

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ СТРУИ

В.Ю. Рудаков, инж.

Коломенский институт (филиал) Московского государственного открытого университета

Кинограммы топливной струи, полученные в холодной бомбе с разными режимами впрыска топлива показывают, что топливная струя имеет дискретное или близкое к дискретному продольное строение, сложенное из «сегментов». Такое строение струи определяется турбулентным течением топлива по каналу соплового отверстия и его дискретным распадом. При этом истечении форма струи принимает форму профиля скоростей.

На механизм распада топливной струи и ее строение существуют различные точки зрения. В работе [1] показано, что не распавшаяся струя топлива имеет очертания профиля скоростей, и с ее поверхности отрываются отдельные нити капель. Согласно точке зрения Свиридова Ю.Б. [2] струя распадается в плоскости, нормальной к оси распыливающего отверстия. Имеются и другие воззрения на этот процесс, например, изложенные в работах А.С. Лышевского и др. [3–5].

Продольное строение топливной струи представлено в [6, 7], где показано, что на ее оси концентрация распыленного топлива высока и образует так называемый «стержень». По мере удаления от «стержня» концентрация капель падает, образуя оболочку. Вдоль длины струи концентрация распыленного топлива распределена равномерно.

Практически на всех кинограммах, полученных на установке «Двигатель с прозрачными окнами» (ДПО) в режиме холодной статической бомбы [8], было отмечено неоднородное распределение распыленного топлива по длине струи. Такие же результаты получены исследованиями, выполненными за рубежом [9]. На основании изучения большого количества кинограмм процесса впрыска сложилось представление о механизме распада, структуре и взаимодействии элементов струи, приведенное в настоящей работе. Предлагаемая к рассмотрению гипотеза основана на материалах, полученных с помощью аккумуляторной электрогидравлической системы топливоподачи (АЭГСТ), гидроимпульсы впрыска которой, в отличие от полученных на штатных, гидромеханических системах (ГМСТ), имеют трапецеидальную форму. Тем не менее ряд особенностей развития топливных

струй, полученных с помощью АЭГСТ и ГМСТ, может быть общим.

Истечение струи. На кинограммах, приведенных в литературе [1, 10] и полученных на установке ДПО, видно, что профиль фронта струи даже на значительном удалении от соплового отверстия по своей конфигурации подобен профилю скоростей при истечении, что можно считать косвенным подтверждением схемы истечения, предложенной В.А. Ваншейдтом в [1]. Взаимодействие с потоком воздуха изменяет, но не является единственной причиной, определяющей форму профиля струи после истечения, так как уже при истечении струя принимает форму, снижающую величину аэродинамического сопротивления. Известны микрофотографии и кинограммы, на которых запечатлена нераспавшаяся за пределами соплового отверстия струя топлива. На некоторых из них видно, что профиль фронта струи подобен профилю скоростей в сопловом отверстии [4].

Распад струи. На рис. 1 представлена характерная для АЭГСТ осциллограмма давления впрыска. Буквами на ней отмечены наиболее значимые участки. Им соответствуют разные как по величине, так и по скорости нарастания давления впрыска, вызывающие различные режимы стадии истечения и распада струи. Наличие этих режимов связано с характером подъема иглы.

В самом начале впрыска (рис. 1, участок *А*) отмечены три характерных варианта нарастания давления. На рис. 2 они приведены в увеличенном масштабе. В первом случае отмечается плавный рост давления (рис. 2, *а*), переходящий затем в крутой линейный участок переднего фронта, где давление нарастает со скоростью 300–500 МПа/мс и более (участок *Б* на рис. 1). В другом случае игла резко отрывается от седла,

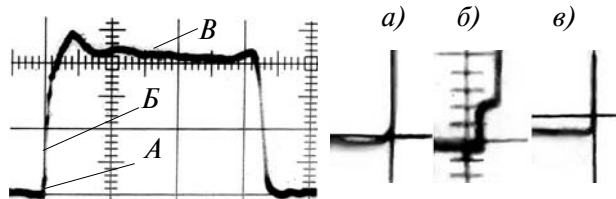


Рис. 1. Осциллограмма давления топлива перед распыливающим отверстием

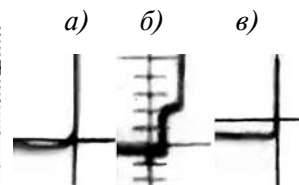


Рис. 2. Разновидности начала $p_{впр}$, вызванные отрывом иглы от седла

но поднимается невысоко, в связи с чем происходит ступенчатый скачок давления до величины 1–3 МПа (рис. 2, б).

Затем происходит полный и резкий подъем иглы и начинается впрыск, вызванный линейным участком переднего фронта. В третьем случае игла сразу поднимается на величину полного хода с соответствующим ростом давления (рис. 2, в). В первых двух случаях (рис. 2, а, б) в начале впрыска осевая скорость истечения невелика и струя распадается на крупные капли и фрагменты осесимметрично под воздействием волнообразных первичных (слабых) турбулентных пульсаций, характерных для малых скоростей истечения так, как это показано в [3]. Протяженность впрыска под действием начального фронта нарастания давления для АЭГСТ лежит в интервале 0,01–0,15 мс. В этот период фрагменты струи в виде крупных капель скапливаются перед сопловым отверстием на расстоянии до 10 мм. Здесь догоняющие элементы струи сталкиваются с предыдущими, разбивают их, коагулируют, снова дробятся. Проникающая способность струи в начале впрыска невелика, поэтому при взаимодействии элементов между собой и с плотным воздухом перед соплом образуется небольшое каплевидное облачко из крупных образований. При переходе процесса впрыска на участок резкого нарастания давления струя поглощает образовавшееся ранее облачко и с высокой скоростью движется дальше. В третьем случае (рис. 2, в) каплеобразного облачка перед соплом не образуется. Из сопла вылетает узкая иглоподобная струя, расширяющаяся в движении.

При достижении максимальной скорости нарастания давления струя переходит в турбулентный режим истечения. При этом следует различать два источника турбулизации. Первый, относительно слабый (первичный), возникает в системе питания дизеля до соплового отверстия. Поэтому к входной кромке сопла поток подходит уже турбулизированным. Второй, более сильный, возникает при течении топлива по каналу распыливающего отверстия.

В сопловом канале происходит турбулизация, вызванная трением жидкости о стенки и взаимным трением слоев топлива (вторичная). В связи с этим завихрения потока складываются двумя составляющими. Главной причиной распада является вторичная турбулентность.

Вытекающая из соплового отверстия струя нераспавшегося топлива достигает критической длины l_1 , величина которой зависит от соотношения скорости потока, сил, вызывающих распад струи, физических характеристик топлива и среды, в которую производится впрыск. Как только длина нераспавшейся струи превысит критиче-

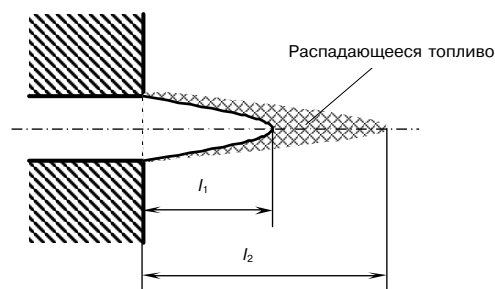


Рис. 3. Схема распада топливной струи

скую длину и несколько удлинится до величины l_2 , его наружная оболочка распадается на отдельные капли так, как показано на рис. 3. Затрихованная часть обозначает объем, который распадается сразу, одновременно, образуя компактный конусообразный сегмент капель. Далее этот сегмент (полый конусообразный макроэлемент, колпачок) движется по инерции. Описанный механизм распада струи периодически повторяется в пульсирующем режиме и продолжается до тех пор, пока давление впрыска не упадет до критического значения. Близкие представления о характере распада струи топлива приведены в [9].

Таким образом, образование сегментов топливного факела связано с переходом к турбулентному режиму течения. Их собственная симметрия и симметрия расположения относительно оси струи, надо полагать, связаны с величиной и направлением векторов турбулентности, действующих в момент распада струи. При этом шлейф струи образуется из последовательности довольно плотно расположенных сегментов. В переднем фронте распыленной струи сегменты встречают растущее сопротивление воздуха и срабатывают кинетическую энергию на его преодоление. Оценка условий перехода к турбулентному истечению показывает, что для зимнего дизельного топлива, применявшегося в экспериментах, такой переход происходит при $p_{впр} = 0,21–1,57$ МПа. Приведенная схема истечения струи объясняет явление пульсации нераспавшейся струи топлива [11].

Структура струи. При переходе процесса впрыска на участок квазистационарного истечения (рис. 1, В) образование макроэлементов в виде сегментов не прекращается. Здесь скорость истечения топлива медленно снижается, сегменты не смешиваются, а движутся с постоянной скоростью в порядке их образования. Таким образом, продольная макроструктура струи образуется из чередующихся друг за другом полых конусообразных сегментов капель. Пока движение струи определяется действием переднего фронта нарастания давления перед соплом, в большинстве случаев ее структура на кинограм-

мах не просматривается. Однако примерно 50 % кинограмм фиксируют искажение ее симметричного профиля, что свидетельствует о наличии в этой фазе сегментов или их фрагментов. Эти неровности имеют такие же очертания, как и края сегментов, зачастую деформированные, что показывает на их взаимодействие друг с другом и с воздухом. Хорошо заметное сегментирование струи наблюдается в ее головной части во время перехода давления впрыска в квазистационарное спустя $\approx 0,6$ мс от начала впрыска. Удаление переднего фронта факела от сопла при этом составляет ≈ 50 мм. Образующиеся на спаде первого пика давления сегменты, имея меньшую скорость движения, отстают от предыдущих, образовавшихся при большем давлении, вследствие чего интервалы между ними увеличиваются, и структура струи становится хорошо заметной. При этом сегменты, образующие вершину струи и фронт, сохраняют свое положение и далее. Следующие за ними сегменты, образовавшиеся при квазистационарном истечении, фронт струи и ее вершину не догоняют и движутся в порядке их появления, образуя тыл головной части и шлейф. Схема строения струи приведена на рис. 4.

В фазе квазистационарного развития струи давление впрыска снижается медленно, вследствие чего скорость движения последующих сегментов ненамного отстает от скорости предыдущих, поэтому они расположены достаточно плотно друг к другу и как бы надеты один на другой, отчего макроструктура струи просматривается хуже, чем в предыдущей фазе. Их толщина по оси соизмерима или меньше разности $l_2 - l_1$, а l_2 в свою очередь ненамного превышает l_1 . Неровность краев шлейфа низкая, и его угол конуса на этом участке определяется проще. Очертания сегментов меняются слабо, но, приближаясь к головной части струи, они увеличиваются в объеме, их края распрямляются, собственный угол распада растет, а распыленное топливо рассеивается по объему сегмента. Расстояния между сегментами при этом возрастают. Особенно выделяются сегменты, расположенные в головной части струи и образующие фронт.

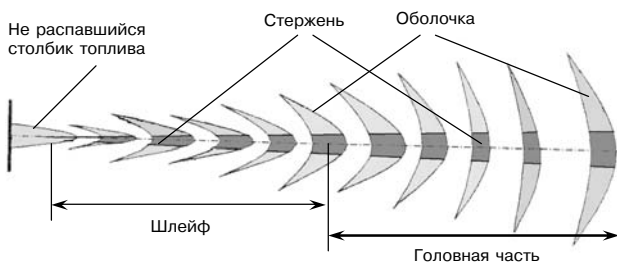


Рис. 4. Схема строения распавшейся топливной струи

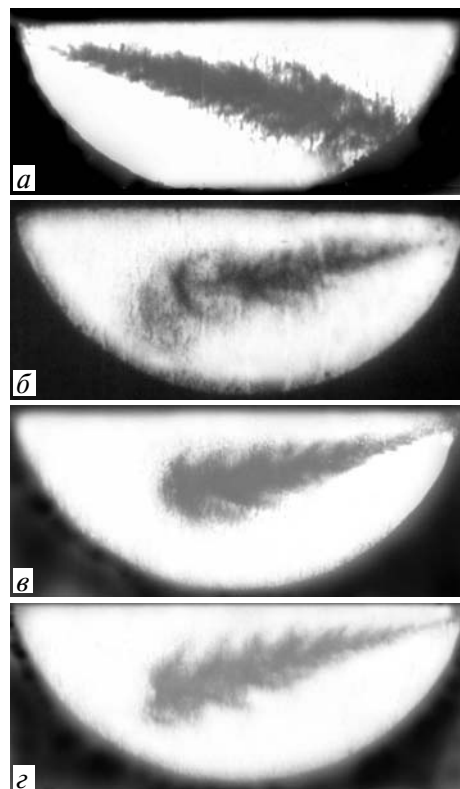


Рис. 5. Структура топливной струи:

- a* — $p_{\text{впр}} = 13,08$ МПа, $\rho_{\text{в}} = 22$ кг/м³;
- б* — $p_{\text{впр}} = 16,35$ МПа, $\rho_{\text{в}} = 22$ кг/м³;
- в* — $p_{\text{впр}} = 23,62$ МПа, $\rho_{\text{в}} = 29$ кг/м³;
- г* — $p_{\text{впр}} = 14,62$ МПа, $\rho_{\text{в}} = 25,5$ кг/м³

Интервалы между сегментами не являются полностью свободными от распыленного топлива, но его концентрация, особенно на периферии, намного меньше, чем внутри сегментов и на оси струи. Плотны расположенные по оси сегментов капли образуют «стержень струи», заполняя его топливом по длине неравномерно. На рис. 5 приведены фрагменты кинограмм, на которых макроструктура струи хорошо просматривается. Особенно заметной она становится после отсечки впрыска. Сегментирование струи отмечено при давлениях впрыска 10–46 МПа, плотности воздуха в камере 10–35 кг/м³ и диаметре сопловых отверстий 0,3–0,6 мм. Сходные результаты наблюдений опубликованы в работах МАДИ [10] и др. [9, 12].

Взаимодействие элементов. Взаимодействие сегментов в фазе движения, соответствующей нарастанию давления впрыска, на кинограммах не фиксируется. Можно отметить лишь изменение



Рис. 6. Фрагмент кинограммы с отклонившимся в сторону сегментом

очертаний струи, наличие неровностей на границе струя–воздух и некоторые оптические неоднородности. Тем не менее, ориентируясь на неоднородную плотность изображения, конфигурацию, распад и изменение скорости истечения, можно допустить следующее взаимодействие структурных элементов. При нарастании давления выше значения, за которым начинается сегментирование, последующие сегменты, имеющие более высокую начальную скорость, догоняют предыдущие, активно взаимодействуют с ними, возможно укрупняясь, смешиваясь, разрушаясь и обгоняя их, что создает однородное по плотности изображение струи, лишь иногда включающее некоторые неоднородности плотности изображения. В этой фазе развития наиболее крупные капли и фрагменты сегментов устремляются к вершине струи, образуя ее головную часть и фронт. Кинетическая энергия элементов струи суммируется в головной части и срабатывается на преодоление сопротивления воздуха. После перехода струи в квазистационарное истечение сегменты перемещаются с близкими скоростями, не смешиваются и не перегоняют друг друга. Энергия движения передается фронту через прослойки воздуха. В пользу этого предположения свидетельствует то обстоятельство, что довольно часто один из сегментов, образующих вершину, при удалении от соплового отверстия на 40–80 мм оказывается смещенным по отношению к оси струи. Оказавшись между подпирательной струей и набегающим воздухом, он отжимается на периферию и испаряется (рис. 6). Аналогичное строение струи распыленного топлива приведено в [10].

Инжектирование воздуха. Из изучения кинограмм вытекает, что инжектирование воздуха в струю происходит в шлейфе, прилегающем к сопловому отверстию там, где наибольшая скорость движения распыленного топлива. В головной части струи скорость топлива падает, что происходит вследствие увеличения ее объема. Избыток воздуха, по всей вероятности, выжимается через интервалы между сегментами за пределы струи, что придает головной части неровные очертания, а ее размеры могут выходить за пределы угла конуса шлейфа.

Результаты приведенных исследований позволяют рассматривать процесс распада топлив-

ной струи как дискретный или близкий к нему процесс, что определяет особенности ее продольного строения в виде сегментов.

Приведенное представление о механизме распада топливной струи не вступает в противоречие с делением ее на оболочку и стержень, так как распределение топлива в поперечном сечении струи средствами скоростной киносъемки не регистрируется.

Литература

1. *Ваншейдт В.А.* Судовые двигатели внутреннего сгорания. — Л. : Судпромгиз, 1962. — 544 с.
2. *Свиридов Ю.Б.* Принципы построения обобщенной теории сгорания в дизелях // Двигателестроение. — 1980. — № 11. — С. 10–15.
3. *Лышевский А.С.* Распыливание топлива в судовых дизелях. — Л. : Судостроение, 1971. — 248 с.
4. *Кутовой В.А.* Впрыск топлива в дизелях. — М. : Машиностроение, 1981. — 119 с.
5. *Гафуров Р.А., Глебов Г.А., Скворцов Ю.М.* Исследование структуры дизельной топливной струи при циклическом впрыскивании методом импульсной голографии // Двигателестроение. — 1996. — № 3–4, — С. 1–12.
6. *Ищук Ю.Г.* Интенсификация процесса сгорания топлива в судовых дизелях. — Л. : Судостроение, 1987. — 53 с.
7. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. — 4-е изд. перераб; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Крутова. — М. : Машиностроение, 1983. — 325 с.
8. *Никитин Е.А., Никонов Г.В., Крупский М.Г., Куянов Ю.Ф.* Установка для исследования процессов, протекающих в камере сгорания дизеля // Двигателестроение. — 1988. — № 1.
9. *Лонг Энгиен Хироюсу.* Моделирование смесеобразования при впрыскивании топлива в камеру сгорания дизеля // Кинки дайгаку когакубу кенкю хококу. Res. Repts. Fac. Eng. Kinki Univ.: 1999. — № 3. — С. 336–339.
10. *Астахов В.И., Голубков Л.Н., Трусов В.И., Хачиян А.С., Рябикин Л.М.* Топливные системы и экономичность дизелей. — М. : Машиностроение, 1990. — 289 с.
11. *Arai M., Tabata M., Hiroyagu H., Shimizu M.* Deintegration process and spray characterization of fuel jet injected by a diesel nozzle. SAE Techn. Pap. Ser. № 840275. 1984. — P. 1–20.
12. *Кукушкин В.Л., Романов С.А., Свиридов Ю.Б.* Экспериментальное исследование с помощью голографии структуры нестационарной струи распыленного топлива // Двигателестроение. — 1989. — № 2 — С. 3–7.