

О МЕХАНИЗМАХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В КАПЛЯХ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Исаков А.Я., – д.т.н., профессор

Камчатский государственный технический университет

Рассмотрены физические особенности возникновения конкурентной фазы при нагревании капель водотопливной эмульсии. Показано, что процесс протекания микро-взрыва капель определяется объёмным содержанием воды в топливе и дисперсностью эмульсии.

The article describes physical peculiarities of competitive phase which emerges when drops of water-fuel emulsion are heated. It is shown that the process of micro explosion in drops is determined by the amount of water contained in the fuel and by dispersity of emulsion.

Использование водотопливных эмульсий для питания энергетических установок позволяет помимо улучшения их экономических показателей существенно снижать уровень вредных выбросов в атмосферу. Наличие в штатном жидком топливе микроскопических включений воды принципиально изменяет процесс воспламенения в камерах сгорания распыленных капель [1]. При определённой степени нагревания водяные включения за счёт образования конкурентной паровой фазы увеличивают свой объём, разрушая исходную каплю топлива на более мелкие фрагменты, что благоприятно сказывается на процессе горения. Таким образом, основной положительный эффект, вносимый присутствием воды, обусловлен изменениями её фазового состояния. В этой связи, исследования процессов, предшествующих воспламенению капель эмульсии представляются актуальными, как с теоретических, так и с практических позиций.

Образование конкурентной фазы при перегреве воды может протекать по двум различным схемам, гомогенной и гетерогенной. Гомогенная схема образования конкурентной фазы применима для чистых жидкостей, пото-

му что предполагает нарушение сплошности вследствие обеспечения условий, при которых две соседние молекулы могут оказаться на расстоянии примерно в два и более раза превышающие их эффективные диаметры. Для каждой жидкости существуют вполне определённые температуры, при которых происходит разрушение сплошности. Для воды при эффективном радиусе молекул $r_0 \cong 3 \cdot 10^{-10}$ м максимальное растягивающее напряжение, исходя из молекулярных соображений, определится как

$$P_{st} \cong \frac{2\sigma(T)}{r_0} \cong \frac{2[\sigma_0 - 0,15(T - 288)] \cdot 10^{-3}}{r_0} \cong 5,3 \cdot 10^8 \text{ Па}, \quad (1)$$

где σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела вода-воздух при нормальной температуре, T – текущее значение абсолютной температуры, r_0 – эффективный радиус молекулы воды. Все реальные жидкости, включая воду, демонстрируют на практике значительно меньшие прочности на разрыв, вследствие того, что не являются сплошными средами. В дистиллированной воде, подвергнутой специальной обработке высоким давлением, и многоступенчатой фильтрации, по не вполне объяснимым в настоящее время причинам, продолжают существовать ядра конкурентной фазы в виде микрополостей, заполненных парами воды и газами, преимущественно воздухом.

Рассмотрим физические процессы, предшествующие воспламенению полидисперсной капли водотопливной эмульсии, изображённой на рис.1. В сферической капле топлива радиусом R_F равномерно по всему её объёму распределены включения воды примерно одинакового радиуса R_W , концентрация которых в пределах капли может быть принята постоянной. Развиваемая далее термофизическая модель процессов основывается на гетерогенной схеме возникновения конкурентной фазы в перегретой воде, предполагающей наличие ядер, в виде парогазовых микрополостей, которые при определенной критической температуре T_{cr} теряют устойчивость и начинают увеличивать свой объём за счёт интенсивного испарения в них

паров воды. Динамика развития ядер конкурентной фазы определяется уравнением [2]

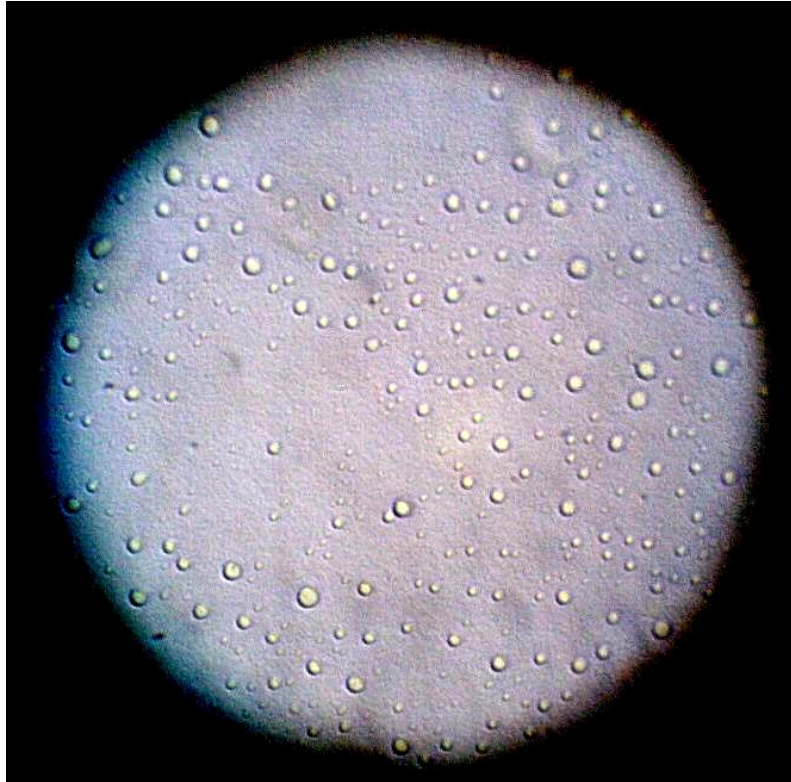


Рис. 1. Полидисперсная капля водотопливной эмульсии

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho} \left(p_s + p_g - p_0 - \frac{2\sigma}{R} \right) = f(R), \quad (2)$$

где p_s , p_g , p_0 – соответственно давление насыщенных паров, газа и внешнее давление, σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе пар – вода. Ядро, содержащее пар и газ окажется неустойчивым при условии

$$\frac{df(R)}{dR} \geq 0. \quad (3)$$

Совмещая уравнение (2) и неравенство (3) получим уравнение для критического значения радиуса ядра R_{cr}

$$R_{cr}^3 \left\{ \frac{2[\sigma_0 - 0,15(T_{cr} - 288)] \cdot 10^{-3}}{R_{cr}} - p_s(T_{cr}) - p_0 \right\} = \frac{32 [\sigma_0 - 0,15(T_{cr} - 288)] \cdot 10^{-9}}{T[p_s(T) - p_0]}, \quad (4)$$

где T_{cr} , T – начальное, критическое и текущее значение температуры, σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения при температуре $T = 273$ К.

Оценка количества воды, переходящей из жидкого состояния в парообразное состояние может быть произведена с помощью функции распределения ядер конкурентной фазы по размерам, которая принимается в виде [3, 4]

$$N(R) = \frac{\alpha}{1,33\pi(R_{max} - R_{min})R^3} = \frac{A}{R^3}, \quad (5)$$

где α – объёмное содержание в воде газов в свободном состоянии, R_{max} , R_{min} – максимальный и минимальный радиус ядер. Постоянная A определялась нами экспериментально термоакустическим методом [5].

В основу методики измерений концентрации ядер конкурентной фазы и распределения их по размерам положен анализ импульсного акустического излучения, сопровождающего взрывообразный рост ядер в перегретой воде. Экспериментальная термоакустическая установка (Рис. 2) состояла из термостата 1 и вспомогательного сосуда-охладителя 2, заполненных синтетическим маслом SAE 25W/50 (API CG – 4/SJ), предназначенным для использования в высокооборотных турбодизелях.

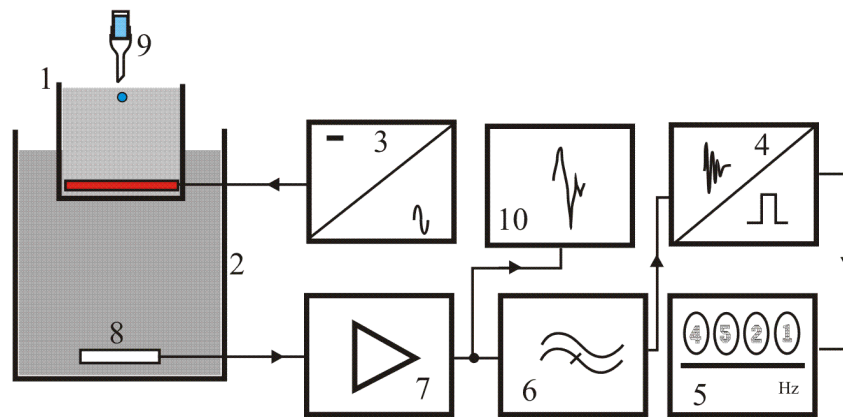


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

Масло имело температуру вспенивания порядка 395 °С и среднюю плотность $\langle \rho_F \rangle \cong 853$ кг/м³. В термостате располагался плоский электрона-

греватель, питающийся от регулируемого источника постоянного тока 3, обеспечивавшего стабилизацию заданной температуры масла в термостате. Акустический пьезокерамический широкополосный гидрофон (пьезокерамика PZT-10) в виде цилиндрической пластины толщиной 1 мм и диаметром $5 \cdot 10^{-2}$ м размещался у дна вспомогательного сосуда с целью предотвращения перегрева выше точки Кюри.

Перед началом измерений в механическом смесителе, работающем в режиме пузырьковой гидродинамической кавитации, приготавливалась водотопливная эмульсия заданной обводнённости и дисперсности. Порционное устройство 9 генерировало каплю эмульсии в термостат, в котором температура ступенчато с интервалом $\Delta T \cong 10$ К могла изменяться от $T_{\min} = 387$ К до $T_{\max} = 570$ К. Нагревание эмульсии сопровождалось вскипанием микрообъёмов воды, содержащих ядра конкурентной фазы с размерами равными или превышающими критический для данной температуры.

Взрывообразное изменение фазового состояния воды сопровождалось генерированием акустического импульса (Рис. 3) вида

$$p_A(\tau) = p_{A(\max)} \exp(-k_A \tau) \sin(\omega \tau + \psi), \quad (6)$$

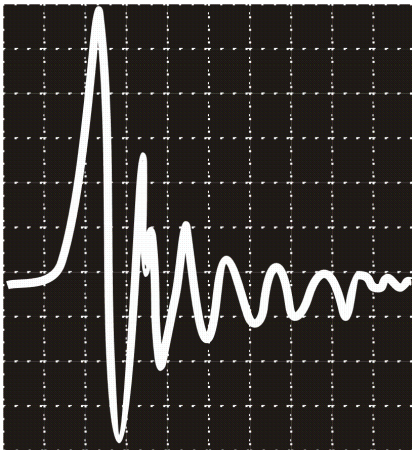


Рис. 3. Акустический импульс

где τ – текущее время, k_A – постоянная затухания, ω – циклическая частота, ψ – начальная фаза. Следует отметить, что экспоненциально затухающие колебания с периодом около $\cong 10^{-4}$ с обусловлены резонансным возбуждением термостата и вспомогательного сосуда. Короткий импульс, вызванный микровзрывом микрообъёма воды, возбуждает радиальные колебания цилиндрической поверхности термостата и вспомогательного

сосуда. Акустический импульс, преобразованный пьезоэлементом 8 в элек-

трическое напряжение, усиливался широкополосным усилителем 7 и подавался на фильтр нижних частот 6 с целью подавления низкочастотных структурных шумов и на вход запоминающего осциллографа 10. Преобразователь 4 служил триггерный преобразователь экспоненциально затухающих импульсов с заполнением в прямоугольные импульсы малой длительности и большой крутизны фронтов. Количество импульсов регистрировалось цифровым частотомером 5, работающим в режиме суммирования. Таким образом, аппаратный комплекс и применяемая методика позволяли измерять число ядер конкурентной фазы в единичном объёме воды, терявших устойчивость при заданной степени перегрева рабочей жидкости.

Эксперименты проводились с водотопливными эмульсиями на основе дизельного топлива, авиационного керосина, флотских мазутов и топочных мазутов. На рис. 4 точками показана зависимость $G = f(T)$ для мазута марки М-60 со среднеарифметическим диаметром включений воды $\langle d_w \rangle = 5 \cdot 10^{-5}$ м. Теоретическая зависимость получена подстановкой решения уравнения (4) в распределение (5) при экспериментальном значении коэффициента $A = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$. Пересчёт значений $G(T)$ в соответствующие значения $R_{cr}(T)$ осуществлялся так же по уравнению (4). Сопоставление теоретических и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о правомерности разработанной физической модели процессов. Следует отметить, однако, что электронная реализация термоакустического метода затрудняла регистрацию при температурах, превышающих $T \cong 560 \text{ К}$, т.к. частота следования импульсов превышала $f > 100 \text{ с}^{-1}$, что не намного меньше температуры максимально возможного перегрева воды $T_{\max} = 575 \text{ К}$. При температурах близких к T_{\max} изменяется природа образования ядер конкурентной фазы. Наряду с гетерогенным процессом происходит гомогенное образование паровых ядер в результате тепловых флуктуаций

плотности воды, которые приводят к возникновению кластерных образований.

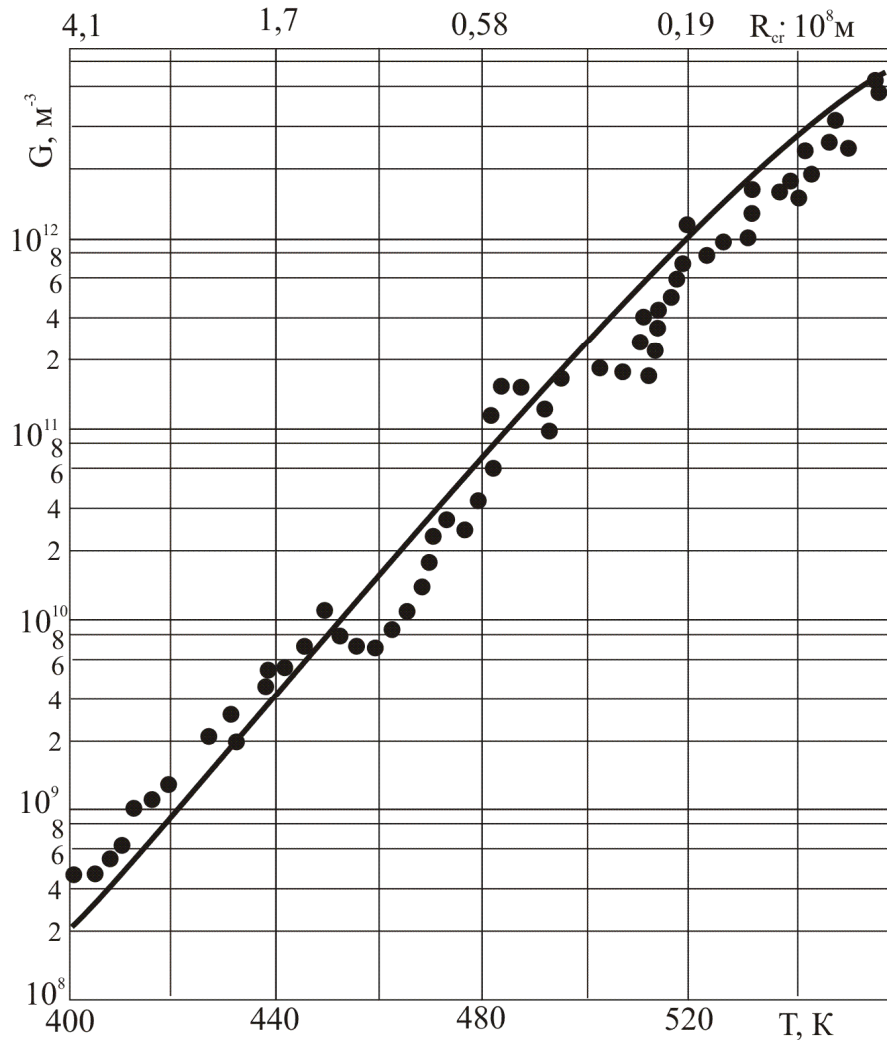


Рис.4. Зависимость числа ядер конкурентной фазы в единице объёма воды от температуры

Как следует из полученных результатов, для капель эмульсии с $d_w < 10^{-4}$ м вероятность присутствия гетерогенных ядер достаточно велико. Для капли эмульсии с средним арифметическим диаметром $\langle d_F \rangle = 10^{-4}$ м при объёмной концентрации воды $\phi = 0,2$ её объём $V_F \cong 10^{-13}$ м³. Как следует из данных, приведенных на рис.4, для $T < 573$ К трансформация воды в пар по гетерогенной схеме происходит только в каждом пятом включении воды, остальные четыре капли воды взрываются по гетерогенной схеме, т.е.

микровзрыву таких капель предшествует процесс образования ядра конкурентной фазы при температурах, близких к максимально возможным перегревам воды.

Последнее обстоятельство делает необходимо внести некоторые коррективы в ранее опубликованные модели микровзрыва капель эмульсии, разработанные на основе анализа экспериментальных данных полученных в лабораторных условиях для относительно крупных капель эмульсии, порядка 10^{-3} м [6, 7], которые на наш взгляд, не могут быть безоговорочно перенесены на реальные камеры сгорания, особенно, работающие в условиях повышенных давлений (дизельные двигатели). Схемы прогрева и воспламенения капель эмульсии, рассматриваемые в известной литературе, достаточно правдоподобно описывают процессы в камерах сгорания, работающих при атмосферном давлении (топочные устройства котлов различного назначения), где в распыленном топливе присутствует большое количество капель топлива крупного размера.

Процесс начальных стадий прогрева капель полидисперсных капель эмульсии (Рис.1) целесообразно рассмотреть в предположении его сферической симметрии и охарактеризовать термодинамическими параметрами эмульсии, являющимися функциями температуры, теплопроводностью λ_E , удельной теплоёмкостью c_E , коэффициентом поверхностного натяжения σ_E , плотностью ρ_E и коэффициентом кинематической вязкости ν_E [7]

$$\lambda_E = \lambda_F + (\lambda_w + \lambda_F)\varphi_v [1 - 0,72(1 - \varphi_v)], \quad (7)$$

$$c_E = \varphi_v c_w + (1 - \varphi_v)c_F, \quad (8)$$

$$\nu_E = \nu_F(1 + 2,36\varphi_m), \quad (9)$$

$$\rho_E = \rho_F - \varphi_v(\rho_w - \rho_F), \quad (10)$$

$$\sigma_E = \sigma_F [1 + (2,4 - 3 \cdot 10^{-2}t)\varphi_m], \quad (11)$$

где $\varphi_v = V_w/(V_w + V_F)$, $\varphi_m = m_w/(m_w + m_F)$ – объёмная и массовая концентрация воды в топливе, λ_w , λ_F – коэффициенты теплопроводности воды и

топлива, c_W и c_F – соответствующие удельные теплоемкости, σ_W , σ_F – коэффициенты поверхностного натяжения, t – температура в градусах Цельсия. Теплообмен капли эмульсии с внешней высокотемпературной средой в такой постановке описывается уравнением

$$c_E \rho_E \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_E r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (12)$$

где τ – время, r – текущее значение радиуса.

При постоянстве внешней температуры $T_s = \text{const}$ и $T(r,0) = T_0$ на поверхности капли выполняются граничные условия третьего рода

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} T(0, \tau) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial r} T(R_F, \tau) = H[T_s - T(R_F, \tau)], \\ \frac{\partial}{\partial r} T(0, \tau) = 0, T(0, \tau) \neq \infty, \end{cases} \quad (13)$$

где H – постоянная величина, определяющая величину теплового потока на границе со средой, имеющей температуру T_s . Общее приближённое решение уравнения (12) с граничными условиями (13) имеет вид

$$\Theta(r, \tau) \approx T_s - T(r, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\vartheta_n}{\vartheta_n - \sin \vartheta_n \cos \vartheta_n} \frac{R_F \sin\left(\vartheta_n \frac{r}{R_F}\right)}{r} \times \exp(-\vartheta_n^2 \cdot Fo), \quad (14)$$

где ϑ_n – корни характеристического уравнения, Fo – критерий Фурье.

На рис.5 приведены результаты численного решения уравнения (12) полученные для внешней температуры $T_s = 10^3$ К. Температура на поверхности капли эмульсии T_F зависит от объёмного содержания в ней воды. Так, например, для капли эмульсии радиусом $R_F = 2 \cdot 10^{-4}$ м температура её поверхности, соответствующей началу процесса образования конкурентной паровой фазы, при объёмной концентрации воды $\varphi_V = 0,05$ составляет $T_1 = 587$ К, а при $\varphi_V = 0,2$ – $T_2 = 519$ К, при $\varphi_V = 0,5$ – $T_3 \cong 586$ К.

Фазовая трансформация вода-пар начинается, в соответствие с развиваемой моделью, при условии

$$\varphi_v \int_V \int_{R_{cr}}^{R_{vax}} N(R) dR dV = 1, \quad (15)$$

где $V_F = 4/3(\pi R_F^3)$ – объём капли эмульсии. Уравнение (15) предполагает, что математическое ожидание числа ядер, способных потерять устойчивость равно единице.

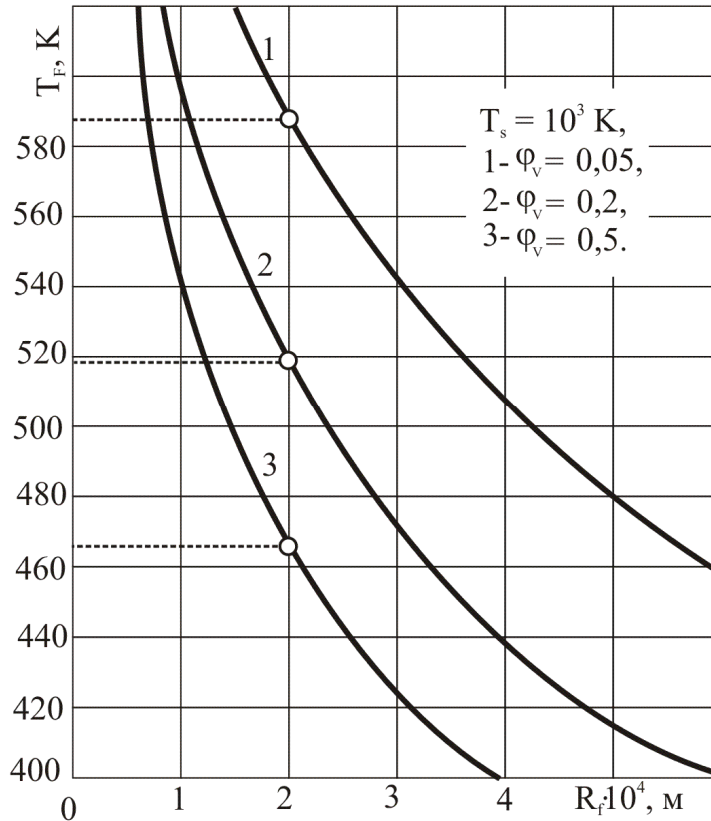


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности капли от её диаметра при температуре внешней среды $T_s = 10^3 \text{ K}$

Как видно из уравнения (14) в объёме капли вдоль её радиуса будет существовать градиент температуры с максимумом на поверхности. Присутствующие в приповерхностном слое капли эмульсии частички воды будут претерпевать фазовые превращения при условии выполнения условия (15). Будет наблюдаться поверхностное вскипание исходной капли, сопровождающееся эффектом разбрызгивания. Из объёма капли вследствие множественных микровзрывов в приповерхностном слое будут вырывать-

ся мелкие сферические фрагменты – топливный туман. На практике этот эффект наблюдался в камерах сгорания котлов в виде увеличения яркости факела при использовании водотопливных эмульсий [6, 7]. Фотографии этого эффекта в настоящее время используются в рекламных целях практически всеми производителями устройств для производства водотопливных эмульсий.

Как следует из данных рис. 5 в каплях эмульсии малого диаметра испарение воды протекает при более высоких температурах, что предполагает качественно иное протекание процесса. Такие капли будут воспламеняться до момента возникновения в их объёме конкурентной фазы. Процессы трансформации воды в пар в этом случае происходят по гомогенной схеме на конечных стадиях выгорания капель.

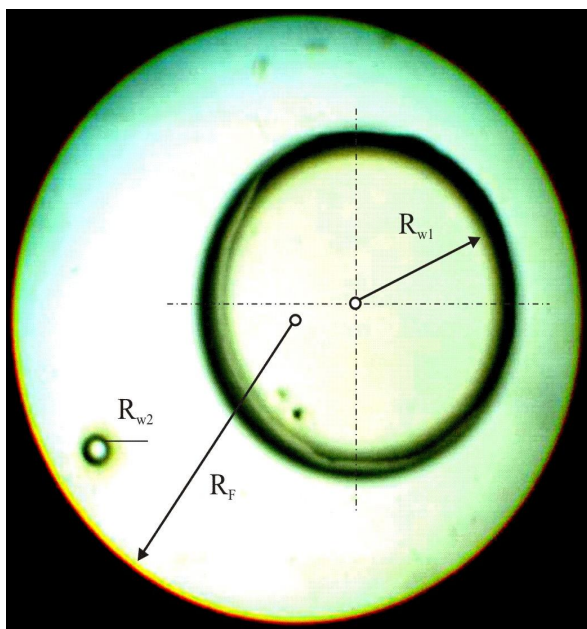


Рис. 6. Капля крупнодисперсной эмульсии

При использовании водотопливных эмульсий в камерах сгорания котлов, работающих на тяжёлых сортах топлива, ввиду присутствия в факеле относительно крупных капель, желательно иметь дисперсность, обеспечивающую при заданной обводненности минимальное количество включений воды. На рис.6 приведена фотография эмульсии, в которой содержится два сферических вклю-

чения воды существенно разного объёма: $R_F \cong 6 \cdot 10^{-4}$ м, $R_{w1} \cong 2,5 \cdot 10^{-4}$ м, $R_{w2} \cong 2,5 \cdot 10^{-5}$ м. Фазовый переход воды в пар начнётся при температуре не превышающей значение $T_{cr} = 440$ К. Для таких капель будет характерен микровзрыв, следствием которого станет дробление исходной капли на не-

сколько более мелких фрагментов. Процесс будет протекать по гетерогенной схеме, т.к. в этом случае $N(R) \gg 1$.

Полученные данные позволяют заключить, что капли водотопливной эмульсии сопровождаются при их нагревании в камерах сгорания явлением микровзрыва, параметры которого определяются объёмным содержанием воды в топливе и дисперсности эмульсии. Возможны три качественно разных процесса фазовых трансформаций воды, каждый из которых сопровождается отличными друг от друга схемами дробления исходных капель топлива.

Литература

1. Лебедев О.Н. Некоторые особенности горения капель водотопливной эмульсии в дизелях // Физика горения и взрыва. –1978. –№2. – С.142–145.
2. Кнэпп Р., Дэйли Дж., Хэммит Ф. Кавитация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 687 с.
3. Исаков А.Я. Некоторые особенности микровзрыва капли водотопливной эмульсии // Физика горения и взрыва..– 1986. –№1 –С.125 – 126.
4. Исаков А.Я., Дёминов В.И. Физическая модель процессов, предшествующих воспламенению капель водотопливной эмульсии // Физика горения и взрыва. 1986. – №6 – С. 15 – 20.
5. Исаков А.Я. Исследование условий образования конкурентной фазы в диспергированных жидкостях термоакустическим методом // Труды IV Дальневост. акуст. конф. «Акустические методы и средства исследования океана». –Владивосток: ДВНЦ АН СССР, Минвуз РСФСР, ДВПИ, 1986. –С.143 – 147.
6. Иванов В.М. Топливные эмульсии. – М.: АН СССР, 1962. – 407 с.
7. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Сисин В.Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1988. – 105 с.