

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)

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)

А. А. ЩЕРБИНИНА, аспирант 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

ОБ УСЛОВИЯХ “ВЗРЫВНОГО” РАЗРУШЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ПРИ КИПЕНИИ И ИНТЕНСИВНОМ ИСПАРЕНИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Представлены результаты моделирования теплопереноса при нагреве, кипении, испарении и “взрывном” разрушении неоднородной капли воды с твердым углеродистым включением в среде высокотемпературных газов. Установлены характерные времена реализации рассматриваемых процессов и их типичные стадии (прогрев жидкости, испарение с внешней поверхности, пузырьковое кипение на внутренних границах раздела сред, рост размеров пузырьков, “взрывное” разрушение капли). С использованием трех моделей теплопереноса проанализировано влияние на интенсивность прогрева и фазовых переходов наличия парового буферного слоя в области контакта твердого включения с пленкой жидкости, а также полноты покрытия пленкой жидкости поверхности твердого включения. Выделены необходимые условия “взрывного” парообразования неоднородной капли жидкости.

Ключевые слова: испарение; “взрывное” парообразование; неоднородная капля жидкости; твердое включение; высокотемпературная газовая среда.

DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.18-26

Введение

Одной из основных технологий тушения пожаров потоком распыленной жидкости является использование для подачи в зону горения массива мелкодисперсных капель тушащей жидкости [1–11]. Для повышения эффективности и полноты испарения тушащего жидкостного состава в таких технологиях необходимо прибегать к дроблению капель до характерных размеров порядка нескольких сотен и даже десятков микрометров [1–11]. Однако результаты выполненных в последние годы экспериментальных исследований [12–15] показали возможность достаточно интенсивного уноса мелких (менее 0,5 мм) капель жидкости восходящим потоком высокотемпературных продуктов сгорания. Это, напротив, свидетельствует в пользу применения крупных (не менее 1 мм) капель тушащей жидкости для снижения в зоне горения температуры и концентрации продуктов сгорания.

В качестве одного из способов интенсификации процесса испарения капель распыленной тушащей жидкости можно рассматривать введение в капли непрозрачных твердых неметаллических включений [12]. В работе [15] представлены результаты исследований характерных скоростей испарения неоднородных капель с применением современных оптических методов (PIV [16, 17], IPI [18, 19], SP [20, 21]). Анализируя результаты экспериментов [15], можно предположить, что наличие в каплях жидкости твердых непрозрачных неоднородностей может инициировать испарение жидкости вблизи внутренней границы раздела с образованием парового слоя (пузырьков) в области контакта твердого включения и жидкости. Рост объема паровых пузырьков на внутренней границе раздела может привести к разрушению пленки жидкости неоднородной капли с образованием более мелких капель жидкости. Этот эффект позволит в несколько раз повысить площадь испа-

© Стрижак П. А., Пискунов М. В., Щербинина А. А., 2015

рения жидкостного состава в зоне реального пожара. Проведение исследований закономерностей, связанных с образованием парового зазора в зоне контакта жидкости с твердым включением, осложняется высокой скоростью протекающих при этом процессов теплопереноса при испарении неоднородных капель в среде высокотемпературных ($T_f > 600$ К) газов. На сегодняшний день отсутствуют даже упрощенные модели для прогнозирования условий “взрывного” парообразования неоднородных капель.

Цель настоящей работы — создание группы моделей теплопереноса для исследования основных закономерностей “взрывного” парообразования неоднородных (с твердыми непрозрачными частицами) капель типичной тушащей жидкости — воды в потоке высокотемпературных продуктов сгорания.

Постановка задачи

При формулировании физической постановки решаемой задачи теплопереноса использовалась одномерная осесимметричная схема, приведенная на рис. 1. Считалось, что в начальный момент времени (см. рис. 1,а) включение полностью покрыто пленкой жидкости равномерной толщины (рассматривался идеализированный вариант). Принималось, что начальные температуры жидкости и включения ($T_0 = 300$ К) существенно ниже температуры газовой среды ($T_f = 600 \div 1500$ К). В качестве материала твердого включения рассматривался углерод, газов — продукты сгорания технического спирта, жидкости — дистиллированная вода.

При температурах T_0 и T_f прогрев жидкости происходил за счет кондуктивного и радиационного теплопереноса с учетом эндотермических фазовых превращений на границах *включение – жидкость* и *жидкость – газ*. Эти превращения приводили к уменьшению характерной толщины пленки воды вокруг включения, вследствие чего размер капли уменьшался, а толщина парового слоя увеличива-

лась (см. рис. 1,б). За счет подведенной газовой средой теплоты и ее прохождения в глубь гетерогенной капли (вследствие прозрачности жидкости и паров) большая часть энергии аккумулировалась у границы *включение – пар*. Это вызывало резкий рост температуры на этой границе. Буферный паровой слой в силу его малой толщины интенсивно прогревался, что приводило к доминированию эндотермических превращений на внутренних границах раздела сред в капле по сравнению с реализуемыми на свободной поверхности. В условиях интенсивного парообразования внутри капли давление паров существенно превышало давление поверхностного натяжения жидкости и газовой среды.

Помимо приведенной выше физической модели теплопереноса при нагреве неоднородной капли жидкости в среде высокотемпературных газов, для сравнительного анализа результатов численных исследований были использованы еще две модели:

- модель, не учитывающая образование парового слоя на границе раздела сред (см. рис. 1,а);
- модель, предусматривающая неполное покрытие твердого включения пленкой жидкости (в проведенных оценочных экспериментах установлено, что высока вероятность формирования неоднородной капли такого вида). В этом случае к внутренним границам раздела сред энергия может подводиться через включение и жидкость.

При постановке задачи принималось, что условия “взрывного” парообразования возможны при достижении на границе включения температур, соответствующих кипению жидкости (для воды $T \approx 370$ К). По результатам решения задачи рассчитывалось время нагрева неоднородной капли до достижения условия интенсивного парообразования $T(R_1) \approx 370$ К (где R_1 — радиус твердого включения, м). Оно считалось временем “взрывного” парообразования τ_h (завершающегося распадом неоднородной капли).

Для моделирования описанных процессов (см. рис. 1,б) применялась следующая система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ($0 < \tau \leq \tau_h$):

- для твердого включения, $0 < R < R_1$:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T_1}{\partial R} \right); \quad (1)$$

- для парового слоя, $R_1 < R < R_2$:

$$c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T_4}{\partial R} \right) + \frac{\partial H_4(R)}{\partial R}; \quad (2)$$

- для пленки жидкости, $R_2 < R < R_3$:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T_2}{\partial R} \right) + \frac{\partial H_2(R)}{\partial R}. \quad (3)$$

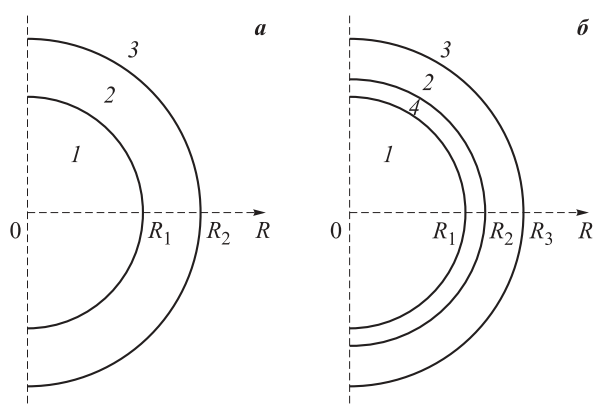


Рис. 1. Схема области решения задачи теплопереноса в начальный ($\tau = 0$) момент времени (а) и при $0 < \tau \leq \tau_h$ (б): 1 — включение; 2 — жидкость; 3 — газовая среда; 4 — пары

Начальные ($\tau = 0$) условия (см. рис. 1,а): $T = T_0$ при $0 < R < R_2$.

Граничные условия при $0 < \tau \leq \tau_h$ (см. рис. 1,б):
 $R = 0$:

$$\partial T_1 / \partial R = 0; \quad (4)$$

$R = R_1$:

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial R} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial R} - H(R_1); \quad (5)$$

$R = R_2$:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial R} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial R} + Q_e W_e(T); \quad (6)$$

$R = R_3$:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial R} = H(R_3) - Q_e W_e(T). \quad (7)$$

Для вычисления плотности теплового потока использовались математические выражения законов Стефана – Больцмана и Бугера – Ламберта – Бера:

$$H(R_3) = \varepsilon_2 \sigma [T_f^4 - T(R_3)^4]; \quad (8)$$

$$H(R_2) = H(R_3) \exp(-k_{\lambda 2}[R_3 - R_2]); \quad (9)$$

$$H(R_1) = H(R_2) \exp(-k_{\lambda 4}[R_2 - R_1]); \quad (10)$$

$$H_2(R) = H(R_3) \exp(-k_{\lambda 2}[R_3 - R]), \quad R_2 < R < R_3; \quad (11)$$

$$H_4(R) = H(R_2) \exp(-k_{\lambda 4}[R_2 - R]), \quad R_1 < R < R_2. \quad (12)$$

Здесь: τ — время, с; R — радиальная координата, м; c — теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность, кг/м³; T — температура, К; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); $H(R)$ — плотность теплового потока, Вт/м²; T_0 — начальная температура, К; Q_e — теплота фазового перехода, Дж/кг; W_e — скорость испарения, кг/(м²·с); ε — степень черноты; σ — постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м²·К⁴); k_λ — коэффициент поглощения энергии; индексы “1”, “2”, “3” и “4” соответствуют включению, жидкости, газам и парам воды.

Характерный размер парового слоя ($R_2 - R_1$) (см. рис. 1,б) и общий размер капли R_3 вычислялись при использовании подхода, основанного на применении группы выражений, учитывающих динамическое давление паров, давление жидкости и внешней среды [22–24].

Скорость испарения W_e на границе раздела сред *включение – жидкость* и *жидкость – газ* определялась с использованием зависимости, установленной в результате обработки экспериментальных данных [25]: $W_e(T) = 5 \cdot 10^{-5} \exp[0,02T]$.

Для оценки влияния подвода энергии к внутренней границе раздела через твердое включение и жидкость на условия “взрывного” разрушения (модель, учитывающая неполное обволакивание твердой час-

тицы пленкой жидкости) граничное условие (4) заменялось выражением

$$R = 0: \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial R} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial R} - H(R_0), \quad (13)$$

где $H(R_0) = \varepsilon_1 \sigma [T_f^4 - T(R_0)^4]$.

Выражение (13) учитывало подвод энергии к включению от газовой среды напрямую (без пленки жидкости).

Система дифференциальных уравнений (1)–(13) решалась методом конечных разностей [26, 27]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использовался локально-одномерный метод [26, 27]. Нелинейные разностные аналоги дифференциальных уравнений решались методом итераций [26, 27]. Решение одномерных разностных уравнений проводилось методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [26, 27]. Для оценки достоверности результатов численных исследований выполнялась проверка консервативности разностной схемы, алгоритм которой представлен в [22–24].

Результаты и их обсуждение

В качестве исходных данных в теоретических исследованиях принимались: начальная температура капли воды с твердым включением $T_0 = 300$ К, температура внешней газовой среды $T_f = 600 \div 1500$ К; исходный размер капли $R_1 = 0,5 \div 2,0$ мм; начальная толщина пленки жидкости $\delta = 0,1 \div 1,0$ мм. Теплофизические характеристики элементов (углеродистой частицы, дистиллированной воды, продуктов сгорания технического спирта) исследуемой системы и оптические свойства жидкости и материала включения выбирались в соответствии с данными [28–31].

По результатам моделирования установлены особенности теплопереноса в капле при реализации различных схем парообразования. В частности, удалось выявить влияние эффекта формирования парового зазора между пленкой жидкости и включением на условия “взрывного” разрушения, проанализировать физические различия механизмов подвода энергии к внутренним границам раздела сред через включение и жидкость, установить роль лучистого теплопереноса в гетерогенной капле.

Так, на рис. 2,а представлены типичные для рассматриваемой неоднородной капли распределения температуры жидкости в процессе ее нагревания в высокотемпературной газовой среде (рассмотрен случай без учета буферного парового слоя между включением и жидкостью (модель 1)). Для этого случая можно отметить существенно неравномерный прогрев пленки жидкости по толщине, что обусловлено значительным влиянием фазовых превращений на границах раздела сред и определяющим

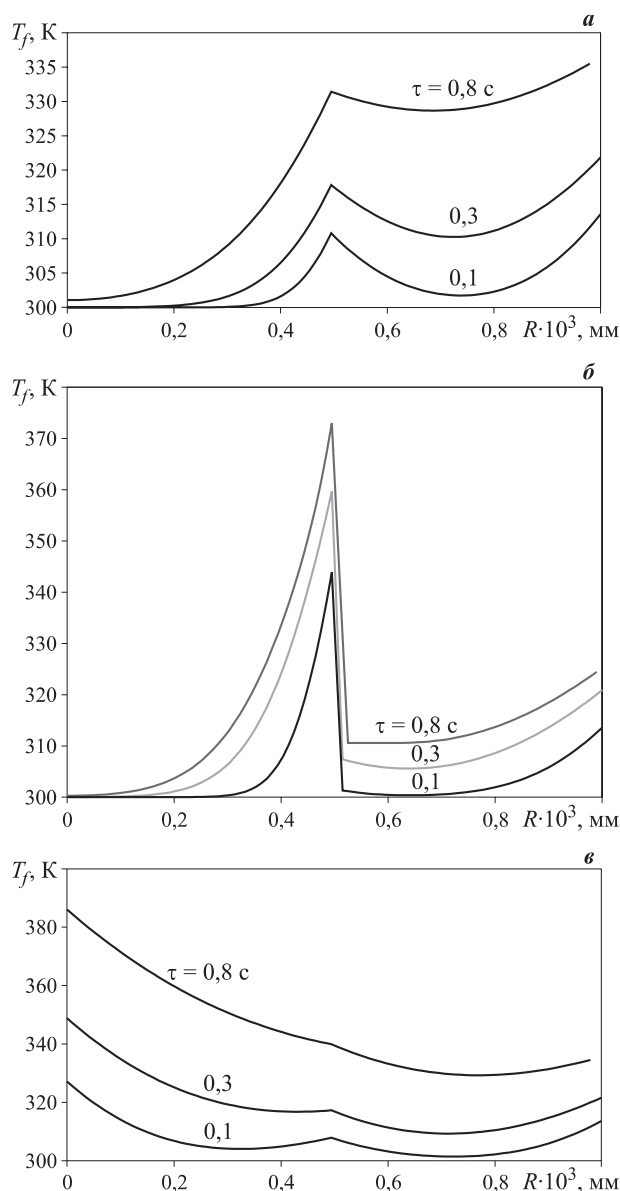


Рис. 2. Распределения температуры в неоднородной капле ($R = 1$ мм, $\delta = 0,5$ мм, $T_f = 1200$ К) в разные моменты времени для трех моделей: а — модель 1; б — модель 2; в — модель 3

вкладом лучистого теплопереноса в капле. В частности, из рис. 2,а хорошо видно, что температура на границе *включение – жидкость* растет быстрее, чем по толщине пленки жидкости.

При формировании парового зазора между жидкостью и включением (модель 2) распределение температур изменяется довольно существенно (рис. 2,б). В первую очередь, можно отметить значительное снижение характерных времен прогрева поверхности включения до температур, обеспечивающих кипение жидкости на внутренних границах раздела сред, и выполнение условий “взрывного” парообразования относительно результатов применения модели без учета формирования парового слоя на внутренней границе раздела *включение – жидкость*. Это обусловлено тем, что аккумуляция лучистого теп-

лового потока от газовой среды и расходование энергии на эндотермический фазовый переход происходит на разных границах: *включение – пар* и *пар – жидкость*. Так как жидкость и пар прозрачны, а включение непрозрачно, основная доля лучистого теплового потока аккумулируется у поверхности включения. Формирование и рост буферного парового слоя приводит к перемещению границы *пар – жидкость* от границы раздела сред к поверхности капли, что интенсифицирует прогрев пара в малом приповерхностном слое и, как следствие, вызывает рост давления паров в этой области. Характерные времена “взрывного” разрушения существенно меньше, чем в неоднородной капле без учета парового слоя у внутренних границ раздела сред.

На рис. 2,в представлены характерные распределения температуры в неоднородной капле при реализации третьей схемы (модель 3), т. е. при подводе энергии к внутренним границам раздела сред через включение и жидкость (пленка жидкости частично покрывает твердое включение).

Вследствие большей теплопроводности включения по сравнению с жидкостью и паром энергия внешней газовой среды подводится к границе *включение – жидкость* через твердую частицу быстрее (см. рис. 2,в), что приводит к интенсификации фазовых превращений на этой границе за меньший интервал времени, чем при прогреве только через пленку жидкости вокруг включения. Этим объясняются меньшие значения времен τ_h , а также более низкие предельные температуры газов, при которых происходит “взрывное” разрушение капли (см. таблицу).

Представленные в таблице зависимости позволяют сделать вывод о большой роли теплофизических характеристик материала включения. При более высоком по сравнению с жидкостью значении коэффициента теплопроводности включения времена τ_h могут быть снижены в условиях непосредственного теплообмена между твердым включением и высокотемпературными газами (большая часть энергии газов будет подведена к внутренним границам раздела сред через частицу, а не жидкость). При меньшем по сравнению с жидкостью коэффициенте теплопроводности включения целесообразным представляется использование другого эффекта — аккумуляции энергии, проходящей через жидкость, у поверхности непрозрачного включения с малой теплопроводностью.

Выявленными при моделировании физическими особенностями можно объяснить и характерные минимальные температуры газов, при которых для разных моделей теплопереноса возможно “взрывное” разрушение капель. В частности, из таблицы видно, что для условий подвода энергии к внутренней границе раздела сред через включение и жид-

Времена “взрывного” разрушения τ_h в результате расчета с применением трех моделей

Модель	Значение τ_h , с, при T_f , К							
	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800
1	0,638	1,773	7,393	Нет “взрывного” разрушения				
2	0,0261	0,0637	0,181	0,6	0,89	2,3	4,477	8,165
3	0,495	0,739	1,209	2,852	Нет “взрывного” разрушения			

кость условия “взрывного” разрушения реализуются и при температурах газов около 800 К. Для двух других моделей минимальные температуры газов выше этого значения (1200 и 1300 К соответственно). Тем не менее, установленные при моделировании минимальные температуры газов, достаточные для “взрывного” парообразования, удовлетворительно согласуются с полученными в оценочных экспериментах (в первую очередь это относится к результатам численного моделирования с применением модели 3). Очевидно, что соответствие теоретических и экспериментальных результатов с минимальными отклонениями может быть достигнуто при разработке двумерных или даже пространственных моделей (наиболее полно учитывающих процессы теплопереноса при нагреве и испарении неоднородных капель в высокотемпературных газах). Удовлетворительное соответствие характерных предельных температур газов в экспериментах и моделях может быть достигнуто также при уточнении требуемой температуры на внутренней границе раздела сред для реализации “взрывного” разрушения капли. В проведенной работе таковой считалась температура около 370 К. В реальной практике она может быть ниже, например около 340–350 К. Следствием этого может быть снижение времени τ_h и достаточных для возникновения “взрывного” разрушения капли температур газов практически до выявленных в экспериментах. К сожалению, до настоящего времени не разработаны подходы и экспериментальные методы для достоверного измерения температуры на границе контакта твердой частицы с пленкой жидкости в условиях интенсивного парообразования и при малых характерных размерах неоднородной капли, что вынуждает принимать допущение о ее значении в достаточно широком диапазоне (340–370 К).

Результаты выполненных теоретических исследований показали, что “взрывное” разрушение не-

однородных капель в высокотемпературных газовых средах возможно за счет интенсивного парообразования. Установленный эффект “взрывного” разрушения стабильно реализуется в условиях высоких температур газовой среды, что обуславливает возможность и целесообразность его применения в различных газопарокапельных технологиях (полидисперсного пожаротушения, термической или огневой очистки воды, формирования газопарокапельных теплоносителей, обработки зашлакованных поверхностей энергетического оборудования газожидкостными потоками) при интенсификации парообразования. Разработанные модели позволят прогнозировать возникновение “взрывного” парообразования в случаях применения различных водяных эмульсий, суспензий и материалов твердых включений.

Заключение

Выполненные теоретические исследования расширяют современные представления о процессах кипения и испарения существенно неоднородных капель жидкостей при различных условиях теплообмена (в частности, в слабо изученной области высоких температур газов, соответствующих типичным пламенам). Результаты численного моделирования могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих технологий, в которых реализуются интенсивные фазовые превращения неоднородных капель (тушение пожаров распыленными потоками жидкости, термическая очистка воды, формирование газопаровых теплоносителей и др.).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Виноградов А. Г. Учет спектрального состава теплового излучения при расчете коэффициента пропускания капли воды // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 64–73.
3. Саламов А. А. Современная система пожаротушения “водяной туман” высокого давления // Энергетик. — 2012. — № 3. — С. 16–18.

4. *Виноградов А. Г.* Методика расчета экранирующих свойств водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 45–56.
5. *Виноградов А. Г.* Применение теории затопленных струй к расчету параметров водяных завес // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 76–87.
6. *Абдурагимов И. М.* О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 4. — С. 60–82.
7. *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.
8. *Батов Д. В., Мочалова Т. А., Петров А. В.* Получение и изучение горючести микроэмульсий вода – ПАВ – со-ПАВ – 1,1,2,2-тетрафтордибромэтан // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 4. — С. 55–57.
9. *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.
10. *Сегаль М. Д.* Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты кабельных сооружений АЭС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2011. — № 4. — С. 61–64.
11. *Xiao X. K., Cong B. H., Wang X. S., Kuang K. Q., Richard K. K. Yuen, Liao G. X.* On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet // Journal of Fire Sciences. — 2011. — Vol. 29, No. 4. — P. 339–360. DOI: 10.1177/0734904110397812.
12. *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.
13. *Волков П. С., Забелин М. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Влияние твердых включений в каплях жидкости на интенсивность парообразования в зоне пламени // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 5. — С. 10–17.
14. *Волков П. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Влияние твердых включений в каплях жидкости на характеристики их испарения при движении через высокотемпературную газовую среду // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, № 12. — С. 33–37.
15. *Волков П. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Анализ влияния начальной температуры распыленной воды на интегральные характеристики ее испарения при движении через зону “горячих” газов // Инженерно-физический журнал. — 2014. — Т. 87, № 2. — С. 436–444.
16. *Gao Q., Wang H. P., Shen G. X.* Review on development of volumetric particle image velocimetry // Chinese Science Bulletin. — 2013. — Vol. 58, No. 36. — P. 4541–4556. DOI: 10.1007/s11434-013-6081-y.
17. *Simo Tala J. V., Russeil S., Bougeard D., Harion J.-L.* Investigation of the flow characteristics in a multi-row finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2013. — Vol. 50. — P. 45–53. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.05.003.
18. *Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M.* Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique // Measurement Science and Technology. — 2002. — Vol. 13, No. 3. — P. 308–316. DOI: 10.1088/0957-0233/13/3/312.
19. *Damaschke N., Nobach H., Tropea C.* Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Experiments in Fluids. — 2002. — Vol. 32, No. 2. — P. 143–152. DOI: 10.1007/s00348-001-0371-x.
20. *Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S.* Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet // Experiments in Fluids. — 2010. — Vol. 48, No. 4. — P. 615–629. DOI: 10.1007/s00348-009-0797-0.
21. *Bilsky A. V., Lozhkin Yu. A., Markovich D. M.* Interferometric technique for measurement of droplet diameter // Thermophysics and Aeromechanics. — 2011. — Vol. 18, No. 1. — P. 1–12. DOI: 10.1134/S086986431101001X.
22. *Стрижак П. А.* Влияние распределения капель в “водяном снаряде” на температуру и концентрацию продуктов сгорания в его следе // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 4. — С. 839–848.
23. *Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде // Инженерно-физический журнал. — 2013. — Т. 86, № 1. — С. 59–65.
24. *Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.* Численное исследование влияния конвекции в смеси продуктов сгорания на интегральные характеристики испарения движущейся капли тонкораспыленной воды // Инженерно-физический журнал. — 2014. — Т. 87, № 1. — С. 98–106.

25. Кузнецов Г. В., Куйбин П. А., Стрижак П. А. Оценка численных значений констант испарения капель воды, движущихся в потоке высокотемпературных газов // Теплофизика высоких температур. — 2015. — Т. 53, № 2. — С. 264–269.
26. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М. : Наука, 1983. — 616 с.
27. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения задач конвекции – диффузии. — М. : Эдиториал УРСС, 1999. — 248 с.
28. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник. — М. : Пожнаука, 2004. — Ч. 1. — 713 с.
29. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М. : ООО “Старс”, 2006. — 720 с.
30. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М. : Энергия, 1975. — Т. 1. — 743 с.
31. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М. : Энергия, 1975. — Т. 2. — 896 с.

Материал поступил в редакцию 7 мая 2015 г.

Для цитирования: Стрижак П. А., Пискунов М. В., Щербинина А. А. Об условиях “взрывного” разрушения неоднородной капли жидкости при кипении и интенсивном испарении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 8. — С. 18–26. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.18-26.

English

ABOUT CONDITIONS OF “EXPLOSIVE” DESTRUCTION OF HETEROGENEOUS LIQUID DROPLET AT BOILING AND INTENSIVE EVAPORATION IN HIGH-TEMPERATURE GASEOUS MEDIUM

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)

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)

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

We present three models of heat and mass transfer in the presence of heating, boiling, evaporation and “explosive” destruction of heterogeneous water droplet with solid carbon inclusion in high-temperature gases ($T_f \geq 600$ K) with the account and without reference to vapor buffer layer formation at an internal interface *solid inclusion – liquid*, as well as the model foreseeing incomplete cover of solid inclusion by liquid film.

Characteristic distributions of heterogeneous droplet temperature in the presence of these three models are presented. It is illustrated that the heat-up of heterogeneous droplet is more intensive in the case of vapor buffer layer at internal boundary and energy supply to interface through the inclusion and liquid (at the incomplete cover of solid inclusion by liquid film).

The extreme conditions of the inception of effect of heterogeneous droplet “explosive” destruction are formulated for conditions of heat and mass exchange foreseeing each of three models. It is shown that heat transfer at warming and the evaporation of a heterogeneous liquid droplet in high-temperature gases is more intensive in the presence of incomplete cover of solid inclusion by liquid film (minimum values of characteristic periods from the beginning of heat to realization of conditions of heterogeneous droplet “explosive” destruction τ_h correspond to the results of the model appliance).

Developed models and the results of numerical investigations of heat transfer and phase transformations in heterogeneous liquid droplets in the presence of warming in high-temperature gases

can be used in technologies of polydisperse firefighting, thermal cleaning, formation of two-phase gas-vapor heat carrier and others.

Keywords: evaporation; “explosive” vaporization; heterogeneous liquid droplet; solid inclusion; high-temperature gaseous medium.

REFERENCES

1. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspynennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
2. Vinogradov A. G. Uchet spektralnogo sostava teplovogo izlucheniya pri raschete koeffitsienta propuskaniya kapli vody [Accounting of thermal radiation spectral distribution at calculation of water droplet transmittance]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 64–73.
3. Salamov A. A. Sovremennaya sistema pozharotusheniya “vodyanoy tuman” vysokogo davleniya [Modern system of firefighting “water fog” of high-pressure]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 16–18.
4. Vinogradov A. G. Metodika rascheta ekraniruyushchikh svoystv vodyanykh zaves [Calculation method of water curtain shielding properties]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45–56.
5. Vinogradov A. G. Primeneniye teorii zatoplennykh struy k raschetu parametrov vodyanykh zaves [Application of the submerged jet theory to calculation of water curtain parameters]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 76–87.
6. Abduragimov I. M. O mekhanizmax ognetchashchego deystviya sredstv pozharotusheniya [About mechanisms of fire extinguishing action of fire extinguishing means]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 60–82.
7. 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.
8. Batov D. V., Mochalova T. A., Petrov A. V. Polucheniye i izucheniye goryuchesti mikroemulsiy voda – PAV – so-PAV – 1,1,2,2-tetrafordibrometan [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.
9. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniym tonkoraspynennoy vody na elektrostantsiyakh [Automatical water fire fighting by water mist at power plants]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
10. Segal M. D. Ispolzovaniye tonkoraspynennoy vody dlya povysheniya protivopozharnoy zashchity kabelnykh sooruzheniy AES [Usage of water mist to increase the fire precautions of cable structures at Atomic Power Stations]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy — Problems of Safety and Emergency Situations*, 2011, no. 4, pp. 61–64.
11. Xiao X. K., Cong B. H., Wang X. S., Kuang K. Q., Richard K. K. Yuen, Liao G. X. On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet. *Journal of Fire Sciences*, 2011, vol. 29, no. 4, pp. 339–360. DOI: 10.1177/0734904110397812.
12. 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.
13. Volkov R. S., Zabelin M. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye tverdykh vkluycheniy v kaplyakh zhidkosti na intensivnost paroobrazovaniya v zone plameni [Influence of solid inclusions in liquid drops on evaporation intensity in the flame]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 10–17.
14. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Vliyaniye tverdykh vkluycheniy v kaplyakh zhidkosti na kharakteristiki ikh ispareniya pri dvizhenii cherez vysokotemperaturnuyu gazovuyu sredu [Influence of solid inclusions in liquid droplets on characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gaseous medium]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 12, pp. 33–37.
15. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Analiz vliyaniya nachalnoy temperatury raspynennoy vody na integralnyye kharakteristiki yeye ispareniya pri dvizhenii cherez zonu “goryachikh” gazov [Analysis of the effect exerted by the initial temperature of atomized water on the integral characteristics of its evaporation during motion through the zone of “hot” gases]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 2, pp. 436–444.

16. Gao Q., Wang H. P., Shen G. X. Review on development of volumetric particle image velocimetry. *Chinese Science Bulletin*, 2013, vol. 58, no. 36, pp. 4541–4556. DOI: 10.1007/s11434-013-6081-y.
17. Simo Tala J. V., Russeil S., Bougeard D., Harion J.-L. Investigation of the flow characteristics in a multirow finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, vol. 50, pp. 45–53. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2013.05.003.
18. Kawaguchi T., Akasaka Y., Maeda M. Size measurements of droplets and bubbles by advanced interferometric laser imaging technique. *Measurement Science and Technology*, 2002, vol. 13, no. 3, pp. 308–316. DOI: 10.1088/0957-0233/13/3/312.
19. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics. *Experiments in Fluids*, 2002, vol. 32, no. 2, pp. 143–152. DOI: 10.1007/s00348-001-0371-x.
20. Akhmetbekov Y. K., Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet. *Experiments in Fluids*, 2010, vol. 48, no. 4, pp. 615–629. DOI: 10.1007/s00348-009-0797-0.
21. Bilsky A. V., Lozhkin Yu. A., Markovich D. M. Interferometric technique for measurement of droplet diameter. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1134/S086986431101001X.
22. Strizhak P. A. Vliyaniye raspredeleniya kapel v “vodyanom snaryade” na temperaturu i kontsentratsiyu produktov sgoraniya v yego slede [Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 4, pp. 839–848.
23. Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Teplomassoperenos pri dvizhenii kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Heat and mass transfer in the process of movement of water drops in a high-temperature gas medium]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 59–65.
24. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennyye issledovaniye vliyaniya konveksii v smesi produktov sgoraniya na integralnyye kharakteristiki ispareniya dvizhushcheyasya kapli tonkoraspylennoy vody [Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 1, pp. 98–106.
25. Kuznetsov G. V., Kuybin P. A., Strizhak P. A. Otsenka chislennykh znacheniy konstant ispareniya kapel vody, dvizhushchikhsya v potoke vysokotemperaturnykh gazov [Estimation of the numerical values of the evaporation constants of water droplets moving in a flow of high-temperature gases]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 2, pp. 264–269. DOI: 10.7868/S0040364415020131.
26. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference scheme]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
27. 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. 248 p.
28. Korolchenko A. Ya. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik* [Fire and explosion hazard of substances and materials and tools of their extinguishing. Reference book]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2004. Part 1, 713 p.
29. 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.
30. Yurenev V. N., Lebedev P. D. (eds). *Teploekhnicheskii spravochnik* [Heat engineering reference book]. Moscow, Energiya Publ., 1975. Vol. 1, 743 p.
31. Yurenev V. N., Lebedev P. D. (eds). *Teploekhnicheskii spravochnik* [Heat engineering reference book]. Moscow, Energiya Publ., 1975. Vol. 2, 896 p.

For citation: Strizhak P. A., Piskunov M. V., Shcherbinina A. A. Ob usloviyakh “vzryvnogo” razrusheniya neodnorodnoy kapli zhidkosti pri kipenii i intensivnom isparenii v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [About conditions of “explosive” destruction of heterogeneous liquid droplet at boiling and intensive evaporation in high-temperature gaseous medium]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 8, pp. 18–26. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.18-26.