

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПАДА ТОПЛИВНОЙ СТРУИ В ДИЗЕЛЕ

В.В. Гаврилов

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
E-mail: gavrilov@VG5647.spb.edu

Дано объяснение турбулентной и кавитационной природы распада топливной струи в дизеле. На основе анализа экспериментальных данных предложена модель распада. Разработана методика расчета размера частицы распыленного топлива и вектора ее начальной скорости в момент отрыва от сплошной струи. Предусмотрен расчет полидисперсного распыливания топлива.

Обеспечение высоких экономических, экологических показателей и показателей надежности дизеля возможно путем согласования конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры, камеры сгорания и заряда цилиндра. При выполнении этой работы целесообразно использовать современную математическую модель внутрицилиндровых процессов.

Важным элементом комплекса процессов в дизеле является распад струи топлива, подаваемого в цилиндр форсункой. Этот процесс определяет качество распыливания топлива и последующего его сгорания.

В специальной литературе не дается определение терминов "распад струи" и "распыливание топлива". 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).

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 расчета, которая наряду с размерами частицы топлива позволяла бы определять начальный вектор ее скорости в момент отрыва от сплошной струи.

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 $K \geq 1,3 \dots 2,0$ (в сопловых отверстиях обычной цилиндрической формы) [1] начинается процесс внутриканального распада струи, проявляющийся в возникновении кавитации в зоне отрыва в ядрах крупномасштабных кольцевых вихрей. С последующим увеличением $K \geq 10,0 \dots 12,5$ 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 локальных 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 энергией (на общем фоне ее диссипации) между турбулентным и кавитационным механизмами распада.

Отделение частицы топлива от сплошной струи или ее 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 ее сечения – мелкие. Тонкость распыливания в значительной мере определяется параметрами пристенной турбулентности.

Завершение распада сплошной струи и вторичное дробление капель могут происходить вне сопла, в камере сгорания дизеля [2]. При этом некоторое силовое воздействие на струю и капли оказывает заряд цилиндра. Последующая коагуляция движущихся в распыленной 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 распад может быть подтверждена ссылкой на результат экспериментального исследования распределения относительной интенсивности

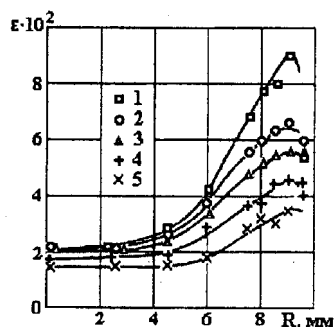


Рис. 1. Распределение относительной интенсивности турбулентности по сечению потока, выходящего из цилиндрического сопла: 1) $Re=6900$; 2) $Re=10100$; 3) $Re=13250$; 4) $Re=17700$; 5) $Re=22600$

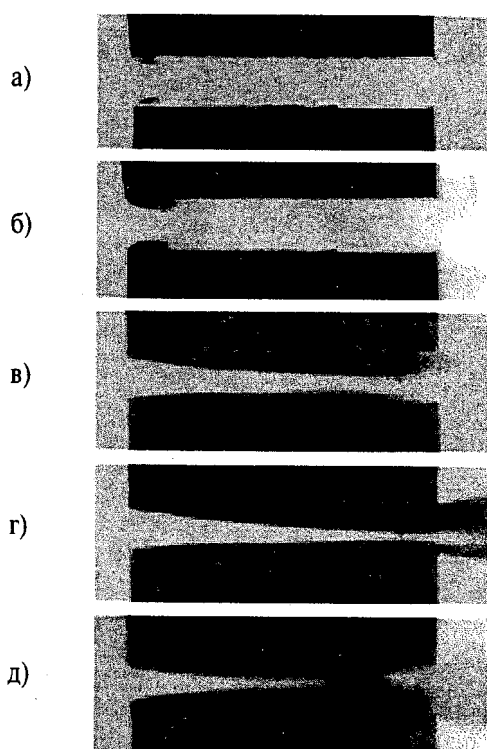


Рис. 2. Развитие зоны вихревой кавитации в сопловом канале при увеличении относительного скоростного напора K : а) $K=2,0$; б) $K=3,4$; в) $K=4,0$; г) $K=7,0$; д) $K=15,0$

ти турбулентности $\epsilon = \sqrt{w'^2} / w$ по радиусу 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. С.А. Скоморовским

в наших совместных работах [2 и др.] 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. Канал образуют две параллельно расположенные стальные пластины. Боковыми стенками канала служат прозрачные пластины из полиметилметакрилата. 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. 2, а) до $K=15,0$ (рис. 2, д). 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 основание предположить, что в канале круглого сечения указанная поверхность близка к конической.

Представленную физическую картину следует иметь в виду при математическом моделировании распыливания топлива. Далее описаны основные особенности предлагаемой модели.

Ввиду указанной выше решающей роли турбулентных пульсаций в акте отделения капли топлива от сплошной струи, для расчета диаметра образующейся капли можно было бы принять соотношение, полученное О.Н. Лебедевым теоретическим путём [4]. Однако определить входящую в это соотношение 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 упомянутым соотношением, вычислить пульсационную скорость:

$$w'_{fy} = K_w \sqrt{\sigma_f / (\rho_f d_k)}, \quad (1)$$

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 выражением (1) 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

сти. Это означает, что направление вектора зависит от локальной ориентации в пространстве поверхности разрыва. Приведенные на рис. 2 результаты экспериментальных исследований дают основание принять, что в процессе распыливания топлива в сопловом канале имеет место поверхность разрыва сплошности конической формы. Соответствующая схема показана на рис. 3.

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 расчета 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 процесса распыливания.

Если изложенные соображения справедливы, то коэффициент K_w в формуле (1) должен зависеть от текущего расчетного угла Ψ конуса поверхности разрыва сплошности. При увеличении угла поверхности проекция нормального вектора (неизменно 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 распы-

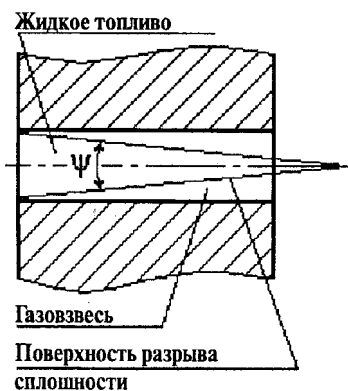


Рис. 3. Схема распада топливной струи в сопловом канале форсунки

ленной 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 расчетом стало возможным, коэффициент K_w в формуле (1) должен определенным образом зависеть 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:

$$S_3(d) = 1 - \exp\left[-\left(d/d_m\right)^n\right], \quad (2)$$

где $S_3(d)$ – объемная (массовая) доля капель, размер которых меньше или равен d ; d_m, n – параметры распределения.

Для обеспечения возможности последующего моделирования процессов движения, испарения и горения топлива в результате расчета распада струи, наряду с размерами капель топлива, необходимо определить векторы их начальных скоростей. Основное решение, принятое при разработке изложенной ниже методики, состоит в том, что размер частицы вычисляется по проверенным на практике эмпирическим зависимостям, а вектор начальной скорости частицы, приравненной к пульсационной скорости сплошного потока топлива, определяется решением обратной задачи Лебедева, в которой теоретическим путем установлена связь между размером образующейся частицы и пульсационной скоростью.

Опишем основные этапы расчета распада струи:

1) Определить среднеарифметический диаметр d_{10} капли для текущей скорости истечения топлива по формуле [3]:

$$d_{10}/d_c = 2,88 Lp^{-0,0733} We_i^{-0,24} (d_{co}/d_c)^{0,7},$$

где $Lp = \sigma_f \rho_f d_c / \mu_f^2$ – число Лапласа; $We_i = w_{fi}^2 \rho_f d_c / \sigma_f$ – число Вебера; $d_{co} = 0,25$ мм – характерный размер; d_c – диаметр соплового отверстия; μ_f – динамическая вязкость топлива; w_{fi} – текущая скорость истечения топлива из форсунки (осредненная в пределах i -го шага по времени).

2) Вычислить относительный средний объемный диаметр [3]:

$$\bar{d}_{30} = d_{30}/d_{10} = 1,96 We_i^{-0,04},$$

где d_{30} – абсолютный средний объемный диаметр капли.

3) Вычислить параметры d_m и n уравнения (2) Розина-Раммлера [3]:

$$d_m = d_{10} \bar{d}_{30}^{2,55},$$

$$n = 1,992 (\bar{d}_{30} - 1)^{-0,306}.$$

4) Разделить диапазон размеров капель от $d=0$ до $d=d_{max}$ на j_{max} интервалов с шагом Δd_j .

При этом d_{max} может быть либо определен по методике Б.В. Раушенбаха, либо, в первом приближении для обычных условий основного периода впрыскивания топлива с учётом экспериментальных данных, принят в пределах 70...100 мкм.

5) Для каждого j -го интервала (размерной группы капель) со средним диаметром капель d_j вычислить по уравнению (2) массовые доли капель, размер которых меньше или равен $d_j+\Delta d_j/2$ и $d_j-\Delta d_j/2$.

Принять, что при текущей скорости истечения доля капель $S_{3(d_j+\Delta d_j/2)} - S_{3(d_j-\Delta d_j/2)}$ имеет диаметр d_j .

6) Ввиду принятого допущения считать, что средний объемно-поверхностный диаметр (диаметр по Заутеру) d_{32} для рассматриваемой размерной группы капель:

$$d_{32} = d_j^3 / d_j^2 = d_j.$$

7) Вычислить начальную радиальную скорость капель диаметра d_{32} по выражению, аналогичному (1):

$$w_{xy} = K'_w \sqrt{\sigma_f / (\rho_f d_{32})},$$

где K'_w — коэффициент, определяемый с учётом характера реального распределения частиц различных размеров в поперечном сечении топливной струи. Указанное распределение может быть принято по экспериментальным данным [5].

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. — 1995. — Вып. 1, сб. 2. — С. 54–60.
3. Лебедев О.Н. К вопросу о распыливание топлива дизельными форсунками // Изв. Сиб. отд. АН СССР, сер. техн. наук. — 1977. — Вып. 1. — № 3. — С. 40–44.
4. Лебедев О.Н. Исследование некоторых вопросов смесеобразования в судовых четырёхтактных дизелях. — Новосибирск: НИИВТ, 1970. — 94 с.
5. Камимото Т., Мацуока Ш., Сугияма Х., Аояги Х. Исследование процесса испарения распыленного топлива в дизеле // Нихон кикай гаккай рамбунсю. — 1974. — Т. 40. — № 339. — С. 3206–3223.

УДК 621.184.3

МЕТОДИКА РЕНТГЕНОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВНУТРИСТРУКТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Л.Л. Любимова

Томский политехнический университет
E-mail: aleks@ped.tpu.ru

Представлена методика обработки дифракционных рентгеновских линий, вид аппроксимирующих функций и экспериментальные результаты измерения внутренних зональных и внутризеренных напряжений в стенке трубы пароперегревателя из стали Ди-82-Ш энергетического котла в температурном диапазоне от 48 до 700 °С, позволяющие установить характерные температуры, способные привести к внутризеренному растрескиванию, и выделить точное значение эквикоэзивной температуры перехода к магистральному трещинообразованию. Указывается на возможность использования полученных результатов для целей диагностики температурных диапазонов жаропрочности и жаростойкости энергетических сталей.

Введение

Актуальность исследований причин внезапного хрупкого разрушения энергетических стальных труб не снимается наряду с определением величины разрушающего напряжения свыше 50 лет [1]. В ряде ра-

бот обращается внимание на низкий уровень внешних растягивающих напряжений разрушения металла ($\sigma_p = 0,5\sigma_{0,2}$) [2].

Прочностные свойства сталей связывают с высокими уровнями внутренних остаточных напряже-