

О. В. ВЫСОКОМОРНАЯ, инженер-исследователь кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: vysokomornaja@tpu.ru)

М. В. ПИСКУНОВ, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: piskunovmv@tpu.ru)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

А. А. ЩЕРБИНИНА, аспирант, инженер кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: syasherb@tpu.ru)

УДК 536.4

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ТУШАЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ КИПЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ В ПЛАМЕНИ

Проведены численные и экспериментальные исследования макроскопических закономерностей процесса теплопереноса при нагреве, кипении и испарении капли воды с твердым включением в пламенной зоне горения. Численно определены условия реализации режима “взрывного” парообразования на внутренней границе неоднородной капли (в зоне контакта твердого включения с жидкостью). Экспериментально зафиксированы последовательные стадии исследуемого процесса. С использованием разработанной модели проанализировано влияние показателя поглощения энергии излучения пленкой воды в неоднородной капле на характерное время (период) с момента начала нагрева до реализации режима “взрывного” парообразования. Показана необходимость учета показателя поглощения излучения водой при выборе характерных размеров неоднородных капель тушащего состава.

Ключевые слова: неоднородная капля воды; твердое включение; пламя; испарение; “взрывное” парообразование; показатель поглощения.

DOI: 10.18322/PVB.2015.24.07.9-16

Введение

Непрерывное развитие противопожарных техники и технологий связано с возрастающими требованиями по безопасности, традиционно большими потерями при пожарах и возгораниях, а также со стремительным прогрессом науки и техники. В настоящее время насчитываются десятки способов тушения пожаров, применение которых определяется спецификой возгорания [1]. Разные технологии пожаротушения, как правило, подразумевают использование различных по составу тушащих сред [2–5]. По принципу воздействия на очаг возгорания огнетушащие вещества (ОТВ) можно разделить на охлаждающие, разбавляющие, изолирующие и ингибирующие [1–5]. При этом тушащие составы обычно сочетают в себе несколько из указанных видов воздействия на пожар.

Несмотря на разнообразие методов ликвидации возгораний наиболее часто для тушения применяется вода, что обусловлено многими объективными и субъективными причинами [3]. К наиболее перспективным методам пожаротушения с использованием воды в качестве тушащей среды можно отнести технологии, связанные с распылением воды и формированием эмульсий на ее основе [3, 6–8]. Необходимо отметить, что в случае применения тонкораспыленной воды ликвидация пламени происходит в основном за счет снижения в зоне горения температуры и концентрации вступающих в химическую реакцию компонентов посредством реализации фазового перехода. В связи с этим эффективность тушения пожара с помощью тонкораспыленной воды во многом зависит от полноты ее испарения.

В качестве одного из методов интенсификации фазового перехода при взаимодействии капельных потоков воды с высокотемпературными газовыми средами может рассматриваться введение в капли неоднородностей в виде твердых мелкодисперсных частиц. В работах [9–11] представлены результаты экспериментов по нагреву неоднородных капель воды с твердыми углеродистыми и алюминиевыми включениями. Из них следует, что прогрев капель воды с твердыми примесями происходит более интенсивно, чем капель без примесей. Полученные результаты [9–11] могут объясняться тем, что твердые частицы, находящиеся в капле, аккумулируют энергию, поступающую от высокотемпературных газов через пленку воды, и создают, таким образом, дополнительные внутренние очаги нагрева. Интенсивность нагрева твердых частиц напрямую зависит от количества энергии, проводимой жидкостью (в том числе за счет ее оптических свойств) к поверхности твердых включений.

Известно [12], что физические (в том числе оптические) свойства воды меняются в широком диапазоне. В связи с этим представляют интерес исследования по нагреву, кипению и испарению неоднородных капель воды с различными оптическими свойствами.

Цель работы — проведение численных и экспериментальных исследований эндотермических фазовых превращений в капле воды с твердым включением в высокотемпературной газовой среде, а также определение масштабов влияния оптических свойств воды на интенсивность процессов теплопереноса при испарении неоднородной капли.

Методы проведения исследований

Схема области численного решения задачи представлена на рис. 1. Предполагалось, что неоднородная капля воды с внешним радиусом R_2 (м) и радиусом графитового включения R_1 (м) находится в высокотемпературной газовой среде с $T_f > 800$ К. Посредством тепломассообмена в системе происходит прогрев пленки воды с внешней границы капли. При этом часть энергии за счет пропускных оптических свойств воды и кондуктивного переноса тепла

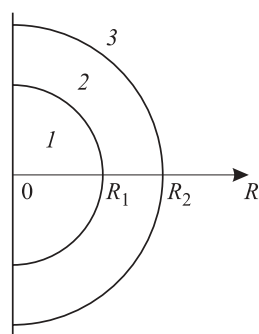


Рис. 1. Схема области решения: 1 — твердое включение; 2 — вода; 3 — высокотемпературная газовая среда

подводится через слой воды к твердому включению (в глубине капли). Частица, поглощая энергию, разогревается и создает тем самым дополнительный источник нагрева в центре капли. При достижении условий реализации фазового перехода ($T \approx 370$ К) на внутренней границе возникают локальные очаги парообразования. При дальнейшем повышении температуры и давления пара в зоне контакта твердого включения с жидкостью может произойти разрыв неоднородной капли (“взрывное” парообразование).

При постановке задачи были приняты следующие допущения, не накладывающие существенных ограничений на результаты численных исследований:

- 1) не учитывается процесс образования парового слоя в зоне контакта частицы с пленкой воды (при решении задачи теплопереноса с учетом тепловых эффектов эндотермических фазовых превращений);
- 2) учитывается уменьшение толщины пленки жидкости δR (м) ($\delta R = R_2 - R_1$) и размеров капли за счет испарения только с ее свободной (внешней) поверхности;
- 3) теплофизические характеристики компонентов неоднородной капли не зависят от температуры.

Применялась следующая система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ($0 \leq t \leq t_h$):

- для твердой частицы:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T_1}{\partial R} \right), \quad 0 < R < R_1; \quad (1)$$

- для жидкости:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T_2}{\partial R} + \frac{\partial H(R)}{\partial R} \right), \quad R_1 < R < R_2. \quad (2)$$

Принимались следующие начальные и граничные условия:

- а) начальные ($t = 0$):

$$T = T_0 \text{ при } 0 < R < R_2;$$

- б) граничные ($0 \leq t \leq t_h$):

- $R = 0$:

$$\frac{\partial T_1}{\partial R} = 0; \quad (3)$$

- $R = R_1$:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial R} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial R} + H(R_1) - Q_e W_e; \quad (4)$$

- $R = R_2$:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial R} = H(R_1) - Q_e W_e. \quad (5)$$

Здесь t — время, с; t_h — время нагрева неоднородной капли до достижения условия интенсивного парообразования, с; c — теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³; λ — коэффициент теплопровод-

ности, Вт/(м·К); T — температура, К; R — координата цилиндрической системы координат, м; $H(R)$ — плотность энергии, передаваемой от высокотемпературных газов к неоднородной капле, Вт/м²; T_0 — начальная температура неоднородной капли, К; Q_e — тепловой эффект испарения воды, Дж/кг; W_e — массовая скорость испарения воды, кг/(м²·с); индексы “1”, “2” соответствуют твердому включению и жидкости.

Для вычисления плотности теплового потока в рассматриваемой системе использовались математические выражения законов Стефана – Больцмана и Бугера – Ламберта – Бера [13]:

$$H(R_2) = \varepsilon_2 \sigma [T_f^4 - T(R_2)^4];$$

$$H(R_1) = H(R_2) \exp(-k_\lambda [R_2 - R_1]);$$

$$H(R) = H(R_2) \exp(-k_\lambda [R_2 - R]),$$

где ε — степень черноты;

σ — постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

k_λ — показатель поглощения, м⁻¹.

Расчет изменения размера капли за счет испарения со свободной поверхности проводился с применением типичного для моделей [14, 15] выражения:

$$\Delta R = W_e(R_2) t / \rho_2.$$

Система дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями решалась методом конечных разностей [16]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использовался локально-одномерный метод [17]. Нелинейные разностные аналоги дифференциальных уравнений решались методом итераций [18]. Решение одномерных разностных уравнений проводилось методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [16].

Для оценки возможности получения эффекта “взрывного” парообразования неоднородной капли были проведены эксперименты по нагреву и испарению капли воды с твердым включением в виде частицы графита. Схема используемого в экспериментах стенда представлена на рис. 2. Методы фиксации изображения капель в области пламени, а также задания, изменения и контроля параметров экспериментального стенда аналогичны приведенным в [10, 11, 19].

Методика проведения эксперимента включала следующие этапы. Капля заданной массы из дозатора 2 подавалась на твердое включение 5, закрепленное на стержне 3. После окончания процесса обволакивания включения жидкостью неоднородная капля с помощью стержня вводилась через одно из трех отверстий в цилиндр 8, заполненный продуктами сгорания с контролируемой температурой. Характерные средние размеры получаемых неоднородных капель изменялись в диапазоне $(2,5 \div 4,0) \cdot 10^{-3}$ м. За счет

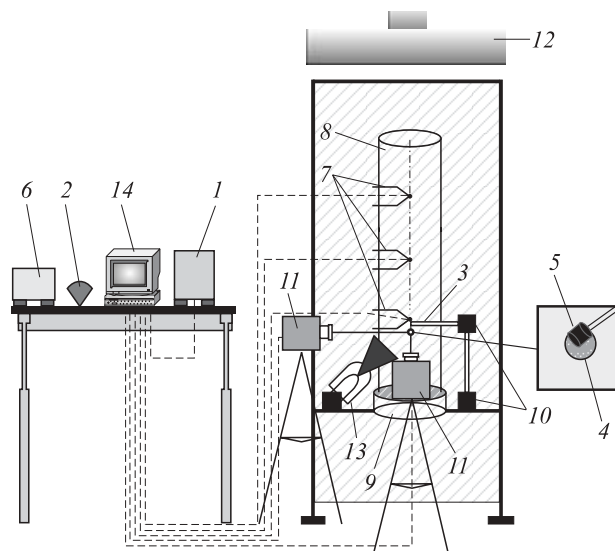


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 — весы; 2 — дозатор; 3 — стержень (держатель включения); 4 — капля; 5 — включение; 6 — комплекс для изготовления включения; 7 — термопары; 8 — цилиндр из кварцевого стекла; 9 — горелка; 10 — передвижные механизмы; 11 — высокоскоростные камеры; 12 — воздухообменная система; 13 — прожектор; 14 — персональный компьютер (ПК)

использования системы воздухообмена 12 и специализированных отверстий в горелке 9 температура поддерживалась в пределах отклонения от некоторого постоянного значения не более чем на 10 К (при абсолютном значении более 500 К) в течение 3 мин. Это позволяло выполнять по 5–7 экспериментов при идентичных условиях нагрева. После ввода капли в высокотемпературную газовую среду проводилась скоростная видеорегистрация процесса испарения с фиксацией изменения размеров капли и толщины пленки. Такие измерения продолжались в каждом эксперименте до полного испарения воды (толщина пленки не превышала величины, сопоставимой с погрешностью средств измерения) или “взрыва” капли с распадом ее на несколько существенно меньших. С использованием скоростных видеокамер 11 и программного обеспечения “Tema Automotive” определялись характерные времена существования неоднородной капли t_h (период с момента начала нагрева до “взрывного” распада или полного испарения в виде монолитной капли).

Результаты исследований и их обсуждение

Численные исследования тепломассопереноса при нагреве и испарении неоднородной капли воды в высокотемпературной газовой среде проводились при следующих параметрах системы: начальная температура неоднородной капли воды $T_0 = 300$ К; температура газовой среды $T_f = 800 \div 1500$ К; показатель поглощения лучистой энергии водой $k_\lambda = 10^{-3} \div 10^3$ м⁻¹;

тепловой эффект испарения воды $Q_e = 2260$ Дж/кг; начальный внешний радиус неоднородной капли $R_2 = (0,1 \div 1,0) \cdot 10^{-3}$ м; размер твердого включения $R_1 = 0,5R_2$. Теплофизические характеристики воды, водяного пара, высокотемпературных газов и графитового включения соответствуют приведенным в [20–22].

В результате численных исследований были определены условия, при которых реализуется фазовый переход на внутренней границе неоднородной капли ($R = R_1$). При температуре газовой среды $T_f \geq 950$ К и толщине пленки жидкости $\delta R \geq 0,2 \cdot 10^{-3}$ м на границе раздела *твердое включение — жидкость* выполняются условия испарения воды ($T \approx 370$ К). Следует отметить, что при более низкой температуре газов или при меньшей толщине пленки воды условия испарения на внутренней границе капли не выполняются, и испарение происходит только с внешней границы ($R = R_2$).

На рис. 3 представлены распределения температуры в неоднородной капле воды в разные моменты времени при различных значениях показателя поглощения лучистой энергии жидкостью. На рис. 3,а и 3,б иллюстрируется более интенсивный прогрев на границе раздела фаз *твердое включение — жидкость* при меньших значениях показателя поглощения k_λ . При этом распределения температуры при $k_\lambda = 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ и при $k_\lambda = 10 \text{ м}^{-1}$ практически не отличаются. В то же время распределения температуры при значительно большем показателе поглощения ($k_\lambda = 10^3 \text{ м}^{-1}$) (рис. 3,в) существенно отличаются от представленных на рис. 3,а и 3,б. Из рис. 3,в видно, что прогрев капли на внутренней границе раздела происходит гораздо медленнее, а масса жидкости интенсивно убывает с внешней границы неоднородной капли.

При проведении исследований в качестве основной характеристики процесса было принято время с момента начала нагрева неоднородной капли в среде высокотемпературных газов до реализации интенсивного испарения в зоне контакта твердого включения с пленкой жидкости или до полного испарения капли t_h .

Для определения степени влияния на параметр t_h оптических свойств воды, связанных со способностью пропускать лучистую энергию, показатель поглощения лучистой энергии водой k_λ варьировался в широком диапазоне (от минимально возможных до максимальных и даже трудно достижимых в реальной практике значений). Результаты численных

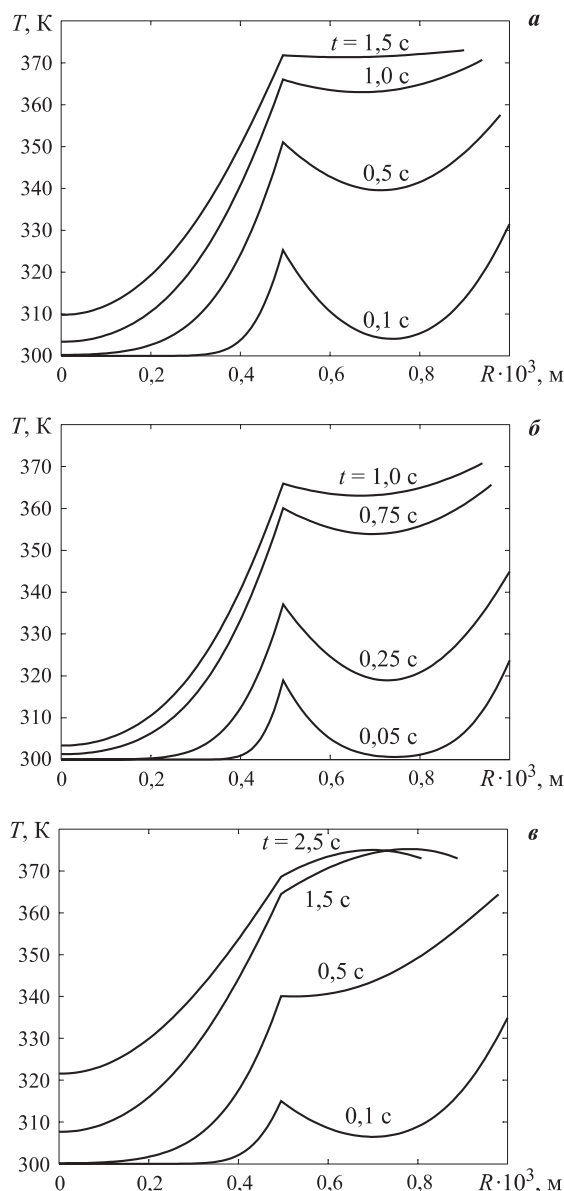


Рис. 3. Распределения температуры в неоднородной капле воды при $T_f = 1400$ К, $\delta R = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м в разные моменты времени t : а — $k_\lambda = 10^{-3} \text{ м}^{-1}$; б — $k_\lambda = 10 \text{ м}^{-1}$; в — $k_\lambda = 10^3 \text{ м}^{-1}$

исследований влияния оптических свойств воды на параметр t_h представлены в таблице.

Необходимо отметить, что изменение показателя поглощения в диапазоне $k_\lambda = 10^{-3} \div 10 \text{ м}^{-1}$ практически не оказывает влияния на время t_h (см. таблицу). С дальнейшим увеличением показателя поглощения k_λ заметно возрастает и характерное время t_h . “Пороговое” значение k_λ , при котором рост параметра t_h становится заметным, составляет $2 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$. Такой результат вполне закономерен, поскольку величина

Зависимость времени нагрева неоднородной капли воды до достижения условия интенсивного парообразования на внутренней границе t_h от показателя k_λ при $R_2 = 10^{-3}$ м, $\delta R = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м $T_f = 1400$ К

$k_\lambda, \text{ м}^{-1}$	0,001	0,010	0,900	10	50	100	1000
$t_h, \text{ с}$	1,775	1,776	1,777	1,801	1,915	2,0805	4,585

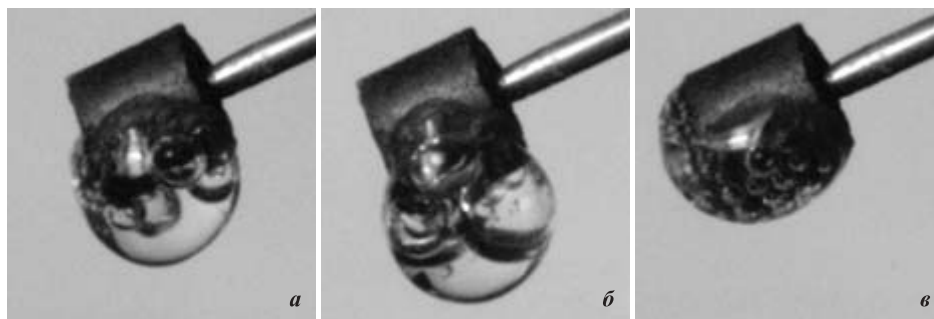


Рис. 4. Типичные стадии испарения и кипения неоднородной капли воды с включением в виде частицы графита при $T_f = 1400$ К: *а* — формирование пузырьков пара на внутренней границе раздела; *б* — увеличение размеров неоднородной капли; *в* — разрушение капли

k_λ обратно пропорциональна расстоянию, которое может преодолеть оптическое излучение, распространяясь в веществе. Таким образом, при заданной толщине пленки воды $\delta R = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м предельным значением показателя поглощения лучистой энергии, при котором происходит полное поглощение оптической энергии на границе раздела *твердое включение – жидкость*, является $k_\lambda = 2 \cdot 10^3$ м $^{-1}$.

Из этого следует, что для реализации режима испарения неоднородной капли, при котором формируются очаги парообразования на внутренней границе раздела, пригодны жидкости, оптические свойства которых (в частности, k_λ) характеризуются большим диапазоном значений. Следовательно, для тушения лесных пожаров с применением эффекта “взрывного” парообразования может использоваться и вода из открытых водоемов. При этом должно соблюдаться соответствие между показателем поглощения и толщиной пленки жидкости в неоднородной капле. В целом можно отметить, что жидкости с низкой способностью пропускать излучение необходимо дробить на капли, размеры которых меньше (практически сопоставимы с включениями) по сравнению с каплями жидкости с большей светопрозрачностью.

Эффект “взрывного” парообразования был зафиксирован при проведении экспериментальных исследований с использованием лабораторного стенда (см. рис. 2). Процесс нагрева и испарения неоднородной капли осуществлялся при температуре газов $T_f = 1100$ К. Радиус графитового включения составлял $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, внешний радиус неоднородной капли — $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Типичные видеок cadры стадий исследуемого процесса представлены на рис. 4. На первой стадии происходит прогрев неоднородной капли, на реализацию которого затрачивается в среднем менее 1 с. Затем начинается формирование пузырьков пара на внутренней границе раздела (см. рис. 4,а). На второй стадии объем пара, образующегося на внутренней границе, увеличивается, растет также температура и давление пара внутри пузырьков, вследствие чего неоднородная капля существенно увеличивается в размерах (см. рис. 4,б). Когда объем пара и его давление в пузырьках достигают критических

значений, происходит разрушение пленки жидкости (см. рис. 4,в).

Проведенные эксперименты подтверждают возможность реализации эффекта “взрывного” испарения капель жидкости с твердыми включениями при взаимодействии с пламенем, а также адекватность представленной численной модели тепломассопереноса при нагреве и испарении капли воды с твердым включением в пламени.

Заключение

Результаты численного моделирования нагрева и испарения неоднородной капли воды с твердым включением в пламенной зоне горения позволили установить условия реализации режима “взрывного” парообразования на границе раздела *твердое включение – жидкость*.

С применением численной модели была определена степень влияния показателя поглощения лучистой энергии пленкой жидкости в неоднородной капле на характерное время с момента начала нагрева капли до реализации режима “взрывного” парообразования t_h . Выявлено, что для капель с толщиной пленки $\delta R \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ м изменение показателя поглощения энергии излучения в диапазоне $k_\lambda = 10^{-3} \div 10^2$ м $^{-1}$ не оказывает существенного влияния на t_h . Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения для тушащего состава даже не подготовленной специальным образом воды (например, из открытых водоемов при тушении лесных пожаров). Однако при использовании воды, характеризующейся большими значениями k_λ , капли должны дробиться до размеров, соответствующих k_λ .

Адекватность разработанной численной модели тепломассопереноса при испарении неоднородной капли воды в зоне пламени подтверждена результатами экспериментов по реализации режима “взрывного” парообразования на внутренней границе капли с твердым включением.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД-2806.2015.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баратов А. Н., Иванов В. Н. Пожаротушение. — М. : Химия, 1979.
2. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. — М. : Стройиздат, 1975.
3. Абдурагимов И. М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 4. — С. 60–82.
4. Батов Д. В., Мочалова Т. А., Петров А. В. Микроэмульсии вода – ПАВ – ко-ПАВ – 1,1,2,2-тетрафтордибромэтан: получение, изучение горючести // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 4. — С. 55–57.
5. Копылов С. Н., Агафонов В. В., Копылов Н. П. Эволюция средств объемного пожаротушения: от озоноразрушающих агентов до огнетушащих веществ с коротким временем жизни в атмосфере // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 123–130.
6. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles // Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium. — 2005. — Vol. 27. — P. 753–764.
7. Корольченко Д. А., Громовой В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 54–57.
8. Соковилов В. В., Тугов А. Н., Гришин В. В., Камышев В. Н. Автоматическое водяное пожаротушение с применением тонкораспыленной воды на электростанциях // Энергетик. — 2008. — № 6. — С. 37–38.
9. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2014. — Vol. 79. — P. 838–845. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.006.
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area // International Journal of Thermal Science. — 2015. — Vol. 88. — P. 193–200. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
11. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of solid inclusions in liquid drops moving through a high temperature gaseous medium on their evaporation // Technical Physics. — 2014. — Vol. 59, No. 12. — P. 1770–1774. DOI: 10.1134/S1063784214120299.
12. Михайлов В. Н., Добровольский А. Д., Добролюбов С. А. Гидрология. — М. : Высшая школа, 2007.
13. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. — М. : Атомиздат, 1979.
14. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical analysis of heat-mass transfer mechanisms in gas-phase ignition of films of liquid condensed substances by a laser beam // Journal of Engineering Thermophysics. — 2010. — No. 2. — P. 85–93. DOI: 10.1134/S1810232810020049.
15. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 2013. — Vol. 86, Issue 4. — P. 895–904. DOI: 10.1007/s10891-013-0909-9.
16. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М. : Наука, 1983.
17. Самарский А. А., Вабичевич П. Н. Численные методы решения задач конвекции – диффузии. — М. : Эдиториал УРСС, 1999.
18. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М. : Наука, 1975.
19. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone // Fire Safety Journal. — 2014. — Vol. 70. — P. 61–70. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.016.
20. Кнаке О., Странский И. Н. Механизм испарения // Успехи физических наук. — 1959. — Т. 68, № 2. — С. 261–305.
21. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М. : ООО “Старс”, 2006. — 720 с.
22. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М. : Энергия, 1975. — Т. 1–2. — 1640 с.

Материал поступил в редакцию 31 марта 2015 г.

Для цитирования: Высокоморная О. В., Пискунов М. В., Стрижак П. А., Щербинина А. А. Влияние показателя поглощения тушащей жидкости на интенсивность кипения и испарения неоднородной капли в пламени // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 7. — С. 9–16. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.07.9-16.

INFLUENCE OF EXTINGUISHING LIQUID ABSORPTION COEFFICIENT ON INTENSITY OF BOILING AND EVAPORATION OF HETEROGENEOUS DROPLET IN A FLAME

VYSOKOMORNAYA O. V., Postdoc, Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: vysokomornaja@tpu.ru)

PISKUNOV M. V., Postgraduate Student, Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: piskunovmv@tpu.ru)

STRIZHAK P. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: pavelspa@tpu.ru)

SHCHERBININA A. A., Postgraduate Student, Heat and Power Process Automation Department, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: syasherb@tpu.ru)

ABSTRACT

The numerical model and methodology of experimental researches of heat and mass transfer during the heating, boiling and evaporation of heterogeneous water droplet in a high-temperature area are presented in the work.

The results of numerical and experimental researches of evaporation of water droplet with a solid graphite inclusion in a flaming combustion area are introduced. The conditions of an “explosive” vaporization mode realization in a contact zone of solid inclusion and liquid film (temperature of gaseous area is $T_f \geq 1050$ K and water film thickness is $\delta R \geq 0.2 \cdot 10^{-3}$ m) are determined. The main stages of studying process are fixed on video: the droplet heat-up, the beginning of bubble formation of vapor at the interface *solid inclusion — liquid*, the volume increase of vapor bubble, the droplet fission.

The influence of optical water characteristic (absorption coefficient of radiant energy k_λ) on the typical period t_h from the beginning of heterogeneous liquid droplet heating to the realization of an “explosive” vaporization conditions is analyzed. It is shown that for droplets with liquid film size $\delta R \approx 0.5 \cdot 10^{-3}$ m the change of the absorption coefficient of radiant energy in a wide range $k_\lambda = 10^{-3} \div 10^2$ m⁻¹ doesn't influence on t_h significantly. The application possibility of water unprepared (in the case of optical properties) in a special way (for example from open ponds at forest fire extinguishing) for extinguishing composition is substantiated, provided accounting of the absorption coefficient of the liquid in the process of selecting the characteristic sizes of the generated droplets.

Keywords: heterogeneous water droplet; solid inclusion; flame; evaporation; “explosive” vaporization; absorption coefficient.

REFERENCES

1. Baratov A. N., Ivanov V. N. *Pozharotusheniye* [Fire extinguishing]. Moscow, Khimiya Publ., 1979.
2. Shrayber G., Porst P. *Ognetushashchiye sredstva* [Fire fighting agents]. Moscow, Stroyizdat, 1975.
3. Abduragimov I. M. O mekhanizmax ognetushashchego deystviya sredstv pozharotusheniya [About mechanisms of fire fighting effect of fire-extinguishing means]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 54–57.
4. Batov D. V., Mochalova T. A., Petrov A. V. Mikroemulsii voda – PAV – ko-PAV – 1,1,2,2-tetraftordibrometan: polucheniye, izucheniye goryuchesti [Preparation and combustibility study of microemulsions Water – Surfactant – Co-surfactant – 1,1,2,2-dibromotetrafluoroethane]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 55–57.
5. Kopylov S. N., Agafonov V. V., Kopylov N. P. Evolyutsiya sredstv obyemnogo pozharotusheniya: ot ozonorazrushayushchikh agentov do ognetushashchikh veshchestv s korotkim vremenem zhizni v atmosfere [The development of total saturation instruments: from ozone-destroying agents to fire-fighting substances with short life time in atmosphere]. *Pozharnaya bezopasnost — Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 123–130.

6. Karpov A. I., Novozhilov V. B., Galat A. A., Bulgakov V. K. Numerical modeling of the effect of fine water mist on the small scale flame spreading over solid combustibles. *Fire Safety Science: Proceeding of Eight International Symposium*, 2005, vol. 27, pp. 753–764.
7. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [The water mist application for fire fighting in high-rise buildings]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
8. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniym tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatical water fire fighting by water mist at power plants]. *Energetik — Power Engineer*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
9. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 79, pp. 838–845. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.006.
10. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area. *International Journal of Thermal Science*, 2015, vol. 88, pp. 193–200. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
11. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Influence of solid inclusions in liquid drops moving through a high temperature gaseous medium on their evaporation. *Technical Physics*, 2014, vol. 59, no. 12, pp. 1770–1774. DOI: 10.1134/S1063784214120299.
12. Mikhaylov V. N., Dobrovolskiy A. D., Dobrolyubov S. A. *Gidrologiya* [Hydrology]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2007.
13. Kutateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [The foundations of the heat exchange theory]. Moscow, Atomizdat, 1979.
14. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Numerical analysis of heat-mass transfer mechanisms in gas-phase ignition of films of liquid condensed substances by a laser beam. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, no. 2, pp. 85–93. DOI: 10.1134/S1810232810020049.
15. Strizhak P. A. Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 895–904. DOI: 10.1007/s10891-013-0909-9.
16. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference scheme]. Moscow, Nauka Publ., 1983.
17. Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N. *Chislennyye metody resheniya zadach konveksii – diffuzii* [Numerical methods of solution of convection-diffusion problems]. Moscow, Editorial URSS Publ., 1999.
18. Kozdoba L. A. *Metody resheniya nelineynykh zadach teploprovodnosti* [The solution methods of non-linear heat conduction problem]. Moscow, Nauka Publ., 1975.
19. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone. *Fire Safety Journal*, 2014, vol. 70, pp. 61–70. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.016.
20. Knake O., Stranskiy I. N. Mekhanizm ispareniya [Evaporation mechanism]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Advances in Physical Sciences*, 1959, vol. 68, no. 2, pp. 261–305.
21. Vargaftik N. B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Reference book of the thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Stars Publ., 2006. 720 p.
22. Yurenev V. N., Lebedev P. D., eds. *Teplotekhnicheskiiy spravochnik* [Heat engineering reference book]. Moscow, Energiya Publ., 1975, vol. 1–2. 1640 p.

For citation: Vysokomornaya O. V., Piskunov M. V., Strizhak P. A., Shcherbinina A. A. Vliyaniye pokazatelya pogloshcheniya tushashchey zhidkosti na intensivnost kipeniya i ispareniya neodnorodnoy kapli v plameni [Influence of extinguishing liquid absorption coefficient on intensity of boiling and evaporation of heterogeneous droplet in a flame]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 7, pp. 9–16. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.07.9-16.