

УДК 66.013.8

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ  
КАПЕЛЬ ЭМУЛЬСИИ ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА  
В ФАКЕЛЕ ПАРОВОГО КОТЛА****В. П. ИВАНОВ, В. А. ДРОНЧЕНКО***Учреждение образования «Полоцкий государственный  
университет», г. Новополоцк, Республика Беларусь***Введение**

Предприятия, имеющие котельные установки, особое внимание уделяют защите окружающей среды от веществ, выбрасываемых в атмосферу вместе с продуктами сгорания. Во многом это объясняется требованиями стандарта [1], который устанавливает нормы выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Актуальной проблемой, стоящей перед предприятиями, является также переработка и утилизация отработавших нефтесодержащих продуктов (НСП) и растворов технических моющих средств (ТМС), которые по мере их использования становятся токсичными, что представляет угрозу здоровью рабочих. Охрана их труда от воздействия указанных веществ не решена надлежащим образом. Существующие технологии регенерации и утилизации отходов требуют больших капитальных вложений, что является непосильным для большинства предприятий.

В Полоцком государственном университете разработан способ утилизации отработавших НСП и растворов ТМС, заключающийся в приготовлении на их основе мелкодисперсной эмульсии типа «масло в воде» с помощью ударных волн, образующихся при работе пневматического излучателя [2]. Полученная эмульсия используется в качестве добавки к газообразному или жидкому топливу, сжигаемому в котельных установках. Однако теоретически аспекты проблемы, связанные с разрушением капель эмульсии на основе отработавших НСП и растворов ТМС в факеле котла, требуют изучения и дальнейшего развития.

Цель работы – разработать математическую модель разрушения капель водотопливной эмульсии на основе отработавших НСП и растворов ТМС в факеле котла, объясняющую механизм теплообмена между средой и каплями эмульсии с обоснованием условий уменьшения содержания оксидов азота в продуктах сгорания топлива.

**Гипотеза**

Термическое обезвреживание отработавших НСП и растворов ТМС позволяет не только уменьшить объемы жидких отходов, но и качественно изменить горение топлива в котлах [3]. Наличие воды изменяет скорость распространения пламени [4]. Скорость цепной химической реакции пропорциональна концентрации активных центров процесса. У обводненных топлив этих центров больше [3], [4]. Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  при сжигании топливных эмульсий может быть достигнуто за счет снижения температуры газов в зоне горения и дополнительного дробления капель топлива парами вскипающей воды [5]. Наличие воды в эмульсии снижает температуру и длину факела, сокращает время сгорания топлива, что приводит к снижению выбросов оксидов азота и других вредных веществ с дымовыми газами.

**Методы исследования**

Применялось численное моделирование процесса сгорания капель эмульсии в топке парового котла. Диаметр капель эмульсии измеряли с помощью окулярмик-

рометра. Температуру факела котла измеряли контактным методом с помощью термомпары ТПР с диаметром спая 0,8 мм (пределы измерения температуры от 273 К до 1273 К). Размеры факела измеряли с помощью модели стальной линейки, помещенной в топку котла. Содержание оксидов азота в продуктах сгорания определяли анализатором дымовых газов «Testo-350».

### Основная часть

Эффективность сжигания эмульсии с топливом характеризуется скоростью горения, полнотой сгорания топлива и количеством выделившегося тепла. Важными факторами являются тонкость и равномерность распыления эмульсии и смешивание ее с топливом и воздухом. Капля эмульсии состоит из микрочастиц углеводородного топлива и воды. Разница между температурой кипения топлива и воды заставляет частицы воды закипать быстрее. Когда давление водяных паров превысит силы поверхностного натяжения поверхности капли происходит ее микровзрыв, при этом фрагменты капли разлетаются в разные стороны. Это приводит к дополнительному перемешиванию топлива с воздухом, повышению тепло- и массообмена факела, ускорению горения.

Математическое моделирование разрушения капли эмульсии при нагревании должно учитывать изменение ее размера, плотности, теплоемкости и теплопроводности. В работе [6] приведена модель факела водотопливной эмульсии, в которой критерием микровзрыва является достижение средней температурой материала капли  $T_{cp}$  некоторого критического значения. Такой подход допускает только один микровзрыв. Другим недостатком этой модели является то, что она не учитывает влагосодержание материала  $W$ . Исходная модель теплообмена между средой и каплей эмульсии имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T_{cp}}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda \frac{\partial T_{cp}}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\gamma(T_r - T_{cp}) = \lambda \frac{T_{cp}}{\partial r} - \rho q \frac{dr}{dt}, \quad (2)$$

где  $\rho$ ,  $c$ , и  $\lambda$  – плотность ( $\text{кг/м}^3$ ), теплоемкость ( $\text{Дж/К}$ ) и коэффициент теплопроводности материала капли ( $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$ );  $r$  – изменяющийся радиус капли ( $\text{м}$ );  $\gamma$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $q$  – удельная теплота испарения эмульсии,  $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$ ;  $T_r$  – температура газа,  $\text{К}$ ;  $T_{cp}$  – средняя температура материала капли,  $\text{К}$ .

На стадии нагрева, когда  $T_{cp} < T_{и}$  ( $T_{и}$  – температура испарения), радиус капли остается постоянным ( $dr/dt = 0$ ). Коэффициент теплоотдачи  $\gamma$  равен:

$$\gamma = \text{Nu} \lambda_r / r, \quad (3)$$

где  $\text{Nu}$  – критерий Нуссельта (для крупных капель  $\text{Nu} \approx 2$ );  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности газа,  $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$ .

Коэффициент теплопроводности материала капли вычислялся по формуле

$$\lambda = \frac{\lambda_m \left[ 1 - \left( 1 - \frac{3\lambda_m^2}{2\lambda_m \lambda_b + \lambda_b} \right) W \right]}{1 + \left( \frac{3\lambda_m}{2\lambda_m - \lambda_b} - 1 \right) W}, \quad (4)$$

где  $\lambda_m$  и  $\lambda_b$  – коэффициенты теплопроводности масла и воды,  $\text{Вт/м} \cdot \text{К}$ .

При нагревании эмульсии часть тепла уходит на нагревание топлива, а в области капли, где  $T_{cp} > 373 \text{ K}$ , остальное тепло расходуется на испарение воды и работу расширения пара внутри капли, которой, как показывают оценочные расчеты, можно пренебречь. Принимая, что вода и масло достигают температуры кипения воды одновременно, получаем количество теплоты, затраченной на ее парообразование:

$$S_n = 4\pi \left[ \int_{373}^{\infty} \rho c (T_{cp} - 373) r^2 dr - \int_{373}^{\infty} (1 - W) \rho_m c_m (T_m - 373) r^2 dr \right], \quad (5)$$

где интеграл берется по области капли, для которой  $T_{cp} > 373 \text{ K}$ .

Температура, плотность и теплоемкость эмульсии линейно зависят от аналогичных параметров масла и воды, поэтому количество пара  $m_n$  в капле может быть определено в виде

$$m_n = 4\pi c_{np} W \int_{373}^{\infty} (T_{cp} - 373) r^2 dr, \quad (6)$$

где  $c_{np} = [W\rho_m c_v + (1 - W)(\rho_v c_m + \rho_m c_v) + (W - 2)\rho_m c_m] / q_v$ ;  $\rho$ ,  $c$  и  $q$  – плотность, теплоемкость и удельная теплота испарения (индексы «м» и «в» указывают к какой компоненте эмульсии они относятся).

Одно и то же количество пара оказывает различное влияние на капли различного размера. Чтобы учесть размер капли, разделим массу пара на величину, характеризующую массу капли и прочность поверхностной пленки. Так как масса тонкого слоя капли и силы поверхностного натяжения поверхностного слоя капли пропорциональны квадрату радиуса, а масса всей капли – третьей степени радиуса, возьмем в качестве нормируемой величины  $r^n$ , где  $2 < n < 3$ . Меньшее значение  $n$  соответствует более тонким слоям и, следовательно, более частым микровзрывам. С учетом этого получаем следующий критерий  $q_n$  начала процесса срыва внешней оболочки капли:

$$q_n = \frac{c_{np} W}{r^n} \int_{373}^{\infty} (T_{cp} - 373) r^2 dr > q_0, \quad (7)$$

где  $q_0$  – критическое значение критерия.

Для того чтобы обеспечить возможность дополнительных взрывов, необходимо сформулировать критерий прекращения разрушения капли при некотором ненулевом значении радиуса. Представляется очевидным, что во время микровзрыва от капли отделяется оболочка, содержащая пар с его количеством, превышающим пороговое значение. Изменяя значение этого порога, можно управлять размерами сорванной оболочки, что, в свою очередь, оказывает влияние на длительность следующей фазы испарения капли и частоту микровзрывов. Приняв в качестве порогового значения нуль, получим, что при взрыве капли с нее срывается верхний слой, для которого  $T_{cp} > 373 \text{ K}$ . С учетом этого уравнение (2) можно представить в виде

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1 + k(T_{cp} - T_1)}{\rho q} \left[ \lambda \frac{\partial T_{cp}}{\partial r} - \gamma(T_r - T_{cp}) \right], \quad (8)$$

где слагаемое  $k(T_{cp} - T_1)$  описывает процесс срыва оболочки.

Конкретный вид указанного слагаемого не играет существенной роли, важно только, чтобы время срыва было мало по сравнению со временем прогрева капли. Скорость разрушения поверхностного слоя управляется параметром  $k$ , который принимается равным 0 при невыполнении неравенства (7), а также в соответствии с критерием прекращения микровзрыва при  $T_{cp} < 373 \text{ K}$ . Температура  $T_1$  влияет на отно-

шение скоростей срыва оболочки в начале и конце микровзрыва. Увеличение  $T_1$  приводит к возрастанию длительности микровзрыва, в основном за счет его конечной фазы. Очевидно, что должно выполняться условие  $T_1 < 373$  К, так как в противном случае микровзрыв не закончится.

Для проверки свойств данной модели был проведен ряд численных экспериментов при различных значениях начального радиуса  $r_0$ , показателя степени  $n$  и влагосодержания  $W$ . Значение  $q_0$  выбиралось из условия отсутствия микровзрывов при  $r_0 = 100$  мкм и  $W < 0,05$ .

На рис. 1 показана зависимость радиуса капли от времени для четырех значений  $W$  и двух значений  $n$ .

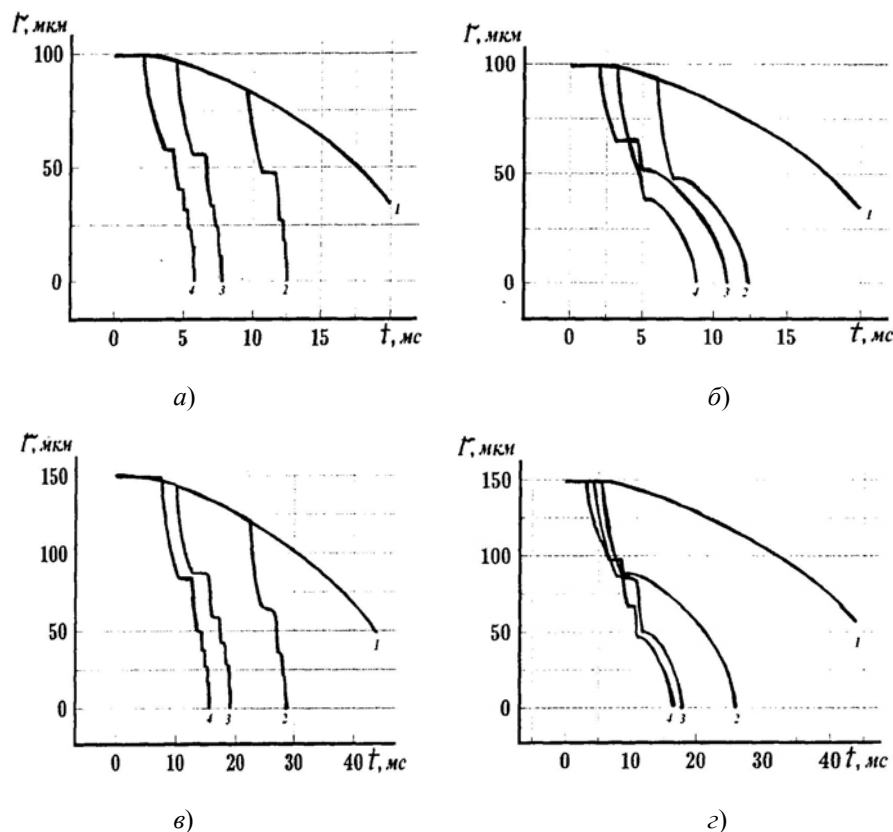


Рис. 1. Зависимость радиуса капли  $r$  от времени  $t$  при условиях: 1)  $W = 0,05$ ; 2)  $W = 0,08$ ; 3)  $W = 0,10$ ; 4)  $W = 0,15$ . Для рисунка  $a - r_0 = 100$  мкм,  $n = 3$ ;  $б - r_0 = 100$  мкм,  $n = 2$ ;  $в - r_0 = 150$  мкм,  $n = 3$ ;  $г - r_0 = 150$  мкм,  $n = 2$

Из графиков (рис. 1,  $a$  и  $в$ ), для которых  $n = 3$ , следует, что число микровзрывов возрастает с ростом  $W$ . Кроме того, уменьшение радиуса капли приводит к сокращению промежутков между последовательными микровзрывами и толщины срываемого поверхностного слоя. Этот эффект является следствием закона Б. И. Срезневского, согласно которому время испарения обезвоженной капли пропорционально квадрату ее начального радиуса, т. е. скорость нагревания поверхностных слоев обратно пропорциональна радиусу капли. Сравнение графиков показывает, что увеличение начального радиуса в 1,5 раза привело к увеличению времени разрушения капли в 2,2 раза, причем это имеет место при всех значениях  $W$ . Это объясняется тем, что вследствие малой длительности микровзрывов по сравнению со временем прогревания поверхностных слоев, большая часть времени разрушения приходится на близкие к горизонтальным участкам кривых, причем наибольший вклад вносит первый участок (это хорошо заметно для меньших значений  $W$ ). Второй особенностью

данной модели для  $n = 3$  является то, что время разрушения капли после первого микровзрыва практически не зависит от  $W$ , что объясняется малой длительностью микровзрывов.

Для показателя  $n = 2$  очевидным отличием от случая  $n = 3$  является малое число микровзрывов (не более 3) для всех значений  $W$ . Это является следствием того, что для капель малого размера отношение площади поверхности к объему становится настолько большим, что критерий (7) не выполняется даже тогда, когда средняя температура капли близка к температуре кипения масла. Следующим отличием является отсутствие подобия между рис. 1,  $\delta$  и  $\varepsilon$ . Для большего значения  $r_0$  первый микровзрыв происходит быстрее и общее количество микровзрывов возрастает, что, в свою очередь, дает большее время разрушения капли по сравнению со временем разрушения обезвоженной капель. Малое число микровзрывов приводит к тому, что время сгорания для близких значений  $W$  сильно зависит от начального радиуса (кривые 2 и 3 на рис. 1,  $\delta$  и  $\varepsilon$ ). Численные эксперименты для нецелых значений  $n$  в интервале  $2 < n < 3$  показали моменты времени, с которых прекращаются микровзрывы.

Так как скорость разрушения капли намного меньше скорости испарения, то введение воды приведет к более быстрому сгоранию топлива благодаря уменьшению начального диаметра капель [7]. Чтобы оценить выигрыш во времени сгорания необходимо знать соотношение времени разрушения капли и времени испарения ее осколков, которое зависит от стадий процесса микровзрыва. Эти два процесса частично перекрываются, так как осколки от первого микровзрыва испаряются и горят, одновременно с дальнейшим разрушением капли. Поскольку данная модель не дает информации о размерах осколков, воспользуемся экспериментальными данными [8], из которых следует, что при  $W = 0,15$  время разрушения капли и время ее сгорания имеют один порядок. Увеличение влагосодержания топлива до 5–20 % от объема топливной смеси приводит к сокращению времени горения капель в 1,5–3,5 раза (рис. 2). Зависимость показывает, что наиболее резкое сокращение времени сгорания капель происходит при содержании воды в эмульсии 12–15 %, а дальнейшее увеличение  $W$  не приводит к существенному уменьшению  $t$ .

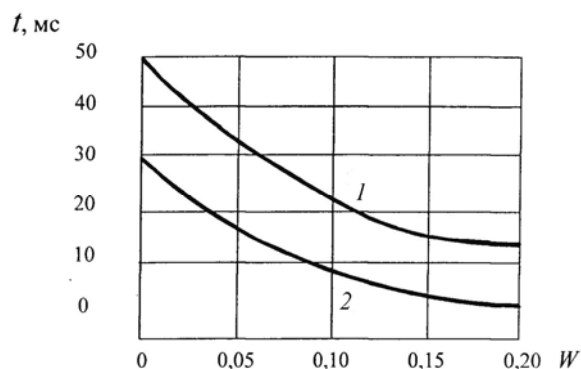


Рис. 2. Зависимость времени сгорания  $t$  капель эмульсии от влагосодержания  $W$  при условиях:  
1 –  $r_0 = 150$  мкм; 2 –  $r_0 = 100$  мкм

При увеличении влагосодержания топливной смеси уменьшается относительная длина факела. При дроблении капель эмульсии парами воды осколки капель разлетаются в разные стороны и поперечные размеры факела увеличиваются при одновременном сокращении относительной длины факела, а объем факела остается прежним.

На рис. 3 представлена зависимость температуры среды в топке котла от влагосодержания эмульсии. Для малых значений  $W$  изменение температуры прямо пропорционально изменению выделившейся при сгорании теплоты.

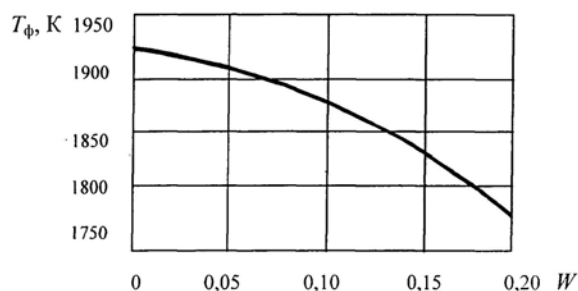


Рис. 3. Зависимость температуры факела  $T_{\phi}$  от влагосодержания  $W$  эмульсии

Содержание 10 % воды в эмульсии от объема смеси обуславливает снижение температуры факела примерно на 50 К, а 20 % – на 100–120 К. Вода при высокой температуре во время сжигания водотопливной эмульсии вскипает и разрывает капли в факеле котла. При «микровзрывах» диаметр образовавшихся капель достигает 2–5 мм, что увеличивает площадь поверхности испарения, улучшает тепло- и массообмен в факеле и интенсифицирует процесс сжигания жидкого топлива. Капля эмульсии диаметром 2 мм и содержанием воды 30 % сгорает, например, за 2,8 с, а капля мазута – за 3,7 с. Следует отметить, что при малых значениях  $W$  разрыв капли может наступить за счет испарения топлива с ее поверхности и результирующего уменьшения толщины внешней пленки. Другим механизмом, способным вызвать такой «задержанный» разрыв, является увеличение температуры испарения за счет выгорания летучих компонентов. Это можно учесть в рамках данной модели, сделав показатель  $n$  зависящим от радиуса капли. Кроме этого дополнения, модель может быть уточнена за счет рассмотрения зависимости теплопроводности, теплоемкости и плотности материала капли от содержания паров внутри ее, а также учета увеличения ее радиуса, которое влияет, в частности, на силу аэродинамического сопротивления и теплообмен с окружающей средой. Снижение порогового значения микровзрыва достигается уменьшением прочности поверхностной пленки капли. Одним из возможных путей достижения этого является добавление нефтесодержащих сточных вод, что позволит уменьшить однородность, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения внешней пленки и тем самым ее прочность.

Для оценки влияния влажности топлива на длину факела примем, что время сгорания осколков пропорционально объему капли в момент начала первого микровзрыва.

При увеличении влагосодержания топливной смеси уменьшается относительная длина факела  $L_B/L_0$  (рис. 4), где  $L_B$  – длина факела с использованием водотопливной эмульсии;  $L_0$  – длина факела при сгорании обезвоженного топлива.

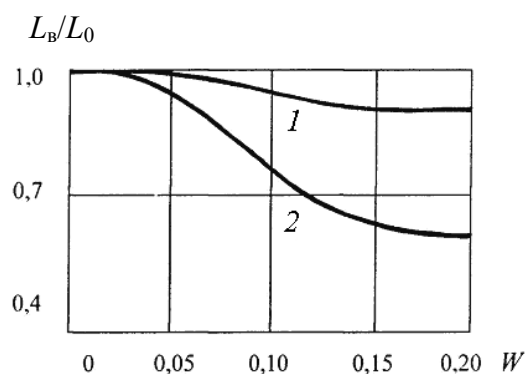


Рис. 4. Зависимость относительной длины факела  $L_B/L_0$  от влагосодержания эмульсии  $W$  и показателя  $k$  разрушения капель:  
 $1 - k = 2$ ;  $2 - k = 1$

При дроблении капель эмульсии парами воды поперечные размеры факела увеличиваются при одновременном сокращении длины факела. Содержание в эмульсии 5–10 % воды уменьшает массу  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания более чем вдвое за счет уменьшения длины и температуры факела.

### **Заключение**

Модель нагрева, испарения и горения капель эмульсии в топке котла позволяет оценить влияние влагосодержания топливной смеси на сокращение времени горения капель эмульсии, снижение относительной длины факела и уменьшение его температуры. Выявленные теоретические закономерности позволяют сделать предположение о снижении концентрации оксидов азота в дымовых газах котла при увеличении содержания воды в смеси топлива со вторичным энергоресурсом их сточных вод предприятия, что, в свою очередь, позволит не только снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух при сжигании топлива в котельных установках и объемы нефтесодержащих сточных вод, но и обеспечить охрану труда рабочих.

### **Литература**

1. Установки котельные. Установки, работающие на газообразном, жидком и твердом топливе. Нормы выбросов загрязняющих веществ : СТБ 1626.1–2006. – Минск : Госстандарт, 2006. – 8 с.
2. Дронченко, В. А. Рециклинг жидких производственных отходов, содержащих нефтепродукты / В. А. Дронченко // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии ; под ред. А. И. Свириденка. – Ч. II. – Тр. второй науч.-техн. конф. – Гродно, 1997. – С. 308–311.
3. Бернардинер, М. Н. Огневое обезвреживание промышленных сточных вод / М. Н. Бернардинер, А. П. Шурыгин. – М. : Химия, 1990. – 304 с.
4. Кривоногов, Б. М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды / Б. М. Кривоногов. – Л. : Недра, 1986. – 280 с.
5. Цирульников, Л. М. Пути уменьшения образования токсичных и агрессивных продуктов сгорания природного газа и мазута / Л. М. Цирульников. – М. : ВНИИ-Эгазпром, 1980. – 36 с.
6. Селезнев, Ю. С. Модель факела водотопливной эмульсии в топке парогенератора / Ю. С. Селезнев, А. М. Лапин, В. М. Сумеренков // Сибир. физ.-техн. журн. – 1991. – Вып. 5. – С. 145.
7. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М. : Наука, 1967. – 288 с.
8. Павлов, В. А. Условия оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и газа в энергетических установках / В. А. Павлов, И. Н. Шнейдер. – Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1984. – 298 с.

*Получено 15.01.2016 г.*