УДК 536.4

УСЛОВИЯ ИНТЕНСИВНОГО ИСПАРЕНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ ВОДЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

О.В. ВЫСОКОМОРНАЯ, М.В. ПИСКУНОВ, П.А. СТРИЖАК

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Выполнено численное моделирование процессов теплопереноса при интенсивном испарении неоднородной (с твердым включением – углеродистой частицей) капли воды в высокотемпературной (более 800 К) газовой среде. Установлены характерные времена нагрева капли до условий интенсивного парообразования (достижения температуры кипения на границе раздела сред «твердое включение – жидкость»). Определено влияние на эти времена температуры внешней газовой среды, основных свойств материала включения. Выделены необходимые и достаточные условия интенсивного парообразования в системе «капля воды с твердым включением – высокотемпературные газы».

Ключевые слова: капля воды, твердое включение, углеродистая частица, испарение, парообразование, высокотемпературные газы, необходимые и достаточные условия.

Введение

Технологические процессы многих отраслей промышленности связаны с процессами тепломассопереноса, в том числе, с осуществлением фазовых переходов [1–7]. Развитие в последнее время экспериментальных методов и появление новых программно-аппаратных комплексов для исследования закономерностей фазовых превращений жидкостей в условиях интенсивного нагрева [8–10] влечёт за собой появление новых научных результатов в этой области. В работах [11–13] представлены результаты экспериментов по нагреву и испарению неоднородных капель воды с включениями в виде мелкодисперсных алюминиевых и углеродистых частиц. В экспериментах [11–13] зарегистрировано образование и отрыв пузырьков с внутренней границы «твердое включение – жидкость». Вследствие высоких скоростей испарения неоднородных капель [13] возможна реализация условий интенсивного парообразования на этой границе. Однако такие условия в экспериментах [11–13] не установлены. По вполне объяснимым причинам это довольно сложно сделать даже при использовании современных программно-аппаратных комплексов. Представляет интерес теоретическое решение задачи теплопереноса в неоднородной капле в условиях интенсивного нагрева.

Цель настоящей работы – численное определение необходимых и достаточных условий интенсивного испарения неоднородной капли воды в высокотемпературной газовой среде.

Модель теплопереноса в условиях фазовых превращений и методы решения

Принятая схема области решения задачи теплопереноса показана рис. 1. Считалось, что капля жидкости с твердым включением (рис. 1) при начальной температуре T_0=300 К находится в газовой среде с температурой T_f=800÷1500 К. Численные исследования выполнены для капли воды с углеродистой частицей при нагреве в воздухе.

© О.В. Высокоморная, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак

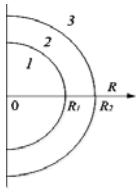

Рис. 1. Схема области решения задачи теплопереноса при $0<\tau<\tau_h$:
1 – твердое включение; *2* – жидкость; *3* – газовая среда

При существенно отличающихся температурах T_0 и T_f возможен прогрев капли не только за счет кондуктивного, но и лучистого теплообмена с внешней газовой средой. На поверхности капли происходит испарение жидкости. Как следствие, уменьшается характерный размер R_2. При прогреве пленки воды (толщина $\delta=R_2-R_1$) за счет излучения у границы «твердое включение – жидкость» ($R=R_1$) аккумулируется тепло. Теплопроводность материала включения мала, он непрозрачен и подведенная к его поверхности теплота не проникает вглубь. В результате происходит интенсивный рост температуры на границе раздела сред «твердое включение – жидкость». При постановке задачи принималось, что если температура на этой границе достигает значений, соответствующих кипению жидкости (для воды $T\approx370$ К), то происходит интенсивное парообразование. По результатам решения задачи определялось время нагрева неоднородной капли до достижения условия ($T(R_1)\approx370$ К) интенсивного парообразования (t_h).

При численном моделировании принимались допущения:

1. Не учитывался процесс внутреннего притока массы в капле (решалась задача теплопереноса с учетом тепловых эффектов эндотермических фазовых превращений).

2. Учитывалось изменение (уменьшение) размеров пленки жидкости (δ) и капли в целом (R_2) за счет испарения только со свободной (внешней) поверхности последней.

3. Теплофизические характеристики компонент неоднородной капли не зависели от температуры.

Сформулированной физической постановке задачи соответствует следующая система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ($0\le t\le t_h$):

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

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

Начальные ($t=0$) условия: $T=T_0$ при $0<R<R_2$.

Граничные условия при $0\le t\le t_h$:

$$R=0,\ \frac{\partial T_1}{\partial R}=0; \tag{3}$$

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

$$R=R_2,\ \lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial R}=H(R_1)-Q_e W_e. \tag{5}$$

Для вычисления плотности теплового потока в рассматриваемой системе использовались математические выражения законов Стефана-Больцмана и Бугера-Ламберта-Бера [14]:

$$H(R_2)=\varepsilon_2\sigma[T_f^4-T(R_2)^4],$$
$$H(R_1)=H(R_2)\exp(-k_\lambda[r_2-r_1]),$$
$$H(R)=H(R_2)\exp(-k_\lambda[r_2-r]).$$

Здесь t – время, с; t_h – время нагрева неоднородной капли до достижения условия интенсивного парообразования, с; T – температура, К; T_0 – начальная температура неоднородной капли, К; T_f – температура газовой среды, К; R_1 и R_2 – радиус твёрдого включения и внешний радиус неоднородной капли соответственно, м; $H(R)$ – плотность энергии, передаваемой от высокотемпературных газов неоднородной капле, Вт/м^2; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q_e – тепловой эффект испарения воды, Дж/кг; W_e – массовая скорость испарения воды, кг/(м^2·с); ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м^2·К^4); k_λ – показатель поглощения, м$^{-1}$; ρ – плотность, кг/м^3; индексы «1», «2» соответствуют твердому включению и пленке жидкости.

Система дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями решалась методом конечных разностей [15]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использовался локально-одномерный метод [16]. Нелинейные разностные аналоги дифференциальных уравнений решались методом итераций [17]. Решение одномерных разностных уравнений проводилось методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [15]. Для оценки достоверности результатов численных исследований выполнена проверка консервативности разностной схемы, алгоритм которой представлен в работе [18].

Результаты и обсуждение

Исследование процессов теплопереноса в условиях фазовых превращений проводилось при следующих значениях параметров: начальная температура капли воды с твердым включением T_0=300 К, внешней газовой среды T_f=800÷1500 К; исходный размер капли R_1=(0,5÷1,5)·10^{-3} м; начальная толщина пленки жидкости δ=(0,1÷1)·10^{-3} м. Теплофизические характеристики элементов (углеродистая частица, вода, воздух) исследуемой системы и оптические свойства воды выбирались в соответствии с [19–21]: λ_1=0,25 Вт/(м·К), C_1=2720 Дж/(кг·К), ρ_1=1200 кг/м^3, λ_2=0,56 Вт/(м·К), C_2=4200 Дж/(кг·К), ρ_2=1000 кг/м^3, Q_e=2 МДж/кг, ε_2=0,9, k_λ=1,8·10^{-3} 1/м.

На рис. 2 показана зависимость характерного времени нагрева неоднородной капли воды до условий интенсивного парообразования от температуры внешней газовой среды при различной толщине слоя жидкости в неоднородной капле.

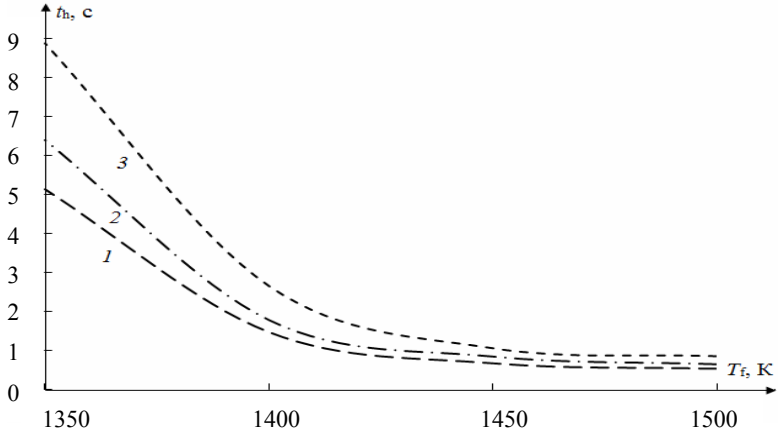

Рис. 2. Зависимость времени нагрева капли (R_2=10^{-3} м) до интенсивного парообразования от температуры газовой среды T_f при разных толщинах пленки жидкости δ, м: *1* – 0,4·10^{-3}; *2* – 0,5·10^{-3}; *3* – 0,7·10^{-3}

Выполненные численные исследования показали, что при температурах T_f<1350 К условия интенсивного парообразования на внутренней границе раздела не реализуются. Происходит интенсивное испарение только со свободной поверхности капли. Последняя прогревается, но температура на границе «твердое включение – жидкость» не достигает значения $T(R_1)$≈370 К. В частности, при 800 К<T_f<1350 К и варьировании других параметров исследуемого процесса в указанных выше диапазонах максимальные значения $T(R_1)$ составляют от 330 до 350 К в течение всего характерного времени существования (полного испарения) капли.

Уменьшение начального характерного размера пленки жидкости, как и следовало ожидать, приводит к снижению времен t_h (рис. 2). Однако в результате численного моделирования установлено, что есть некоторые предельные толщины пленки, при которых возможна реализация условий интенсивного парообразования на границе раздела сред внутри капли. В качестве таковых можно выделить $\delta<0{,}2\cdot10^{-3}$ м. Установлено, что при малых толщинах пленки вода интенсивно испаряется в течение нескольких секунд при недостижении температуры $T(R_1)$≈370 К.

На рис. 3 показана зависимость времен t_h от отношения температуропроводности ($a=\lambda/c\rho$) жидкости и материала включения. Увеличение отношения a_2/a_1 приводит к снижению времен t_h. Это, в первую очередь, обусловлено стоком тепла к границе раздела сред $R=R_1$ (рис. 1) вследствие высокой температуропроводности воды и низкой, соответственно, – материала включения. Этот эффект особенно хорошо проявляется при уменьшении T_f. Полученные зависимости позволяют оценить масштаб влияния свойств жидкости и включения на условия исследуемых фазовых превращений.

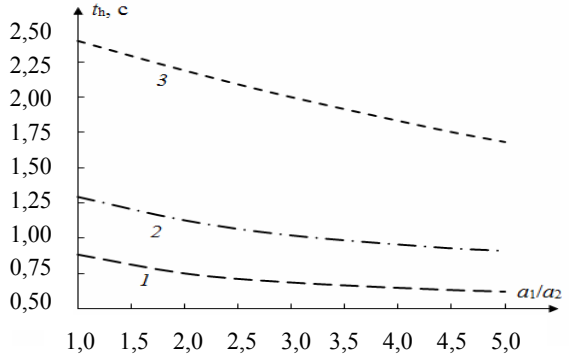

Рис. 3. Зависимость времени нагрева капли ($R_2=10^{-3}$ м, $\delta=0{,}5\cdot10^{-3}$ м) до интенсивного парообразования от отношения температуропроводности воды a_2 и материала включения a_1 при разных температурах газов T_f, К : *1* –1500; *2* –1450; *3* –1400

При анализе необходимых и достаточных условий роста температуры на границе раздела сред «твердое включение – жидкость» до значений, соответствующих кипению воды, можно предположить, что формирование паров и, как следствие, парового слоя между жидкостью и твердым включением будет приводить к росту инерционности прогрева капли в целом. Формирование соответствующего буферного парового слоя с низким коэффициентом теплопроводности (по сравнению с водой и частицей) на границе «жидкость – твердое включение» будет приводить и к росту минимальных температур внешней газовой среды, при которых подведенной к капле энергии достаточно для интенсивного парообразования. Но из анализа результатов моделирования теплопереноса с подобными паровыми слоями [22, 23] можно

предположить, что учет формирования последних будет приводить к росту t_h не более, чем на 30 %, а минимальные температуры газов T_f возрастут не более, чем на 100 К.

Следует отметить, что установленные при численном моделировании процессов теплопереноса особенности прогрева гетерогенных капель довольно хорошо соответствуют данным экспериментов [24]. В частности, по результатам опытов [24] впервые экспериментально показано, что капля с расположенным внутри соразмерным включением может вскипать и распадаться (характер этого процесса соответствует «взрывному разрушению») в результате интенсивного парообразования. Выделенные в экспериментах предельные (минимальные) толщины пленок вокруг включения (около 0,15 мм), при которых возможны интенсивное парообразование и распад капли, близки выделенным в настоящей работе (0,2 мм). Второй определяющий параметр рассматриваемых процессов – температура газов (соответствующая необходимым и достаточным условиям интенсивного парообразования) – в экспериментах [24] ниже, чем в настоящей работе. Например, в опытах [24] кипение гетерогенной капли регистрировалось и при температурах 700 К (в модели (1)–(5) минимальной температурой газов является значение 1300 К). Более низкие температуры интенсивного парообразования гетерогенных капель в экспериментах [24] обусловлены тем, что в последних рассмотрены разные условия расположения включения в капле (относительно ее центра масс). Показано [24], что времена прогрева капли до условий взрывного парообразования при смещении включения к границе с газовой средой значительно снижаются. Этим условиям соответствуют в экспериментах [24] минимальные (700 К) значения температуры газов, при которых реализуется процесс вскипания капли. При смещении включения к оси симметрии гетерогенной капли необходимые и достаточные температуры газов существенно превышали 700 К (такой вариант расположения включения в капле рассмотрен в настоящей работе). Также следует отметить, что модель (1)–(5) исключает возможное влияние предварительного прогрева включения на условия испарения и кипения капли. В экспериментах [24] этот эффект присутствовал.

Результаты выполненного численного моделирования теплопереноса при фазовых превращениях неоднородной капли воды дополняют полученные в последние годы теоретические и экспериментальные данные исследований в области двухфазных и многофазных газокапельных потоков [25]. С использованием разработанной модели теплопереноса можно прогнозировать условия интенсивного испарения со свободной поверхности капли, а также на границе «твердое включение – жидкость» при изменении основных параметров системы в довольно широких диапазонах, соответствующих типичным газо- и парокапельным технологиям.

Заключение

В результате численных исследований определены необходимые и достаточные условия интенсивного парообразования неоднородной капли воды в высокотемпературной газовой среде. Для реализации этих фазовых превращений необходимо выполнение условия T_f>1300 К (при варьировании других параметров процесса в довольно широком диапазоне). В качестве достаточного условия можно выделить предельную толщину пленки воды вокруг твердого включения – $\delta>0{,}2\cdot10^{-3}$ м (при меньших толщинах пленки жидкости температура на границе «твердое включение – жидкость» не успевает достичь 370 К вследствие полного испарения со свободной поверхности).

Сформулированную модель теплопереноса в условиях фазовых превращений внутри капли и на ее свободной поверхности можно использовать для прогностического исследования интенсивного парообразования капель жидкостей с

различными включениями. Целесообразным представляется развитие созданной модели, в первую очередь, в направлении учета оптических свойств включения и формирования парового («буферного») слоя у границы «твердое включение – жидкость».

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

Summary

The numerical simulation of heat and mass transfer processes at intensive evaporation of a heterogeneous water droplet (with a solid inclusion – carbon particle) in a high-temperature (more than 800 K) gaseous medium in conducted. The characteristic periods of water droplet heating up to the conditions of an intensive vaporization (reaching of the boiling temperature at the interface "solid inclusion – liquid") are established. The influence of external gaseous medium temperature, the main properties of inclusion material on these periods is determined. The necessary and sufficient conditions of the intensive vaporization in the system "water droplet with a solid inclusion – high-temperature gases" are pointed out.

Keywords: water droplet, solid inclusion, carbon particle, evaporation, vaporization, high-temperature gases, necessary and sufficient conditions.

Литература

1. Мелинова Л.В., Подберезный В.Л., Седлов А.С. Характеристики дистилляционных опреснительных установок // Энергетик. 2014. № 12. С. 17–21.

2. Шарифуллин В.Н., Бадриев А.И., Шарифуллин А.В. Анализ влияния неравномерности распределения плотности орошения на процесс в башенной градирне // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 11–12. С. 24–26.

3. Тулепбаев В.Б., Дьяченко И.Ю. Применение вакуумных выпаривателей для очистки сточных вод гальванического производства // Гальванотехника и обработка поверхности. 2008. Т. XVI. № 1. С. 40-45.

4. Вальдберг А.Ю., Макеева К.П. Механические форсунки для подвода жидкости в газоочистные аппараты // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 5. С. 42–44.

5. Никитин М.Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси // Промышленная энергетика. 2010. № 6. С. 42–46.

6. Никитин М.Н. Использование парогазовой смеси при сжигании топлива // Промышленная энергетика. 2010. № 12. С. 37–42.

7. Федяев В.Л., Власов Е.М., Гайнуллина Р.Ф., Гайнуллин Р.Ф. Оценка охлаждающей способности оросительных градирен // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 3–4. С. 27–32.

8. 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. V. 50. P. 45–53.

9. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Experimental in Fluids. 2002. V. 32, Iss. 2. P. 143–152.

10. 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. V. 48, Iss. 4. P 615–629.

11. 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. V. 70. P. 61–70.

12. 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. V. 79. P. 838–845.

13. 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. V. 88. P. 193–200.

14. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Москва: Атомиздат, 1979.

15. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1983.

16. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции – диффузии. Москва: Эдиториал УРСС, 1999.

17. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. Москва: Наука, 1975.

18. 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. № 2. P. 85–93.

19. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва: ООО «Старс», 2006.

20. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. Москва: Энергия, 1975. Т. 1.

21. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. Москва: Энергия, 1975. Т. 2.

22. Glushkov D.O., Strizhak P.A. Transient Heat and Mass Transfer of Liquid Droplet Ignition at the Spreading over the Heated Substrate // Advances in Mechanical Engineering. 2014. V. 2014. Article ID 269321.

23. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Research of Macroscopic Regularities of Heat and Mass Transfer at the Ignition Condition of a Liquid High-Energy Material by an Immersed Source with a Limited Energy Capacity // Advances in Mechanical Engineering. 2014. V. 2014. Article ID 764537.

24. Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В, Пискунов М.В., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. Условия взрывного парообразования на границе раздела сред в неоднородной капле // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41, № 16. С. 98–104.

25. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421–455.

Поступила в редакцию ***11 июня 2015 г.***

Высокоморная Ольга Валерьевна – канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь кафедры «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Национального исследовательского Томского политехнического университета. Тел: 8(382)2701777, доп. 1957; 8(913)8461236.

Пискунов Максим Владимирович – аспирант кафедры «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Национального исследовательского Томского политехнического университета. Тел: 8(382)2701777, доп. 3465; 8(952)8979747.

Стрижак Павел Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Национального исследовательского Томского политехнического университета. Тел: 8(382)2701777, доп. 1910; 8(903)9134829.