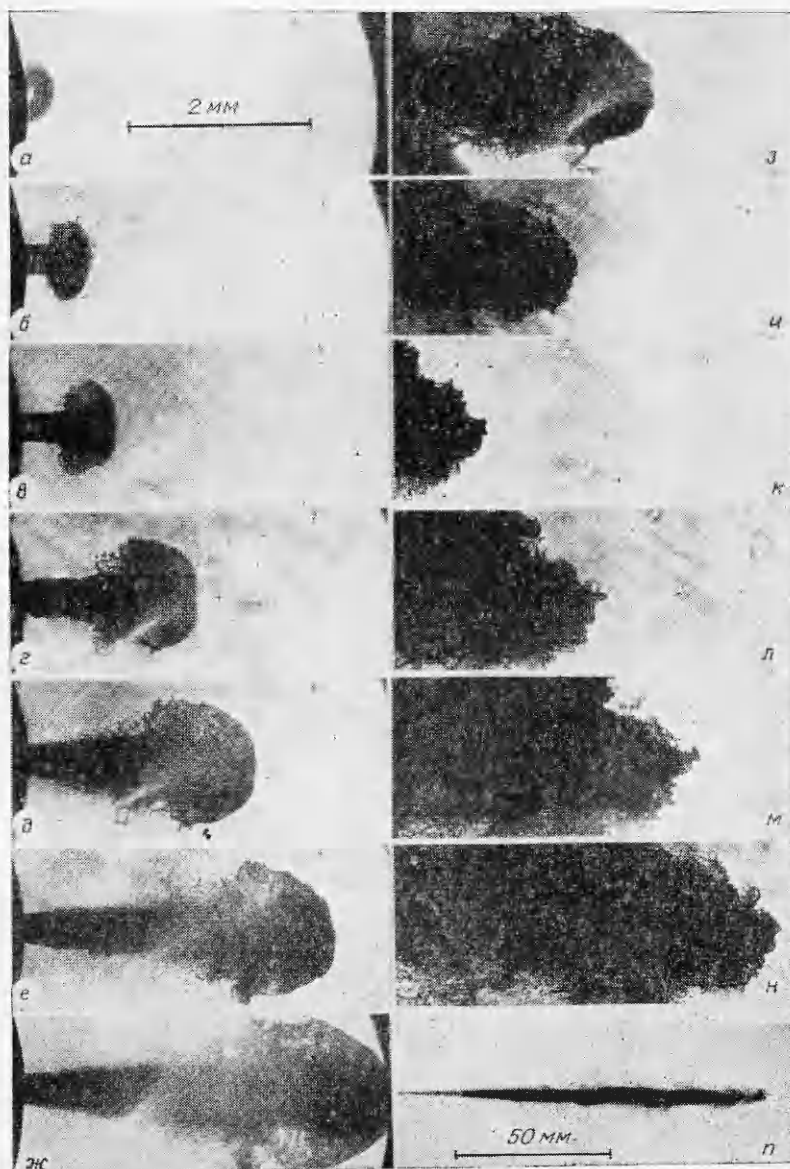


Рис. 3. Микрофотографии начальной стадии развития факела топлива при работе форсунки.

Время от момента начала подъема иглы форсунки, мкс: а — 10, б — 75, в — 130, д — 155, е — 190, ж — 215, з — 240, и — 325, к — 380, л — 390, м — 395, н — 400, п — 800. Фронтальная часть струи находится от среза сопла форсунки на расстоянии, мм: з — 4,5, и — 10,0, к — 18,8, л — 20,0, м — 20,9, н — 21,9, п — 120.

бодной поверхностью [15], причем распространялись они до разрушения не более чем на диаметр.

В рассматриваемом случае при диаметре тела вихря порядка 1 мм существенными стабилизирующими факторами могут служить силы поверхностного натяжения и вязкого трения. Поэтому возможно его распространение на большее расстояние. Однако в связи с тем, что скорость выхода струи из соплового отверстия продолжает нарастать, течение в головной части струи теряет свою вихревую структуру, струя пробивает фронтальное образование и формируется течение типа кумулятивного [8]. При достижении некоторой скорости истечения воз-

дух начинает оказывать струе достаточное сопротивление, и она пробивает его, оставляя вокруг пелену раздробленной жидкости (см. рис. 2—ж). Несмотря на то, что ко времени порядка 200 мкс струя выходит под давлением около 150 атм и дробится сразу же на выходе за счет разгрузки (отчетливо видно на рис. 3, 2—ж), пелена разбрасываемой в стороны жидкости остается целостной. Это происходит из-за подтормаживания фронтальных слоев раздробленной жидкости и их слипания.

Сопротивление среды пробивающему ее кумулятивному бою приводит на определенной стадии процесса к возникновению неустойчивости фронтальной поверхности, возникновению на ней стремительно нарастающих выпуклостей и провалов (см. рис. 3, 3—к), перфорации поверхности и окончательному ее разрушению. В дальнейшем наступает стадия хаотического характера продвижения головной части струи в воздухе (см. рис. 3, л—н).

Можно предположить, что разрушение гладкой поверхности струи происходит в результате развития неустойчивости Релея—Тейлора [16, 17], как и в случае разрушения капли жидкости, внезапно попавшей в высокоскоростной поток газа [18]. Для анализа такой возможности рассмотрим кинематические характеристики движения струи. Зная время задержки между сигналом, поступающим с фотодиода, и моментом подачи импульса напряжения на затвор лазера, можно построить зависимость пути, проходимого головной частью струи, от времени (рис. 4, 1). Путем графического дифференцирования кривой получена зависимость скорости продвижения головной части в воздухе (рис. 4, 2). Как видно, эта скорость непрерывно нарастает и в течение 400 мкс меняется от 10—15 до 250 м/с. Головная часть струи за это время проходит расстояние 20 мм и вплоть до момента полного разрушения движется с ускорением.

Однако полученные значения скорости относятся лишь к скорости перемещения точки контакта, массовая же скорость движения жидкости в струе превышает скорость распространения головной ее части и при втекании струи в головной слой происходит торможение жидкости, что является необходимым условием появления неустойчивости. И все же принять рассматриваемый механизм в качестве определяющего явления разрушения гладкой поверхности головной части струи нельзя, так как сомнительно развитие неустойчивости до степени разрушения слоя за тот короткий интервал времени, пока он находится в голове струи. Поэтому причиной разрушения поверхности в рассматриваемом случае, естественно, считать высокую степень раздробленности топливно-воздушной струи, втекающей в головную часть. На таком расстоянии от среза сопла форсунки топливо уже не коагулирует в сплошной слой.

Отдельные опыты, результаты которых здесь не приводятся, показывают, что хаотический характер продвижения головной части струи в воздухе при атмосферном давлении свойствен ей по крайней мере до расстояния 200 мм от форсунки (см. рис. 3, н) и, начиная с 15—20 мм от среза сопла, становится стационарным. Струя представляет собой мелкодисперсную динамическую топливно-воздушную структуру (характерный размер образований составляет несколько микрон), и последующие ее части, втекающие в головную зону, за-

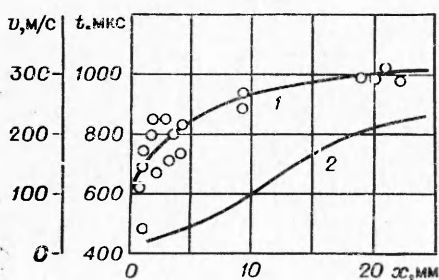


Рис. 4. Зависимость пути x и скорости v движения головной части струи от времени.

тормаживаются в ней, разбивают ее, разбрасывая частицы жидкости в стороны. В этом случае устанавливается динамическое равновесие между втекающей в головную часть струи массой топлива и расходом его в объем.

Накоплению жидкости в головной части струи и существенному изменению средней плотности топливно-воздушной смеси препятствует ее воздухонаполненность. В принципе эта часть процесса может быть описана как квазикумулятивное взаимодействие полидисперсной струи с преградой. Отличие этого процесса от классического кумулятивного состоит в том, что в непосредственное взаимодействие со средой вступает не монолитная струя, а отдельные бесформенные сгустки жидкости, выбрасываемые в зону взаимодействия. Там может происходить и их вторичное дробление и коагуляция, частично жидкость снова попадает в головную часть струи, частично с периферии струи уходит в стороны. В самой струе также идет непрерывное взаимодействие отдельных капель и струй раздробленной жидкости, что и приводит к образованию характерных выбросов как по ходу струи, так и в стороны от нее. Рассмотренное течение в значительной мере соответствует явлению распространения высоконапорных импульсных струй, получаемых с помощью импульсных водометов [19].

Таким образом, проведенные наблюдения показали, что механизм развития факела топлива, выбрасываемого под большим давлением из форсунки, меняется в процессе истечения струи из сопла и не может быть описан в терминах однозначной стационарной модели. Интересно, что стадии этого процесса качественно соответствуют последовательности механизмов, сменяющихся при распылении одиночных капель жидкости, подверженных действию высокоскоростного потока газа [18]. Поскольку установление хаотического стационарного характера продвижения головной части струи в воздухе происходит на расстоянии 15—20 мм от сопла, то для оценочных расчетов допустимо пренебречь теми изменениями в механизме взаимодействия струи со средой, которые происходят на самой начальной стадии процесса. За это время в объем поступает относительно небольшая доля всего впрыскиваемого топлива. Весь процесс в этом случае можно рассматривать как процесс кумулятивного взаимодействия струи со средой и расход ее массы, т. е. динамику создания топливно-воздушной смеси описывать по этой схеме. Существенную роль при этом должен играть учет значительно переменных продольных градиентов скорости движения участков струи, ее плотности и поперечных ее размеров.

Очевидно, что при существенно отличных от описываемых режимов нарастания давления в топливной системе, а также длительности его поддержания характер развития струи может оказаться иным и значимость тех или иных механизмов в процессе распыления топлива измениться.

*Поступила в редакцию
21/IV 1978*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Лышевский. Распыливание топлива в судовых дизелях. Л., «Судостроение», 1971.
2. О. Н. Лебедев. Тр. Новосибирского института инженеров водного транспорта. Вып. 55. Новосибирск, НИИВТ, 1970.
3. Г. А. Рассолько. Изв. вузов, «Машиностроение», 1967, 3, 50.
4. Ю. Б. Свиридов. Смесеобразование и сгорание в дизелях. Л., «Машиностроение», 1972.
5. А. З. Гриншпан, С. А. Романов, Ю. Б. Свиридов. Тр. ЦНИИ Топливн. аппаратуры. Вып. 64. Л., ЦНИТА, 1975.

6. В. И. Трусов, Л. Л. Иванов.— В сб.: Топливная аппаратура дизелей. Вып. 3. Ярославль, Ярославский политехнический институт, 1975.
7. В. И. Трусов, Л. Л. Иванов.— В сб.: Двигатели внутреннего сгорания. Ярославль, Ярославский политехнический институт, 1975.
8. М. А. Лаврентьев. Усп. мат. наук, 1957, 12, 4, 41.
9. Я. З. Клейман. ПММ, 1958, 22, 2, 197.
10. Г. М. Ляхов. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, 1, 46.
11. С. Г. Мухаметжанов, Б. И. Семенов. Ж. науч. и приклад. фотогр. и кинематогр., 1965, 5, 365.
12. Б. И. Семенов, М. Я. Завлин. Ж. науч. и приклад. фотогр. и кинематогр., 1975, 2, 85.
13. Э. В. Мороз, Н. С. Ханин. Изв. вузов. Машиностроение, 1976, 7, 95.
14. А. А. Бузуков. ПМТФ, 1971, 2, 153.
15. А. А. Бузуков.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 3. Новосибирск, ИГи СО АН СССР, 1969.
16. G. I. Taylor. Proc. Roy. Soc., 1950, A, 201, 192.
17. С. И. Анисимов, Я. Б. Зельдович. Письма в ЖТФ, 1977, 3, 20, 1081.
18. Б. Е. Гельфанд, С. А. Губин, С. М. Когарко. ИФЖ, 1974, 27, 1, 119.
19. В. П. Бородин, Б. В. Войцеховский. ПМТФ, 1965, 3, 100.

ВЛИЯНИЕ ОБТЕКАЮЩЕГО ПОТОКА НА ГОРЕНИЕ КАПЛИ МЕТАЛЛА

В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов, О. И. Лейпунский

(Москва)

В работах [1—3] предложена теория горения капли металла в неподвижном газе-окислителе. В реальных условиях, однако, горение капель металла практически всегда происходит при наличии обтекающего горящую каплю газового потока, причиной возникновения которого может быть движение горящих частиц, либо возникновение свободной конвекции, если горящая капля покоится. Поэтому возникает необходимость оценить влияние обтекающего потока на основные характеристики горения капель металла.

Обтекающий газовый поток может оказывать влияние как на структуру зоны горения вокруг капли металла, так и на количественные характеристики процесса сгорания: время сгорания, массу окисла, накапливающегося на поверхности капли металла в процессе сгорания¹. Определение влияния обтекающего потока на структуру зоны горения вокруг капли металла требует совместного рассмотрения уравнений тепло- и массообмена между поверхностью капли и окружающей средой и уравнений газодинамики обтекания капли. Такая задача представляет собой определенную трудность, связанную с учетом конденсации продуктов испарения капли металла в газе.

Оценка влияния газового потока на время сгорания капли металла и массу окисла, накапливающегося на поверхности капли, может быть сделана без рассмотрения газодинамической картины обтекания капли в приближении «приведенной пленки» [5]. Это приближение заключается в выборе некоторого слоя вокруг горящей капли, в котором происходит изменение температуры и концентраций. Предполагается, что вне этого слоя температура и концентрации соответствуют условиям в окружающей среде. Толщина «приведенной пленки» выбирается таким образом, чтобы чисто молекулярный перенос в ней обеспечивал истин-

¹ Влияние обтекающего потока на тепло- и массообмен испаряющейся капли было проанализировано в [4]. В нашем случае возникают обстоятельства не рассмотренные в [4].