

Е. Н. Кондратьев, В. В. Опятюк, К. И. Семенов

*Институт горения и нетрадиционных технологий
Одесского национального университета им. И. И. Мечникова*

Пульсационный режим испарения капли водо-топливной эмульсии

В статье приведены результаты эксперимента по испарению капель водо-топливной эмульсии, обратного типа на основе масел. Представлена модель, описывающая предвзрывную динамику разогрева капли ВТЭ при вариации параметров системы, таких, как температура газа, начальный размер капель, размер глобул, концентрация воды. Результаты численного моделирования сопоставляются с аналитическими оценками времени пульсации и экспериментальными данными.

Постоянный дефицит энергоносителей и ухудшающаяся экологическая обстановка выдвигают в число приоритетных технологии, позволяющие без потери качества работы энергоагрегата экономить топливо и уменьшать вредные выбросы.

В настоящее время проблемы сбережения энергоносителей и защиты окружающей среды стали чрезвычайно актуальными. Это выдвинуло на первый план задачи производства и применения альтернативных моторных топлив. Качество альтернативных топлив имеет решающее значение в оценке перспектив их практического применения, поскольку они должны обладать такими же свойствами, как и традиционные топлива и соответствовать действующим стандартам.

Одним из таких топлив является водо-топливная эмульсия (ВТЭ). Известно [1-3], что при сжигании ВТЭ обратного типа глобулы воды, испаряясь, образуют пузырьки пара, которые взрываются внутри оболочки из топлива. Горючее распыляется на мелкие частички, и хорошо перемешиваются с воздухом, что способствует качественному смесеобразованию в камере сгорания двигателей. В жидком состоянии, вода являясь естественным тормозом всех тепловых процессов, приводит к нестабильной работе энергетических установок. В то же время в парообразном виде вода регулирует течение процессов горения, способствует полному выгоранию горючего и, как следствие, улучшает экологические характеристики сжигания тяжелых углеводородов. Поэтому, водоземulsionное топливо целесообразно предварительно подготавливать к горению, путем перевода как можно большей части воды из жидкого состояния в парообразное.

Одним из подходов к решению данного вопроса является организация

процесса предварительного выпаривания воды из состава ВТЭ за счет части тепла, которое выделяется при сжигании ВТЭ в устройствах горения.

В данной работе исследуется поведение капель ВТЭ обратного типа на основе масел при таких температурах среды, когда топливная компонента еще не может воспламениться, а вода закипает. Подобные условия реализуются в энергосиловых установках и котлоагрегатах в процессе подготовки топливной смеси к воспламенению.

Опыты проводились на установке, блок схема которой представлена на рис.1.

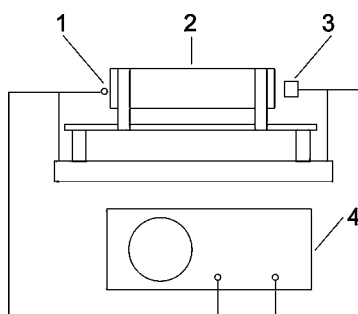


Рис. 1. Блок -схема экспериментальной установки

На подвес, изготовленный из хромель-алюмелевой термопары 1 (диаметр спая 200 мкм) помещалась капля ВТЭ, диаметр которой варьировались в пределах от 1500 до 3000 мкм. При помощи горизонтальной передвижной печи 2 подвес с каплей располагался внутри ее на расстоянии пяти диаметров печи от ее края. Температура капли исследуемой ВТЭ и серии вспышек регистрировалась термопарой 1 и фотодиодом 3. Сигналы с термопары и фотодиода подавались на запоминающий двухканальный осциллограф 4 с последующей фотографической фиксацией осциллограмм.

В ходе проведения опытов варьировались температура разогрева печи от 250 до 500 градусов Цельсия и процентное содержание воды в эмульсии от 10 до 40 процентов. Капля ВТЭ, расположенная на подвесе, нагревалась за счет конвективного теплообмена с воздухом, находящегося внутри печи. Когда температура дисперсионной среды (масла) превышала температуру кипения воды, визуально наблюдалось периодически повторяющееся увеличение капли в размерах, сопровождающимся выбросами масляно-паровой оболочки.

На рисунке 2 изображена типичная осциллограмма ЭДС термопары с каплей ВТЭ (кривая 1), помещенной в печь и ЭДС фотодиода, регистрирующего вспышки диспергированного масла при сбросе оболочек капли (кривая 2). На участке до первой “ступеньки” кривой 1 происходит инертный

прогрев капли ВТЭ до температуры кипения воды от окружающей среды (воздуха). От 1 до 7 секунды прослеживается пульсационная динамика разогрева капли, без горения. Можно заметить ступенчатый характер изменения температуры капли ВТЭ, с периодичностью 0,7-0,8 сек и разностью температур в 30°С. В момент скачка температуры в окрестности горячей стенки печи фотодиодом зафиксированы (кривая 2) вспышки сбрасываемой масляно-паровой оболочки. Видимое резкое увеличение температуры в районе 9 секунды обусловлено возгоранием масла, что представляет отдельный вопрос исследований.

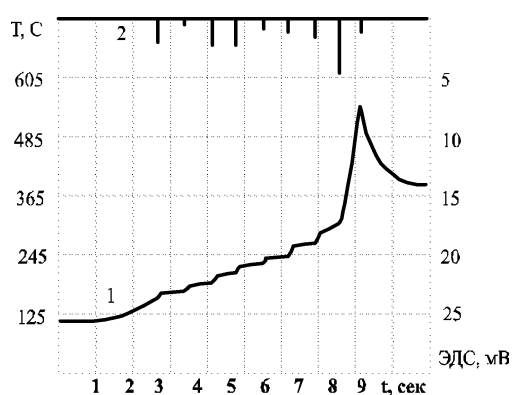


Рис. 2. Типичные осциллограммы полученные в ходе эксперимента

Физическая интерпретация динамики разогрева и испарения капли ВТЭ

В обычном состоянии ВТЭ представляет собой двухфазную дисперсную систему. Однако, при достаточно интенсивном разогреве, когда тепла, поступающего из окружающей среды достаточно для вскипания воды, появляется третий компонент — пар воды. При этом, вследствие лапласовского давления более крупные включения воды имеют меньшую температуру кипения, чем мелкие глобулы. Поэтому на первой “ступеньке” закипают именно они. Растущие со временем оболочки пара увеличивают объем капли ВТЭ. Сама дисперсионная среда, в данном случае — масло, из-за высокой температуры возгонки (порядка 700 °С) практически не меняет свой объем. Поэтому рост паровых оболочек приводит к структурной перестройке капли. В ее результате объемная доля пара непрерывно увеличивается, а доля масла падает. Ясно, что такой процесс может продолжаться лишь до определенного предела. Неизбежно наступит такой момент, когда будет достигнуто состояние максимального наполнения паровыми оболочками объема капли. Дальнейшее увеличение объема капли без нарушения ее сплошности стано-

вится невозможным и капля разрушается. Сам момент разрушения сопровождается быстрым выбросом в окружающую среду паров воды, части масла и некоторой доли не успевших испариться глобул воды. При не слишком высоких темпах нагрева оставшийся материал капли под действием сил поверхностного натяжения восстанавливает сферическую форму и процесс повторяется. Однако при этом уже вскипают глобулы меньшего размера. Это приводит к увеличению температуры кипения, и, следовательно, к более высокой температуре дисперсионной среды. Подобная динамика разогрева капли подтверждается ступенчатым ростом температуры капли (кривая 1). Процесс такого пульсационного испарения капли ВТЭ идет либо до полного разрушения капли, либо до того момента, пока масло не разогреется до температуры воспламенения, приводящего к горению. Таким образом, наблюдаются колебания поверхности капли, имеющие явно выраженный релаксационный характер. Период этих колебаний оказывается достаточно большим. В отдельных опытах он достигал значения до одной секунды.

Период пульсации капли ВТЭ при испарении

Рассмотрим каплю водо-топливной эмульсии обратного типа с моноперсным законом распределения частиц воды. После достижения температуры кипения вокруг каждой частицы воды начинает образовываться паровая оболочка. Увеличивающийся со временем объем пара V_n вызывает увеличение объема глобулы V и соответственно всего объема капли V_k .

$$V_k = V_M + NV \quad (1)$$

здесь N — число частиц воды в капле, V_M — объем дисперсионной среды (масла). Объем глобулы в этом выражении есть:

$$V = V_g + V_n \quad (2)$$

где V_g — объем частицы воды.

Объем масла, ввиду его высокой условной температуры кипения, будем считать постоянной величиной. А в пренебрежении эффектом коагуляции, также постоянным можно считать число глобул.

Кроме того, в расчетах будем учитывать закон сохранения массы вещества в глобуле:

$$m_{во} = m_n + m_g \quad (3)$$

где $m_{во}$ — начальная масса воды в глобуле, m_n и m_g — текущие массы пара и воды соответственно.

Произведем аналитическую оценку времени периода пульсации. Периодом пульсации будем считать то время, за которое происходит испарение воды внутри объема капли эмульсии до момента диспергирования паров

воды и части масла в окружающую атмосферу. Этот момент определяется условием нарушения сплошности среды, которое удобно описать достижением объемного концентрационного фактора

$$C = NV / V_k \quad (4)$$

значения, соответствующему состоянию плотной упаковки глобул C^* . В частности, для кубической упаковки $C^*=0,53$.

Для простоты будем полагать, что кинетика испарения частиц воды подчиняется закону Срезневского:

$$R_{го}^2 = R_0^2 - kt \quad (5)$$

здесь, $R_0, R_{го}$ — текущий и начальный радиусы частицы воды, соответственно, k — так называемая константа испарения при кипении:

$$k = \frac{2\lambda_n}{L_g \rho_g} (T_n - T_{кин}) \quad (6)$$

где L_g, c_g — теплота парообразования и плотность воды, а T_n, λ_n — температура пара и его теплопроводность, $T_{кин}$ — температура кипения воды, для данного размера частиц воды.

В этих предположениях, решая систему уравнений (1-5), не трудно получить выражение для периода пульсации:

$$\tau = \frac{R_{го}^2}{k} \left[1 - \left(\frac{\rho_g / \rho_n - (1 - C_o) C^* / (1 - C^*) C_o}{\rho_g / \rho_n - 1} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (7)$$

где c_n — плотность пара.

Видно, что для высококонцентрированных эмульсий, когда начальная концентрация воды $C_o \rightarrow C^*$ пульсационный режим испарения вырождается. С другой стороны область существования пульсационного режима оказывается ограниченной по концентрации снизу. Очевидно, в этом случае период пульсации совпадает со временем полного испарения воды в глобуле.

Более простой вид для периода пульсации можно получить учитывая в (7) малость параметра ρ_n / ρ_g

$$\tau = \frac{R_{\text{го}}^2}{k} \frac{\rho_n}{\rho_{\text{г}}} \frac{(1-C_o)C^*}{(1-C^*)C_o} \quad (8)$$

В этом выражении видна явная ниспадающая зависимость периода пульсации от начальной концентрации. Квадратичная зависимость периода пульсации от размера частицы воды на самом деле нивелируется зависимостью константы испарения от температуры кипения, которая, вследствие проявления лапласова давления, растет с уменьшением размера частицы воды.

Таким образом, полученное аналитическое выражение времени пульсации указывает на существование пределов пульсационного испарения капли ВТЭ и предсказывает довольно сильную зависимость этой величины от начального содержания воды в составе ВТЭ.

К сожалению, неопределенность величины перепада температур $(T_n - T_{\text{кип}})$, входящее в выражение (6) для константы испарения, затрудняет проведение числовой оценки времени пульсации. Поэтому, с целью получения числового значения периода пульсации, предложена более детальная модель выпаривания воды из состава эмульсии.

Модель испарения капли ВТЭ

Как показывают результаты эксперимента и проведенная аналитическая оценка, картина испарения перед воспламенением капли ВТЭ представляется достаточно сложной. Это объясняется влиянием на динамику испарения и самого периода пульсаций различных факторов: содержанием воды в составе эмульсии, дисперсностью глобул, размером капель.

Так как, ввиду не тривиальности, наибольший интерес представляет стадия пульсирующего поведения капли, то в дальнейшем ограничимся рассмотрением именно этой стадии испарения капли ВТЭ. При моделировании учтем, что процесс накопления пара в объеме капли достаточно медленный, поэтому можно рассматривать задачу в квазистационарной постановке. При этом постулируем следующие положения модели:

- капля представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из масла как дисперсионной среды и частиц воды, окруженных паровой оболочкой;
- частицы воды в капле эмульсии подчиняется монодисперсному закону распределения;
- испарение масла не происходит, ввиду того, что температура возгонки масла (700 °С) намного больше температур кипения глобул воды;
- уравнение состояния паров воды подчиняется закону идеального газа $p = nkT$, так как система находится далеко от критических условий;
- число подобия Нуссельта принимается равным двум из-за сферичнос-

ти формы капли и небольших скоростей движений глобул воды внутри капли ВТЭ;

– коэффициенты теплопроводности компонентов полагается постоянными, поскольку диапазон перепадов температур для рассматриваемой стадии в эмульсии невелик.

Считая, что капля с момента вскипания представляет трехфазную систему, составим уравнения теплового баланса для каждой фазы.

Уравнения разогрева масла с учетом теплообмена капли с окружающей средой и теплоотдачи глобулам воды в капле имеет вид:

$$c_m \rho_m V_m \frac{dT_m}{dt} = 2\pi\lambda_\infty (T_\infty - T_m) R_k - N Q_{mz} \quad (9)$$

где, c_m, ρ_m, T_m — теплоемкость, плотность, температура масла, соответственно; λ_∞, T_∞ — теплопроводность и температура окружающей среды, соответственно; R_k — радиус капли ВТЭ.

Q_{mz} — поток тепла на границе масло-глобула.

Кинетика испарения глобулы воды определяется уравнением:

$$L \frac{dm_g}{dt} = -Q_{ng} \quad (10)$$

где, $m_g = \rho_g \frac{4}{3} \pi R_g^3$, R_g — текущий радиус глобулы воды, Q_{ng} — поток тепла на границе пар-вода.

Потки тепла Q_{mz} и Q_{ng} , фигурирующие в уравнениях (9) и (10) в случае квазистационарного течения процесса равны между собой. Их выражения могут быть найдены из решения уравнения Лапласа $\Delta T = 0$ для распределения температуры внутри паровой оболочки:

$$T(r) = A - \frac{B}{r}, \text{ где } A = T_m - \frac{T_{кип} - T_m}{\frac{R_{об}}{R_g} - 1}, \quad B = \frac{T_m - T_{кип}}{\frac{1}{R_g} - \frac{1}{R_{об}}} \quad (11)$$

где, $R_{об}$ — радиус паровой оболочки вокруг глобулы воды, r — радиальная координата для оболочки, $T_{кип}$ — температура кипения воды для определенного размера глобулы воды, которая находится по формуле Исакова [5]

Тогда, применяя закон Фурье $\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T$, находим

$$Q_{ng} = Q_{mz} = 4\pi\lambda_n \frac{T_m - T_{кип}}{R_{об} - R_g} R_{об} R_g \quad (12)$$

здесь λ_n — теплопроводность пара. Границы оболочки $R_{об}$ и R_g подвижны и

связаны между собой интегральным соотношением:

$$m_n = m_{go} - m_g = \int_{R_k}^{R_{go}} \rho_n dV_n$$

Замыкает систему уравнений (9) — (12) выражение для объема капли:

$$V_k = V_M + NV \quad (13)$$

с помощью которого рассчитывается текущий радиус капли R_k .

Система интегрировалась по схеме Рунге-Кутты с коррекцией шага интегрирования по заданной точности. Размер оболочки пара находился из решения трансцендентного уравнения, выражающее баланс массы воды между частицей воды и паром в каждой глобуле. Расчеты производились до момента времени, которому соответствовало равенство $C_o = C^*$. Полученные в результате параметрических расчетов зависимости периода пульсаций от начальной концентрации воды и размеров капель, а также начальных размеров частиц воды представлены на рис.(3)-(5)

Результаты расчетов и их обсуждение

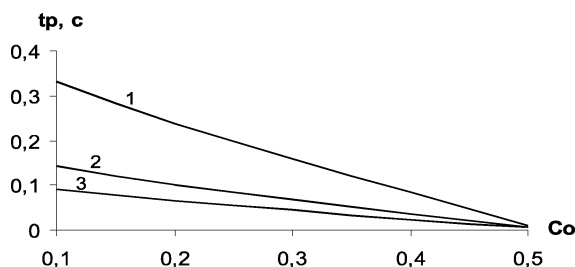


Рис. 3. Зависимость времени периода пульсации от начальной концентрации
 $T_1=700$ К; $T_2=1000$ К; $T_3=1300$ К

Основной целью проведения расчетов являлось изучение динамики изменения температур капли, воды и пара, а также прослеживание кинетики изменения размеров капли, глобул воды в течении одного периода пульсаций. Путем численного моделирования релаксационных колебаний поверхности капли ВТЭ были рассмотрены зависимости величины времени периода пульсации от параметров системы, а именно, от концентрации воды в эмульсии (рис.3), температуры среды (рис.4), начального размера капли (рис.5), и размеров глобул воды (рис.6).

Из представленных зависимостей видно, что:

– с уменьшением концентрации время периода пульсации возрастает. Потому что, для малых концентраций глобул воды, среднее расстояние между

ними больше и увеличивающимся паровым оболочкам требуется больше времени на рост до момента соприкосновения их друг с другом;

– с увеличением температуры среды время периода пульсации уменьшается, так как, при более высоких температурах увеличивается поток тепла подводимого к глобулам. Процесс кипения идет интенсивнее и, соответственно, увеличивается скорость роста паровых оболочек. Эти растущие оболочки быстрее достигают состояния плотной упаковки;

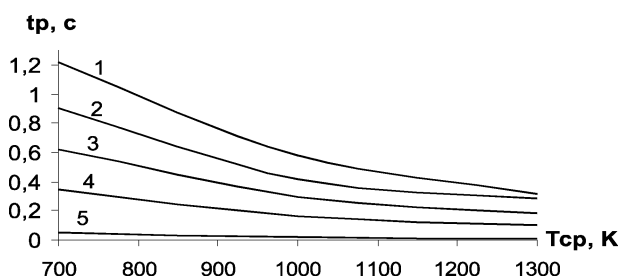


Рис. 4. Зависимость времени периода пульсации от температуры среды
 $C_1=0.1$; $C_2=0.2$; $C_3=0.3$; $C_4=0.4$; $C_5=0.5$

– с увеличением размера капли, время периода пульсации увеличивается: чем больше капля, тем больше требуется тепла на ее разогрев. Поэтому при фиксированных температурах внешней среды требуется больше времени для нарушения сплошности капли;

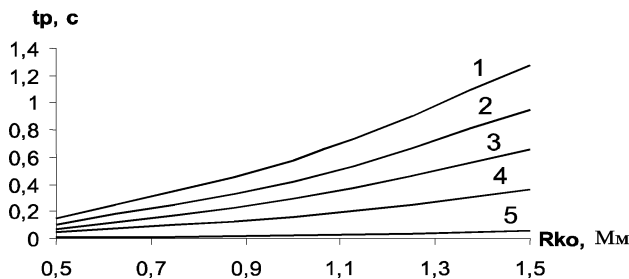


Рис. 5. Зависимость времени периода пульсации от начального размера капли
 $C_1=0.1$; $C_2=0.2$; $C_3=0.3$; $C_4=0.4$; $C_5=0.5$

– с увеличением радиуса глобулы воды, при малых температурах среды, время периода пульсации уменьшается незначительно, так как, требуется больше тепла на прогрев и кипение самих глобул. При больших размерах глобулы воды и значительных величинах температуры среды характерно

малое возрастание времени периода пульсации, так как быстрее достигается состояние плотной упаковки.

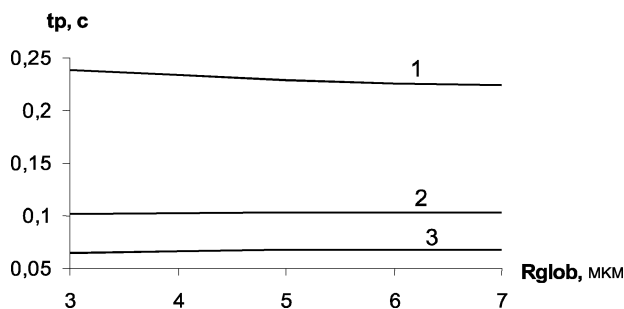


Рис. 6. Зависимость времени периода пульсации от размеров глобул

Выводы

Таким образом, проведенные экспериментальные и теоретические исследования динамики пульсационного режима испарения капли позволяют заключить, что определяющим механизмом является периодически повторяющийся процесс сравнительно медленного накопления пара и его последующего быстрого выброса после достижения им предельно возможного количества в объеме капли ВТЭ. Восстановление формы капли после диспергирования, вследствие проявления сил поверхностного натяжения обуславливают периодичность процесса. Проведенная аналитическая оценка характеристик периода пульсаций, результаты численного моделирования подтверждают данные эксперимента и объясняют основные зависимости периода пульсаций от параметров эмульсии. Выявленная в целом достаточно протяженная длительность пульсационной стадии испарения капли ВТЭ подтверждает тезис о тормозящем действии воды в жидком виде и требует учета при поиске технологических решений в задачах энергетического преобразования ВТЭ.

Литература

1. Иванов В.М. Топливные эмульсии. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 216 с.
2. Яковлев А.В., Дунаева В.А., Гладких В.С. Воспламенение обратных ВТЭ // Химия и технология топлив и масел. — 1984. — № 12. — С. 34.
3. Лебедев О.Н. Некоторые особенности горения капель водо-топливных эмульсий в дизелях // ФГВ. — 1978. — Т. 14, № 2. — С. 45.
4. Исаков А.Я. Некоторые особенности микровзрыва капли водо-топливной эмульсии // ФГВ. — 1985. — Т. 21, № 1. — С. 126.
5. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии, поверхностные явления и дисперсные системы. — М., 1989. — 464 с.

Є. Н. Кондратьєв, В. В. Опятюк, К. І. Семенов
**Пульсаційний режим випаровування краплі
водо-пальної емульсії**

АНОТАЦІЯ

У статті представлені результати експерименту що до випаровування крапель водо-пальної емульсії, зворотного типу на основі олій. Пропонується модель розігріву краплі ВПЕ. На базі цієї моделі отриманні результати чисельного моделювання, що просліджують попередвзривну динаміку розігріву краплі ВПЕ при варіації параметрів системи, таких, як температура газу, початковий розмір краплі, розмір глобул, концентрація води.

Kondratev E. N., Opyatyuk V. V., Semenov K. I.
Dynamics of heating of a drop WFE before implosion

SUMMARY

The results of experimental research of water-fuel (oil) inverse type emulsion drops are presented. The model of WFE drop heating is proposed. Results of numerical modelling on the basis of this model are analysed. The dynamics of WFE drop heating and pre-explosion processes as a function of system parameters, such as temperature of gas, initial size of drops, size of globules, concentration of water is considered.