

УДК 621.436

Расчет критериев распада топливного факела в процессе топливоподачи в камеру сгорания поршневого дизельного двигателя

Дроздук Дмитрий Сергеевич

dima.drozd.9.99@mail.ru

Зеленов Александр Леонидович

zelenoval@student.bmstu.ru

Шутов Михаил Лучанович

shutov@bmstu.ru

Федин Даниил Константинович

danfedin@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены теоретические основы и практические методы расчета ключевых критериев, определяющих процесс распада топливного факела в системах топливоподачи двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Проанализировано влияние конструктивных и режимных параметров на дисперсность, глубину проникновения и однородность топливно-воздушной смеси. Приведены основные расчетные зависимости, используемые для моделирования и оптимизации процесса смесеобразования с целью повышения эффективности и экологичности ДВС.

Ключевые слова: топливные системы, подача топлива, методы расчета, дальность топливного факела, форсунка, внутрикамерное смесеобразование, топливоподача, гидродинамика, критерий Вебера, моделирование распада топливного факела

Calculation of fuel torch decay criteria in fuel supply processes

Drozduk Dmitry Sergeevich

dima.drozd.9.99@mail.ru

Zelenov Alexander Leonidovich

zelenoval@student.bmstu.ru

Shutov Mikhail Luchanovich

shutov@bmstu.ru

Fedin Daniil Konstantinovich

danfedin@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the theoretical foundations and practical methods for calculating key criteria that determine the fuel torch decay process in internal combustion engine (ICE) fuel supply systems. It analyzes the influence of design and operating parameters on the dispersion, penetration depth, and homogeneity of the fuel-air mixture. The article provides the main calculation equations used for modeling and optimizing the combustion process to improve the efficiency and environmental friendliness of ICEs.

Keywords: fuel systems, fuel supply, calculation methods, fuel torch range, nozzle, in-chamber mixing, fuel supply, hydrodynamics, Weber criterion, fuel torch decay modeling

Введение. Эффективность рабочего процесса современного двигателя внутреннего сгорания в решающей степени зависит от качества приготовления топливно-воздушной смеси. Ключевым элементом этого процесса в дизелях и двигателях с непосредственным впрыском топлива является формирование и

распад топливного факела в процессе топливоподачи. Качество распада факела, характеризующее его дисперсностью, необходимой для увеличения суммарной поверхности капель распыленного топлива, что ускоряет их прогрев и испарение. При распыливании суммарная поверхность капель распыленного топлива может в десятки раз превышать поверхность струи, вытекающей из соплового отверстия распылителя форсунки, проникающей способностью и распределением капель по объему камеры сгорания напрямую влияет на скорость испарения топлива, полноту и скорость сгорания, а следовательно, на мощностные, экономические и экологические показатели двигателя [1, 2].

Целью определения показателей впрыска является расчет процесса распада топливной струи в процессе топливоподачи в камеру сгорания дизеля, критерием которой является критерий Вебера, характеризующий уменьшение вещества количества топлива, поданного форсункой топливной системы высокого давления. Для расчета применяется методика, описанная в работе [3], включающая физико-химические характеристики топлива, геометрические характеристики топливной системы дизеля и ее регулировочные параметры.

К настоящему времени имеется значительное число теоретических исследований мелкости распыливания. В основном, они основываются на решении задачи взаимодействия струи топлива с газовой средой. Однако сложность явлений, сопровождающих процесс распада струи и дальнейшего дробления капель, позволила получить удовлетворительные зависимости лишь для малых скоростей истечения невязкой и вязкой жидкости. Для процесса распыливания даже в самых последних работах не дается теоретических зависимостей, позволяющих оценивать средние диаметры капель. Поэтому для расчета мелкости распыливания чаще всего применяются критериальные уравнения. Чтобы построить кривые распыливания, необходимо знать максимальные диаметры капель, получающиеся в процессе впрыска.

Оценка максимальных диаметров капель, образующихся при впрыске топлива многосопловой форсункой закрытого типа. Достаточно полный анализ экспериментальных и теоретических исследований по устойчивости отдельных капель дан в работе. Устойчивость капель определяется их взаимодействием с газовой средой.

Критические значения числа Вебера, определяющие зону перехода от устойчивого состояния капли к ее распаду, найденные на основании экспериментальных и теоретических исследований, лежат в широких пределах $We_{кр} = 10,7–20,0$. Расчет максимальных диаметров капель по критическому значению числа Вебера приводит к монотонному уменьшению максимального диаметра капель по мере увеличения относительной скорости их движения в газовой среде. Это не совпадает с экспериментальными данными, которые указывают на стабилизацию капель по мере уменьшения их размеров. Для этого явления применяется зависимость, связывающая максимальный и стабильный диаметры капли.

Для оценки изменения максимального диаметра капель дизельного топлива от начальной скорости их относительного движения представлены [3]

экспериментальные значения d_{max} , замеренные при соответствующих скоростях $U_{ко}$ для распылителей с различным диаметром соплового отверстия. Максимальные диаметры капель были определены при исследовании в МАДИ мелкости распыливания топлива дизельными закрытыми форсунками обычного и клапанно-соплового типа на стробоскопической установке по методике НАМИ, изменения максимальных диаметров капель рассчитаны по формуле [1] соответственно для $W_{e_{кр}} = 14$ и $W_{e_{кр}} = 10,7$ при $\sigma_T = 0,030$ кГ/м и $\sigma_T = 0,0025$ кГ/м и $d_{eT} = 30$ мкм. Кривая 3 в работе [3] подсчитана из соотношения

$$W_{e_{кр}} = \frac{\rho_B U_{ко}^2 d_{max}}{\sigma_T}. \quad (1)$$

Из анализа данных по распаду топливного факела видно, что наибольшее число экспериментальных точек находится между предельными кривыми [1, 4]. Некоторое выпадение экспериментальных точек в сторону увеличения d_{max} по сравнению с расчетным можно объяснить увеличением диаметра отпечатка капли при ее соударении с пластиной, а также необходимостью учитывать время деформации капли от начала ее взаимодействия с газовой средой до момента распада. Отклонение максимальных диаметров капель по сравнению с расчетным в сторону уменьшения отчасти объясняется тем, что число крупных капель при проведении эксперимента на пластинке недостаточного количество, но они могут не всегда фиксироваться оптическими приборами.

На основании проведенного анализа расчетно-математических составляющих [3–5] мелкости распыливания топливного факела можно выделить модель расчета мелкости распыливания топливного факела при впрыске топлива внутрь цилиндра двигателя

$$\left\{ \begin{array}{l} W_e \frac{d_{кп} \cdot U_{кп}^2 \cdot \rho_{ог}}{\sigma_T} \\ t_{кр \text{ деф}} = 1,65 \cdot \frac{d_{кп}}{U_{ко}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{ог}}} \\ \rho_{ог} \cdot \frac{\pi \cdot d_{max}^2}{2 \left(\frac{\nu_{ог}}{d_{кп}} R_e \right)^2 \left(\frac{12.5}{\sqrt{R_e}} \right)^{0.03 \cdot W_e^{1.5}}} \\ - \frac{dU_{кп}}{dt} = \frac{\pi \cdot d_{кп}^3 \cdot \rho}{6} , \\ d_{кп} = d_c \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \pi}{W_e}} \\ R_e = \frac{\mu f_c \cdot U_T}{\nu_T \cdot 10^6} \\ U_T = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \left(P_\Phi - \frac{P_c + P_z}{2} \right)} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где W_e — число Вебера; $d_{кп}$ — диаметр капли, м; $U_{кп}$ — скорость капли, м/с; $\rho_{ог}$ — плотность обрабатываемого материала, кг/м³; σ_T — поверхностное

натяжение, Н/м; $t_{кр\text{ деф}}$ — критическая температура деформации, с; $U_{к0}$ — начальная скорость капли, м/с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; $\nu_{ог}$ — кинематическая вязкость, м²/с; Re — число Рейнольдса; d_c — диаметр сопла, м; μf_c — площадь проходного сечения распыливающего отверстия форсунки, м²; U_T — теоретическая скорость истечения жидкости из сопла, м/с; ν_T — кинематическая вязкость топлива, м²/с; P_f — давление впрыскивания топлива форсункой, Па; P_c — среднее давление в камере сгорания дизельного двигателя, Па; P_z — действительное максимальное давление сгорания топлива, Па.

Заключение. Проведенный анализ теоретических основ и расчетных методик процесса распада топливного факела позволяет сформулировать следующие выводы. Ключевым критерием, определяющим устойчивость капли топлива и ее распад в газовой среде камеры сгорания, является число Вебера (We). Анализ показал, что критическое значение числа Вебера, при котором начинается распад капли, лежит в диапазоне $We_{кр} \approx 10,7\text{--}14,0$. Это подтверждается экспериментальными данными, согласно которым большинство экспериментальных точек по максимальному диаметру капли располагается между расчетными кривыми для этих критических значений (рис. 1–4).

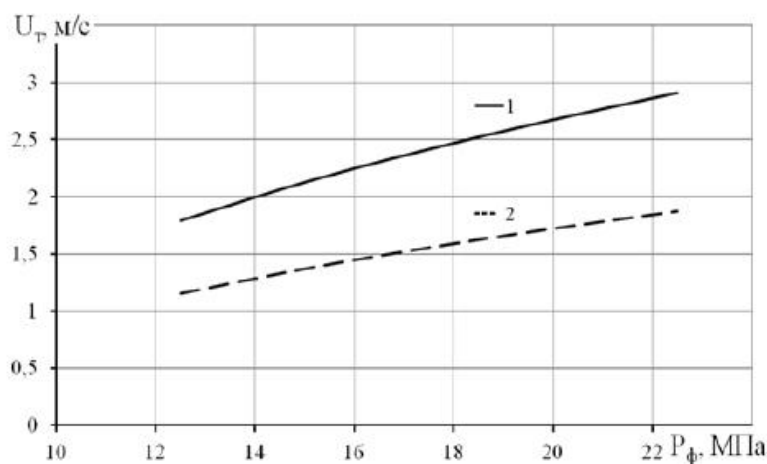


Рис. 1. Зависимость теоретической скорости истечения жидкости из сопла от давления впрыскивания топлива форсункой

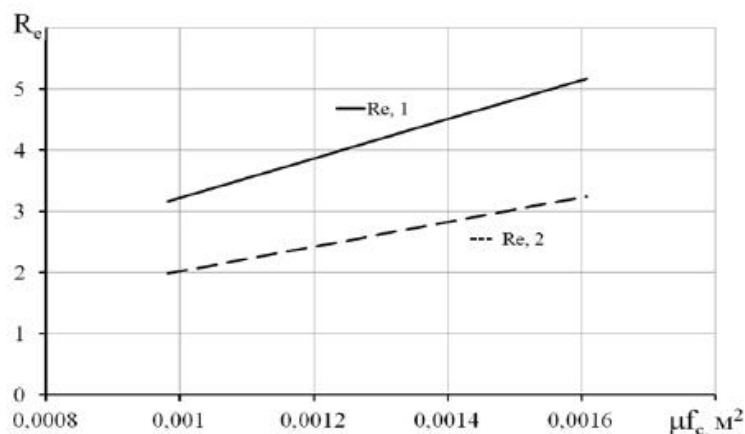


Рис. 2. Зависимость числа Рейнольдса от площади сечения сопла форсунки

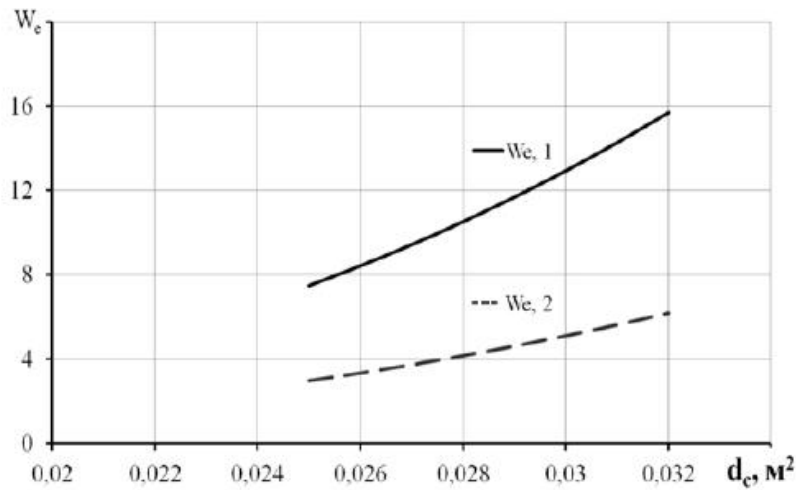


Рис. 3. Зависимость числа Вебера (We) от диаметра сопла форсунки

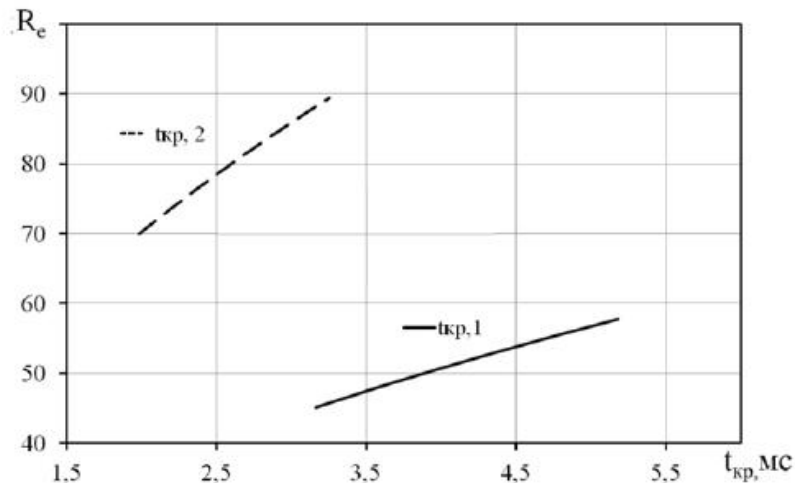


Рис. 4. Зависимость числа Рейнольдса (Re) от критической температуры деформации

Установлена зависимость максимального диаметра капли d_{max} от ее относительной скорости в газовой среде. Расчет показывает, что для типичных параметров дизельного топлива ($\sigma_T \approx 0,030$ Н/м, $\rho_{ог} \approx 20\text{--}40$ кг/м³) и скорости истечения из сопла $U_T \approx 250\text{--}400$ м/с, максимальный диаметр капель на начальной стадии распада факела составляет $d_{max} \approx 50\text{--}120$ мкм. Для оценки времени, необходимого для деформации и последующего распада капли, используется зависимость. Для капли диаметром 100 мкм при начальной скорости 300 м/с и отношении плотностей топлива и газа порядка 30–40, время критической деформации составляет $t_{кр \text{ деф}} \approx 2,7\text{--}3,1$ мкс. Это крайне малое время подтверждает высокую интенсивность процесса распада в начале фазы впрыска.

Список источников

- [1] Грехов Л.В. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва, Легион-Автодата, 2005, 344 с.
- [2] Слепцов О.Н., Оськин И.А. Методы расчета процесса распыливания топлива. *Горячкинские чтения. II Междунар. науч.-практ. конф., посв. 150-летию со дня рождения акад. В.П. Горячкина: сб. ст.* Москва, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019, с. 544–549.
- [3] Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. *Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов*. Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2005, 403 с.
- [4] Слепцов О.Н., Оськин И.А. Процесс впрыска топлива форсунками топливной системы в цилиндр автотракторного дизеля. *Доклады ТСХА. Междунар. науч. конф.: матер.* Москва, РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018, с. 135–136.
- [5] Рудаков В.Ю. *Метод прогнозирования развития топливных струй в открытых камерах сгорания дизелей*. Дис. ... канд. техн. наук. Коломна, 2015, 145 с.