

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОЦЕССА РАСПАДА ТОПЛИВНОЙ СТРУИ В ДИЗЕЛЕ

В.В. Гаврилов, канд. техн. наук,

Государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Постановка проблемы. Для внедрения в транспортную энергетику энергосберегающих решений требуется всемерное совершенствование процессов, происходящих в её элементах. Важным процессом в дизеле является распад струи топлива, подаваемого форсункой. Он определяет качество распыливания топлива и последующего его сгорания. Актуальным вопросом считается разработка средств улучшения показателей распыливания.

Обзор публикаций и постановка задач. В специальной литературе не даются определения терминов "распад струи" и "распыливание топлива".

До сих пор отсутствует общепринятая точка зрения на природу распада струи. В зависимости от того, какой из факторов распада считается определяющим, известные модели можно условно разделить на три группы, в которых распад рассматривается как результат: 1) развития в сплошной струе поверхностных колебаний; 2) кавитации в сопловом канале; 3) развития турбулентности потока. Не объяснено взаимодействие указанных механизмов. Отсутствует методика расчёта, которая наряду с размерами частицы топлива позволяла бы определять начальный вектор её скорости в момент отрыва от сплошной струи. Некоторому восполнению отмеченных пробелов посвящена данная работа.

Физическая картина распада струи. Прежде уточним упомянутые термины. Может быть предложено следующее их толкование. "Распад" - представляет собой общее понятие, означающее нарушение сплошности жидкой струи в целом или ее фрагмента. "Распыливание" – вид распада, при котором сплошная или пузырьковая жидкость преобразуется в смесь газа или пара с каплями (газовзвесь).

На основе обобщения известных научных фактов и результатов теоретических исследований можно составить физическую картину распада. В процессе истечения топлива из форсунки в сопловом канале образуется сложная турбулентная структура, состоящая из вихрей различных масштабов. Можно выделить две основные вихревые системы. Система крупномасштабных кольцевых вихрей формируется при обтекании входной кромки канала в результате образования отрывного течения. Вторая вихревая структура представляет собой систему мелкомасштабных вихрей, возникающую в области пограничного слоя как проявление пристенной турбулентности, которая порождается взаимодействием потока топлива с микронеровностями поверхности канала. Масштаб турбулентности увеличивается в направлении от стенки к ядру потока. Режим течения в канале зависит от относительного скоростного напора, который может быть выражен через отношение перепада давления на сопле к противодавлению среды $K = \Delta P / P_2$. С ростом перепада давления при $K \geq 1,3-2,0$ [1] начинается процесс внутриканального распада струи, проявляющийся в возникновении кавитации в зоне отрыва в ядрах крупномасштабных кольцевых вихрей. С последующим увеличением $K \geq 10,0-12,5$ кавитация развивается и в пристенных мелкомасштабных вихрях.

Можно предложить следующую интерпретацию взаимодействия турбулентного и кавитационного механизмов распада. Энергия турбулентности расходуется на образование внутривихревых кавитационных разрывов сплошности. При перемещении каверн в зависимости от изменения локальной скорости вращения вихря и статического давления периодически

происходит их рост и схлопывание. Процесс схлопывания каверн подпитывает энергией турбулентное движение. Таким образом, имеет место непрерывный обмен механической энергией (на общем фоне её диссипации) между турбулентным и кавитационным механизмами распада.

Отделение частицы топлива от сплошной струи или её фрагмента происходит в момент преодоления локального баланса сил инерции, вязкости, поверхностного натяжения, внутреннего и внешнего давлений. Размер образующейся частицы топлива зависит от локального масштаба турбулентности. На оси струи формируются крупные частицы, на периферии её сечения – мелкие. Тонкость распыливания в значительной мере определяется параметрами пристенной турбулентности.

Завершение распада сплошной струи и вторичное дробление капель могут происходить вне сопла, в цилиндре дизеля [2]. При этом некоторое силовое воздействие на струю и капли оказывает заряд цилиндра. Последующая коагуляция движущихся в струе капель, на возможность которой указывают ряд авторов, маловероятна в силу того, что расстояние между каплями несоизмеримо велико по отношению к их размеру.

Справедливость тезиса об определяющем влиянии пристенной турбулентности на распыливание может быть подтверждена ссылкой на результат экспериментального исследования распределения относительной интенсивности турбулентности

$$\varepsilon = \sqrt{w'^2} / w$$

по радиусу r поперечного сечения воздушного потока, выходящего из модели цилиндрического сопла при различных числах Рейнольдса [3]. Этот результат показан на рис. 1. Из рисунка видно, что изменение режима течения (который, как известно, определяет качество распыливания топлива форсункой) влияет преимущественно на параметры пристенной турбулентности и практически не влияет на турбулентность в ядре течения.

Важный аспект картины распада струи представляет собой наличие и форма поверхности разрыва сплошности в сопловом канале.

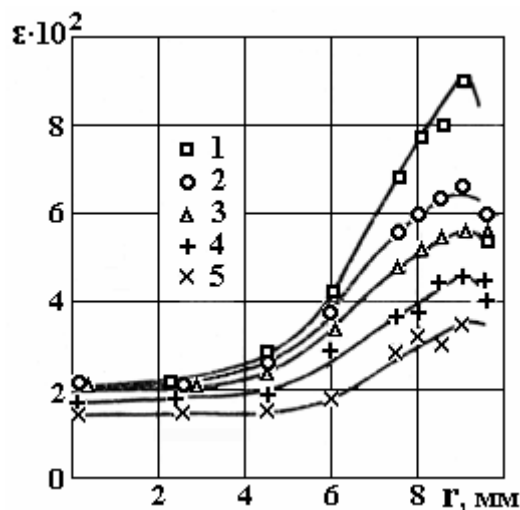


Рис. 1. Распределение относительной интенсивности турбулентности по сечению потока, выходящего из цилиндрического сопла:

- 1 – Re=6900;
- 2 – Re=10100;
- 3 – Re=13250;
- 4 – Re=17700;
- 5 – Re=22600

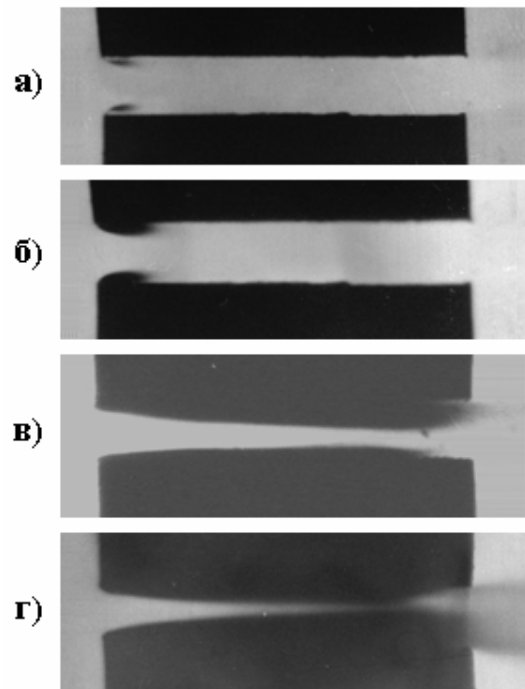


Рис. 2. Развитие зоны вихревой кавитации в сопловом канале при увеличении относительного скоростного напора K :

- а) $K=2,0$;
- б) $K=3,4$;
- в) $K=4,0$;
- г) $K=15,0$

С.А. Скоморовским в наших совместных работах [2] получены экспериментальные данные о форме этой поверхности, которые приведены на рис. 2. Здесь представлены микрофотографии потока дизельного топлива внутри плоской оптически прозрачной модели канала, выполненные в проходящем свете. Поток направлен слева направо.

На рисунке показаны момент зарождения на входной кромке канала и последующее развитие области вихревой кавитации при увеличении относительного скоростного напора от $K = 2,0$ (рис. 2а) до $K = 15,0$ (рис. 2 г). Последнее значение соответствует режиму истечения топлива в современном дизеле при максимальном давлении впрыскивания. Можно видеть, что поверхность разрыва сплошности при K , имеющих существенное значение для реального процесса подачи топлива, имеет клиновидную форму. Есть основания предположить, что в канале обычного круглого сечения указанная поверхность близка к конической.

Представленную физическую картину следует иметь в виду при математическом моделировании распыливания топлива.

Математическая модель и методика расчёта. Ввиду указанной выше решающей роли турбулентных пульсаций в акте отделения капли топлива от сплошной струи для расчёта диаметра образующейся капли можно было бы принять соответствующую зависимость, полученную О.Н. Лебедевым теоретическим путём [4]. Однако определить входящую в эту зависимость поперечную пульсационную скорость w'_{fy} не представляется возможным. Поэтому предлагается решить обратную задачу: по известному диаметру капли d_k , который может быть рассчитан по одной из известных методик, пользуясь упомянутой зависимостью, вычислить пульсационную скорость

$$w'_{fy} = K_w \sqrt{\sigma_f / (\rho_f d_k)},$$

где σ_f , ρ_f – соответственно коэффициент поверхностного натяжения и плотность топлива;

K_w – коэффициент, которым учитываются, в частности, вязкость топлива, форма и размеры сопла.

Пренебрегая радиальными скоростями осреднённого движения в сплошной струе, примем, что в момент отделения капли пульсационная скорость потока равна начальной радиальной скорости капли: $w'_{fy} = w_{fy}$.

Заметим, что в соответствии с формулой капли большого диаметра получают малую начальную скорость. Это одна из причин, которая не позволяет крупным каплям продвинуться на периферию поперечного сечения струи. Сделанный вывод согласуется с известным фактом, в соответствии с которым крупные частицы сосредоточены в области оси струи.

Очевидно, вектор начальной скорости капли направлен нормально поверхности разрыва сплошности. Это означает, что направление вектора зависит от локальной ориентации в пространстве поверхности разрыва. На основании результатов экспериментальных исследований, приведенных на рис. 2, примем, что в процессе распыливания топлива в сопловом канале имеет место поверхность разрыва сплошности конической формы. Соответствующая схема показана на рис. 3.



Рис. 3. Схема распада топливной струи в сопловом канале форсунки

Учитывая описанную выше сложную структуру течения в канале, а также вывод о том, что кавитационный распад в крупномасштабных вихрях начинается при относительно малом скоростном напоре K [1], можно заключить, что обнаруживаемая в экспериментах поверхность разрыва формируется за счет крупномасштабной турбулентности. Предположим, что

между параметрами турбулентности различных масштабов в геометрически подобных соплах и при аналогичных условиях истечения топлива существует определенное соотношение. Тогда и для образования капель, вызванного мелкомасштабными пульсациями, можно представить условную коническую поверхность разрыва сплошности. Геометрические параметры этой условной поверхности некоторым образом связаны с аналогичными параметрами "видимой" поверхности. В варианте методики расчёта процесса распыливания, в которой определяется не спектр размеров капель, а их средний диаметр, поверхность сплошной струи может быть представлена единым конусом, размеры которого определяются текущим режимом истечения. Такая "геометрическая" интерпретация помогает наглядно представить взаимосвязь факторов распыливания

Если изложенные соображения справедливы, то коэффициент K_w в формуле должен зависеть от текущего расчётного угла ψ конуса поверхности разрыва сплошности. При увеличении угла конуса проекция нормального вектора (неизменного по модулю) на радиальную плоскость уменьшается, следовательно, K_w также уменьшается.

Предложенная упрощенная модель наряду с наглядностью картины распада позволяет описать и объяснить наблюдавшуюся нами, а также и другими исследователями стабилизацию ширины распыленной струи при увеличении давления впрыскивания топлива. Известно, что с увеличением давления впрыскивания (следовательно, с ростом скорости истечения) длина сплошного жидкого столба топлива сокращается. Очевидно, что пульсационные скорости и, соответственно, модули нормальных векторов начальных скоростей капель при этом возрастают. Но ожидаемого увеличения ширины струи не происходит, так как проекция указанных векторов на радиальное направление не увеличивается.

Для того чтобы воспроизведение рассмотренной картины расчётом стало возможным коэффициент K_w в формуле должен определенным образом зави-

сеть от высоты сплошного жидкого столба, то есть от режима истечения, свойств топлива и конструктивных параметров сопла.

Дисперсность распыливания топлива может быть оценена функцией распределения капель по размерам Розина-Раммлера.

Итак, главная особенность предложенной методики расчета распада состоит в том, что наряду с дисперсностью распыливания топлива она дает возможность определения вектора начальной скорости капель, образующихся при распаде.

Выводы. Представленная в данной статье физическая картина распада струи и разработанная на её основе методика расчёта позволяют определить пути целенаправленного воздействия на процесс распыливания, обеспечивающего высокое качество смесеобразования и сгорания топлива в дизеле.

Литература

1. Скоморовский С.А. Гидродинамика течения топлива в сопловых каналах дизельной форсунки и её влияние на структуру топливного факела: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Л.: ЦНИДИ, 1988.— 18 с.
2. Гаврилов В.В., Скоморовский С.А. Влияние вихревой кавитации на распыливание топлива в дизелях // Вестник Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та: Сб. науч. тр.— 1995.— Вып. 1.— С. 54–60.
3. Лебедев О.Н. К вопросу о распыливании топлива дизельными форсунками // Изв. Сиб. отд. АН СССР, Сер. Техн. науки, 1977.— Вып. 1, № 3.— С. 40–44.
4. Лебедев О.Н. Исследование некоторых вопросов смесеобразования в судовых четырёхтактных дизелях.— Новосибирск: НИИВТ, 1970.— 94 с.

Поступила в редакцию 5.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. А.Н. Дядик, гос. морской технической университет, г. Санкт-Петербург; канд. техн. наук В.Е. Уткин, зам. начальника Инженерного центра ФГУП «Адмиралтейской верфи».