

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА «ВЗРЫВНОГО» ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ  
НЕОДНОРОДНОЙ КАПЛИ ВОДЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗАХ**

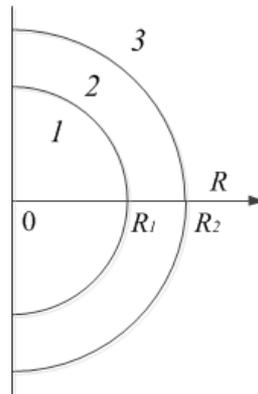
**О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина**

Научный руководитель профессор П.А. Стрижак

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Тонкораспылённая вода используется в технологических процессах многих отраслей промышленности. Например, для утилизации энергии уходящих газов энергоустановок малой мощности, применяющихся, в том числе, для энергоснабжения технологических объектов нефтегазовой отрасли, возможно формирование двухфазных газопаровых теплоносителей путем смешения высокотемпературных газов с потоком распылённой воды. В результате теплообмена между каплями жидкости и горячими газами происходит испарение воды, сопровождающееся снижением температуры теплоносителя. Одним из способов интенсификации процессов теплопереноса с формирующейся двухфазной системе может быть введение в капли неоднородностей в виде твёрдых включений (рис. 1), способных аккумулировать энергию дымовых газов, частично проведённую слоем воды, и создавать дополнительные очаги парообразования на границе раздела «твёрдое включение – жидкость». В работах [6, 7] установлено влияние на характерные скорости прогрева и испарения капель массы, размеров и концентрации включений (на примере углеродистых и алюминиевых частиц). В случае, если объем пара, образовавшегося в результате испарения в зоне контакта частицы с жидкостью, станет критическим, возможен «разрыв» капли воды.

Цель работы – проведение численных исследований для определения условий возникновения эффекта «взрывного» парообразования в капле воды с твёрдым включением при нагреве в среде высокотемпературных газов.



**Рис. 1. Схема области решения задачи теплопереноса при  $0 < t < t_h$ : 1 – твердое включение, 2 – жидкость, 3 – газовая среда**

Для проведения численных исследований была разработана математическая модель, включающая в себя следующие уравнения:

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

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

Начальные ( $t=0$ ) условия:  $T=T_0$  при  $0 < R < R_2$ . Граничные условия при  $0 \leq t \leq t_h$ :  $R=0$ ,  $\frac{\partial T_1}{\partial R} = 0$ ;  $R=R_1$ ,

$$\frac{\partial T_2}{\partial R} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial T_1}{\partial R} + H(R_1) - Q_e W_e; \quad R=R_2, \quad \frac{\partial T_2}{\partial R} = H(R_1) - Q_e W_e.$$

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;  $T_t$  – температура газовой среды, К;  $R_1$  и  $R_2$  – радиус твердого включения и внешний радиус неоднородной капли соответственно, м;  $H(R)$  – плотность энергии, передаваемой от высокотемпературных газов неоднородной капле, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $Q_e$  – тепловой эффект испарения воды, Дж/кг;  $W_e$  – массовая скорость испарения воды, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Система дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями решалась методом конечных разностей [2]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использовался локально-одномерный метод. Нелинейные разностные аналоги дифференциальных уравнений решались методом итераций. Решение одномерных разностных уравнений проводилось методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [2].

Для оценки достоверности результатов численных исследований выполнена проверка консервативности разностной схемы, алгоритм которой представлен в [5, 9].

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  $T_f=800\div 1500$  К; исходный размер капли  $R_1=(0.5\div 1.5)\cdot 10^{-3}$  м; начальная толщина пленки жидкости  $\delta=(0.1\div 1)\cdot 10^{-3}$  м. Теплофизические характеристики элементов (углеродистая частица, вода, воздух) исследуемой системы и оптические свойства воды выбирались в [1, 3, 4].

На рис. 2 представлены зависимости характерного времени нагрева неоднородной капли воды до условий интенсивного парообразования от температуры внешней газовой среды. Можно отметить существенно нелинейный вид полученных зависимостей  $t_h=f(T_f)$ , что обусловлено, в первую очередь, соответствующими зависимостями скоростей испарения от  $T$  [8].

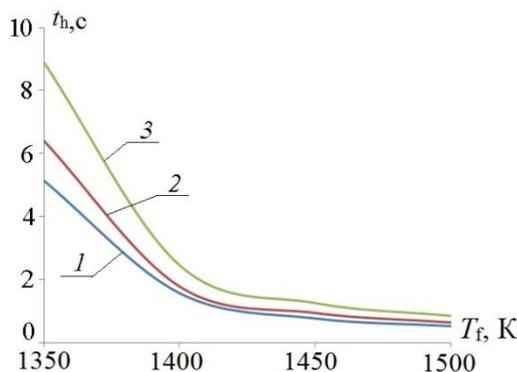


Рис. 2. Зависимости времени нагрева капли до интенсивного парообразования от температуры газовой среды  $T_f$  при разных толщинах пленки жидкости ( $R_2=10^{-3}$  м): 1 –  $\delta=0.4\cdot 10^{-3}$  м, 2 –  $\delta=0.5\cdot 10^{-3}$  м, 3 –  $\delta=0.7\cdot 10^{-3}$  м

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  $T(R_1)\approx 370$  К. В частности, при  $1000\text{ К} < T_f < 1350$  К и варьировании других параметров исследуемого процесса в указанных выше диапазонах максимальные значения  $T(R_1)$  составляют от 340 до 350 К в течение всего характерного времени существования (полного испарения) капли.

Уменьшение начального характерного размера пленки жидкости, как и следовало ожидать, привело 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  $\delta < 0.2\cdot 10^{-3}$  м. Установлено, что при малых толщинах пленки вода интенсивно испаряется в течение нескольких секунд при недостижении температуры  $T(R_1)\approx 370$  К.

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

#### Литература

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва: ООО «Старс», 2006.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1983.
3. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. Москва: Энергия, 1975. Т. 1.
4. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. Москва: Энергия, 1975. Т. 2.
5. 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. – V. 86. – Iss. 4. – P. 895–904.
6. 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.
7. 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. – V. 59. – № 12. – P. 1770–1774.
8. 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.
9. 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.