

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ КАПЛИ ВОДЫ С
ТВЕРДЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ В СРЕДЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ**

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: vysokomornaja@tpu.ru

**HEAT AND MASS TRANSFER AND PHASE TRANSFORMATIONS DURING THE MOTION OF
WATER DROPLETS WITH SOLID INCLUSION IN THE AREA OF HIGH-TEMPERATURE GASES**

A.A. Sherbinina, P.A. Strizhak, O.V. Vysokomornaya

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: vysokomornaja@tpu.ru

***Annotation.** Physical and mathematical models of heat and mass transfer at evaporation of water droplet with solid inclusion in the area of high-temperature gases are represented. The conditions of intensive evaporation of heterogeneous droplet were determined. The dependence of the typical droplet heating time before the beginning of intensive evaporation on the gas area temperature was established.*

Интенсификация фазовых переходов в капельных потоках жидкости за счёт введения твёрдых включений является перспективным направлением исследования процессов теплообмена. Технологии, основанные на результатах исследований процесса испарения капель жидкости с твёрдыми включениями, могут иметь ряд практических приложений: создание двухфазных газопаровых теплоносителей, термическая очистка жидкостей, системы тушения пожаров распылённой водой и др. [1, 2]. В последнее время были проведены экспериментальные исследования особенностей теплообмена при испарении капель воды с твёрдыми включениями в высокотемпературной (более 800 К) газовой среде [3, 4]. Однако условия экспериментов не всегда позволяют варьировать ключевые параметры исследуемой системы в широком диапазоне, что зачастую необходимо для анализа масштабов влияния тех или иных факторов. Проведение аналогичных исследований на базе численных моделей, учитывающих основные физические процессы, протекающие при прогреве и испарении неоднородной капли воды в высокотемпературной среде, являются с этой точки зрения наиболее целесообразными.

Цель работы – численное исследование процессов теплообмена при испарении неоднородной капли воды в среде высокотемпературных газов.

Схема области решения поставленной задачи теплообмена представлена на рис. 1. Предполагалось, что сферическая капля воды радиусом R_2 с твёрдым углеродистым включением в центре радиусом R_1 находится в среде высокотемпературных газов. Начальная температура капли составляла $\Theta_0=0.3$, температура газовой среды варьировалась в диапазоне $\Theta_f=0.8\div 1.5$. За счёт радиационного и кондуктивного механизмов теплообмена происходит прогрев капли, затем начинается фазовый переход на внешней её границе. Кроме того, часть тепла проводится слоем воды к твёрдому включению в центре капли, что приводит к разогреву поверхности углеродистой частицы. При

достижении условий парообразования на границе раздела фаз происходит формирование локальных очагов испарения, что приводит к интенсификации фазового перехода в неоднородной капле. При проведении численного моделирования размер капли варьировался в диапазоне $R_1=0.5 \div 1.5$; толщина пленки жидкости $\delta R=0.1 \div 1$.

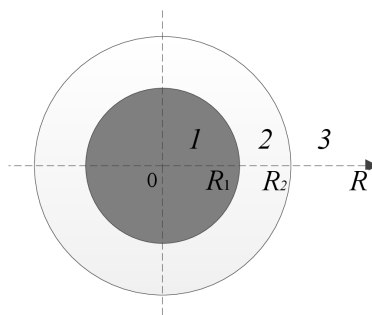


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 – твердое включение; 2 – вода; 3 – высокотемпературная газовая среда

Система дифференциальных уравнений в безразмерной постановке, описывающая представленную физическую модель включает в себя:

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R}, \quad 0 < R < R_1; \quad (1)$$

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + Sr_2 \frac{\partial H(R)}{\partial R}, \quad R_1 < R < R_2; \quad (2)$$

$$Fo_2 = \frac{\lambda_2 t_m}{\rho_2 C_2 r_m^2}, \quad Sr_2 = \frac{r_m}{\lambda_2 (T_m - T_0)}$$

Начальные ($\tau=0$) условия: $\Theta = \Theta_0$ при $0 < R < R_2$. Граничные условия при $0 \leq \tau \leq th$:

$$R=0, \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} = 0; \quad R=R_1, \quad \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} - Sr_2 [Q_e We - H(R_1)]; \quad R=R_2, \quad \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = Sr_2 [H(R_2) - Q_e We]$$

Здесь Θ – безразмерная температура; τ – безразмерное время; R – безразмерная координата; $H(R)$ – плотность теплового потока от газовой среды, Вт/м²; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); t_m – масштаб по времени ($t_m = 1$ с); ρ – плотность, кг/м³; C – теплоёмкость, Дж/(кг·К); r_m – масштаб по координате ($r_m = 10^{-3}$ м); T_m – масштаб температуры ($T_m = 1000$ К); T_0 – температура в начальный момент времени, К; th – характерное время нагрева неоднородной капли воды до условий интенсивного парообразования; Q_e – тепловой эффект испарения воды, Дж/кг; We – массовая скорость испарения воды, кг/(с·м²); индексы «1», «2» соответствуют твёрдому включению и воде.

Методы и алгоритм решения системы нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений (1)–(2) в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями аналогичны [5, 6]. Для оценки достоверности результатов численных исследований выполнена проверка консервативности разностной схемы, алгоритм которой представлен в [5, 6].

В таблице 1 представлена зависимость характерного времени нагрева неоднородной капли воды до условий интенсивного парообразования th от безразмерной температуры внешней газовой среды Θ_f .

Вследствие зависимости скорости испарения жидкости от Θ_f , характерное время прогрева τ_h с ростом температуры Θ_f изменяется нелинейно.

Таблица 1

Зависимость безразмерного времени нагрева капли до интенсивного парообразования от температуры газовой среды Θ_f при разных толщинах пленки жидкости ($R_2=1$)

Θ_f	τ_h		
	$\delta R=0.4$	$\delta R=0.5$	$\delta R=0.7$
1,35	5,23	6,31	8,92
1,4	1,92	2,04	2,88
1,45	0,96	1,02	1,26
1,5	0,83	0,94	1,03

Следует отметить, что при проведении анализа результатов моделирования в настоящей работе в качестве условия интенсивного испарения капли принималось достижение температуры Θ на границе раздела сред $R=R_1$ характерного значения 0,37, соответствующего кипению воды. В ходе численного моделирования фазового перехода при нагреве неоднородной капли в высокотемпературной среде было установлено, что условия интенсивного парообразования в зоне контакта твёрдого включения с водой реализуются только при температуре газов $\Theta_f \geq 1,35$. При меньших значения температуры газовой среды происходит испарение воды с внешней границы капли, однако твёрдое включение не разогревается до необходимой для начала испарения температуры.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин М.Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси // Промышленная энергетика. – 2010. – № 6. – С. 42–46.
2. Xiao X.K., Cong B.H., Wang X.S., Kuang K.Q., Yuen K.K., Liao G.X. On the behavior of flame expansion in pool fire extinguishment with steam jet // Journal of Fire Sciences. – 2011. – V. 29. – № 4. – P. 339–360.
3. 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.
4. 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.
5. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53. – № 5–6. – P. 923–930.
6. 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.