

О. В. ВЫСОКОМОРНАЯ, инженер-исследователь кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: vysokomornaja@tpu.ru)

М. В. ПИСКУНОВ, аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета (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 Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.4

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ "ВЗРЫВНОГО" ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВОДЫ В ПЛАМЕННОЙ ЗОНЕ ГОРЕНИЯ

Разработаны физическая и математическая модели процессов теплопереноса при движении неоднородной капли воды (с твердым включением) в среде высокотемпературных (более 800 К) газов. С применением разработанных моделей проведены численные исследования испарения капель с твердыми включениями в пламенной зоне горения. Выявлены два режима фазовых превращений неоднородных капель: испарение со свободной поверхности капли на внешней границе при температуре газовой среды $T_f < 1050$ К и радиусе капли $r_2 < 0,3 \cdot 10^{-3}$ м, а также испарение со "взрывным" парообразованием вблизи зоны контакта твердого включения с жидкостью при $T_f \geq 1050$ К, $r_2 \geq 0,3 \cdot 10^{-3}$ м. Сопоставлены результаты численного моделирования с результатами проведенных ранее экспериментов.

Ключевые слова: неоднородная капля воды; твердое включение; углеродистая частица; высокотемпературная газовая среда; испарение; "взрывное" парообразование.

Введение

Технологии, основанные на применении капельных потоков тонкораспыленной воды, широко используются во многих производственных отраслях для осуществления различных процессов: размораживания сыпучих сред газопарокапельными потоками, очистки и обработки различных поверхностей, формирования двухфазных теплоносителей на базе дымовых газов и парокапельных смесей и т. д. Известно также [1–6], что на применении тонкораспыленной воды основаны перспективные технологии пожаротушения. В работе [7] показано, что для более эффективного и быстрого снижения температуры в зоне пламени необходимо дробление капель воды до определенного характерного размера (от нескольких десятков до сотен микрометров), а также последовательное распыление воды через определенные временные интервалы.

Кроме того, экспериментально исследовано влияние на интенсивность испарения капель воды в высокотемпературной газовой среде примесей и инородных твердых включений [8]. Показано [8], что наличие последних интенсифицирует процессы теп-

ломассопереноса и фазовых переходов в рассматриваемых системах. Такие результаты дают основание предполагать возможность осуществления режима интенсивного ("взрывного") парообразования неоднородной капли воды (с твердым включением) при ее движении через зону пламени (где происходит перегрев капель до температуры кипения и, как следствие, разрушение их структуры вследствие движения пузырьков).

Однако для определения механизмов интенсификации испарения капель при наличии твердых инородных включений, а также для разработки теоретических основ технологии, позволяющей осуществлять тушение лесных и городских пожаров тонкораспыленной водой с максимальным коэффициентом (за счет увеличения площади парообразования) ее использования, необходимо проведение исследований в условиях варьирования большого количества параметров системы. Однако зачастую изменение таких параметров ограничено диапазоном, предусмотренным конструкцией и характеристиками стенов. С этой точки зрения целесообразным является проведение подобных исследований с помощью

физических и математических моделей, описывающих процессы теплопереноса и фазовых переходов в системе *неоднородная капля воды с твердым включением – высокотемпературная газовая среда*.

Цель работы — численное исследование возможного механизма “взрывного” парообразования в системе *неоднородная капля воды с твердым включением – высокотемпературная газовая среда*.

Постановка задачи

Рассматривалась задача теплопереноса для неоднородной капли воды (с твердым включением), движущейся в среде высокотемпературных газов (постановка задачи аналогична условиям экспериментов [8]). Схема области решения задачи представлена на рис. 1.

Твердое включение — углеродистая частица с характерным размером r_1 (м). Внешний радиус неоднородной капли воды r_2 (м). Начальная температура капли с твердым включением T_0 (К). При движении капли в газовой среде происходит кондуктивный и радиационный теплообмен. При этом энергия высокотемпературных газов частично затрачивается на прогрев и испарение воды, а частично проводится водой к твердому включению, за счет чего углеродистая частица разогревается. Таким образом, подвод тепла к воде происходит в двух противоположных направлениях: от высокотемпературной газовой среды к центру неоднородной капли и от разогретого твердого включения в центре капли к ее внешней поверхности. Указанная особенность механизма нагрева капли воды приводит, с одной стороны, к свободному испарению жидкости в область газов, а с другой — к “взрывному” парообразованию в области контакта твердого включения с жидкой фазой.

В первом приближении решалась задача теплопереноса в одномерной осесимметричной постановке (см. рис. 1). Теплоотвод за счет испарения на границе раздела *твердая частица – вода* не учитывался.

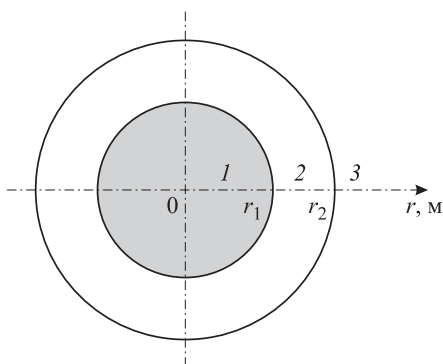


Рис. 1. Схема области решения: 1 — твердое включение; 2 — вода; 3 — высокотемпературная газовая среда

Математическая постановка задачи включала систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

- $r_1 < r < r_2$:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\partial H(r)}{\partial r}; \quad (1)$$

- $0 < r < r_1$:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right). \quad (2)$$

Начальные условия:

$$t = 0: \quad T_0 = 300 \text{ К}. \quad (3)$$

Граничные условия:

- $r = 0$:

$$\partial T / \partial r = 0; \quad (4)$$

- $r = r_1$:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - H(r_1); \quad (5)$$

- $r = r_2$:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = H_{rd} - Q_e W_e, \quad (6)$$

где c — теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ — плотность, кг/м³;

T — температура, К;

t — время, с;

λ — теплопроводность, Вт/(м·К);

$H(r)$ — плотность теплового потока, поступающего от высокотемпературных газов, Вт/м²;

$H(r_1)$ — плотность теплового потока на границе раздела *вода – высокотемпературные газы*, Вт/м²;

H_{rd} — плотность теплового потока на границе раздела *твердое включение – вода*;

Q_e — тепловой эффект испарения воды, Дж/кг;

W_e — массовая скорость испарения воды, кг/(м²·с);
индексы “1” и “2” соответствуют твердому включению и воде.

Плотность теплового потока определяется по формулам [9]:

- на границе раздела *твердое включение – вода*:

$$H_{rd} = \varepsilon_2 \sigma [(T_f)^4 - (T_{rd})^4]; \quad (7)$$

- на границе раздела *вода – высокотемпературные газы*:

$$H(r_1) = H_{rd} \exp[-\chi_2 (r_2 - r_1)], \quad (8)$$

где ε — степень черноты;

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

T_f — температура газовой среды, К;

T_{rd} — температура поверхности капли воды на границе раздела вода — высокотемпературная газовая среда, К;

χ_2 — коэффициент поглощения энергии водой.

Система нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных (1)–(6) решалась методом конечных разностей в сочетании с методом прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы [10]. При решении нелинейных уравнений использовался метод итераций [11]. Методика оценки достоверности результатов выполненных численных исследований, основанная на проверке консервативности применяемой разностной схемы, аналогична используемому в [12, 13].

Результаты и их обсуждение

Численные исследования выполнены при типичных значениях параметров: начальная температура неоднородной капли воды $T_0 = 300$ К; температура продуктов сгорания (газов) $T_f = 950\div 1500$ К; тепловой эффект испарения воды $Q_e = 2260$ Дж/кг. Скорость испарения воды в зависимости от температуры принималась в соответствии с экспериментальными данными [8]. Начальный внешний радиус неоднородной капли $r_d = (0,1\div 1,0)\cdot 10^{-3}$ м; размер твердого включения $r_1 = 0,5r_d$. Теплофизические характеристики воды, водяного пара, высокотемпературных газов и углеродистого твердого включения соответствуют данным, приведенным в [14–17].

При выполнении численных исследований варьировалась температура газовой среды, а также характерные размеры неоднородной капли воды. С помощью разработанной модели теплопереноса при взаимодействии капли воды с твердым включением и высокотемпературных газов было установлено, что в рассматриваемой системе возможны два режима фазовых превращений.

На рис. 2 и 3 представлены распределения температуры в неоднородной капле в разные моменты времени после начала движения в высокотемпературной среде, которые характерны для выявленных режимов испарения.

Рис. 2 иллюстрирует рост температуры в области контакта твердого включения с жидкостью, а также на поверхности неоднородной капли. Такое распределение температуры характерно для прогрева капли в двух направлениях: от внешней границы к центру и от центра к поверхности. Это, с одной стороны, приводит к испарению воды в зону высокотемпературных газов на внешней границе, а с другой — способствует “взрывному” парообразованию в области контакта жидкости с твердым включением.

Следует, однако, отметить, что режим “взрывного” парообразования установлен при температуре газовой среды $T_f \geq 1050$ К и радиусе капли

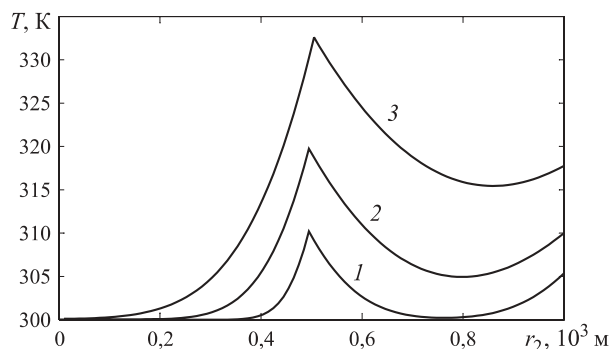


Рис. 2. Распределение температуры в неоднородной капле воды при $T_f = 1100$ К, $r_2 = 1\cdot 10^{-3}$ м: 1 — $t = 0,05$ с; 2 — $t = 0,2$ с; 3 — $t = 0,5$ с

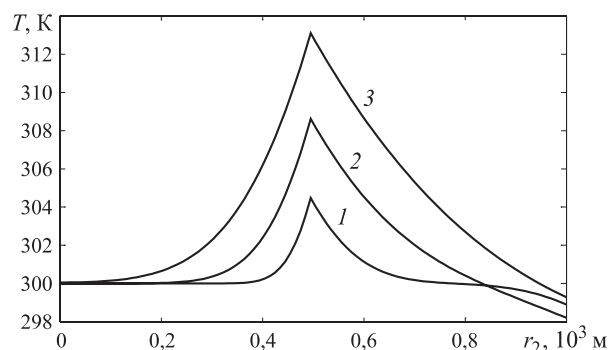


Рис. 3. Распределение температуры в неоднородной капле воды при $T_f = 900$ К, $r_2 = 1\cdot 10^{-3}$ м: 1 — $t = 0,05$ с; 2 — $t = 0,2$ с; 3 — $t = 0,5$ с

$r_2 \geq 0,3\cdot 10^{-3}$ м. При меньших значениях температуры газа или радиуса капли с твердым включением реализуется второй режим, при котором интенсивного парообразования в зоне соприкосновения твердой частицы с водой не происходит и жидкость испаряется преимущественно на внешней границе (см. рис. 3).

Сформулированные в результате численных исследований выводы о реализации второго режима фазовых превращений (см. рис. 3) в условиях относительно невысокой температуры газовой среды и малого характерного размера неоднородной капли хорошо согласуются с полученными ранее результатами экспериментов [8].

На рис. 4 приведены видеogramмы свободного падения неоднородных капель воды (с твердыми углеродистыми включениями) в среде высокотемпературных продуктов сгорания типичного жидкого топлива — керосина [8].

Следует отметить, что, несмотря на реализацию в ходе экспериментов режима испарения с внешней границы (без эффекта “взрывного” парообразования), результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о значительной интенсификации процесса испарения воды при наличии в



Рис. 4. Видеogramмы каплей воды ($r_2 = 3$ мм) с включениями углеродистых частиц на выходе из высокотемпературной газовой среды ($T_f = 1050$ К)

каплях твердых включений, что подтверждает целесообразность дальнейшего проведения численных и экспериментальных исследований тепло- и массопереноса при движении неоднородных капель жидкости в высокотемпературных газовых средах.

Закключение

В результате проведенных с использованием разработанной модели теплопереноса численных исследований фазовых превращений неоднородных капель воды (с твердыми включениями) при движении в высокотемпературной газовой среде была установлена возможность реализации двух режимов испарения: “взрывного” парообразования ($T_f \geq 1050$ К, $r_2 \geq 0,3 \cdot 10^{-3}$ м) и испарения с внешней границы капли ($T_f < 1050$ К, $r_2 < 0,3 \cdot 10^{-3}$ м). Полученные резуль-

таты хорошо согласуются с результатами проведенных ранее экспериментальных исследований испарения капель воды с примесями углеродистых частиц.

Разработанная модель позволит осуществлять исследования теплопереноса при испарении капель воды с твердыми включениями в широком диапазоне значений параметров системы *неоднородная капля воды – высокотемпературная газовая среда*. Это даст возможность сформулировать рекомендации для разработки новых и усовершенствования существующих технологий пожаротушения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Корольченко Д. А., Громоной В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 54–57.
3. Ковалев А. Н., Журавлева Л. А. Перспективные направления тушения низовых лесных и степных пожаров // Научная жизнь. — 2012. — № 4. — С. 153–157.
4. Соковиков 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.
5. Хасанов И. Р., Москвилн Е. А. Авиационные методы тушения крупных лесных пожаров // Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков : матер. XV науч.-практ. конф. — М. : ВНИИПО, 1999. — Ч. 1. — С. 300–301.
6. Wighus R. Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge // Proceedings of the International Water Mist Conference. — Vienna, 2001. — P. 1–26.
7. Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Численное исследование тепломассопереноса при движении “тандела” капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. — 2012. — Т. 4, № 12. — С. 531–538.
8. 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 Sciences. — 2015. — Vol. 88. — P. 193–200. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
9. Яворский Б. М. Справочник по физике. — М. : Наука, 1979. — 942 с.

10. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М. : Наука, 1983. — 616 с.
11. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М. : Наука, 1975. — 227 с.
12. 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. — Vol. 19, no. 2. — P. 85–93. doi: 10.1134/S1810232810020049.
13. 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. — Vol. 2014. — Art. ID 269321. — 9 p. doi: 10.1155/2014/269321.
14. Кнаке О., Странский И. Н. Механизм испарения // Успехи физических наук. — 1959. — Т. 68, № 2. — С. 261–305.
15. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М. : ООО “Старс”, 2006. — 720 с.
16. Теплотехнический справочник / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М. : Энергия, 1975. — Т. 1, 2.
17. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. — 301 с.

Материал поступил в редакцию 5 марта 2015 г.

English

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE LAWS OF THE “FLASH” WATER VAPORIZATION IN A FLAMING FIELD OF COMBUSTION

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

ABSTRACT

The physical and mathematical models of heat and mass transfer at the heating of a water droplet with carbonic inclusion in a high-temperature (more than 800 K) gas area in a flaming field of combustion are presented in the work. The physical and mathematical formulations of the heat and mass transfer problems under conditions of phase transformations are reduced. The methods of numerical solution of the set problem are described.

The numerical investigations for the wide range of parameters of the system “heterogeneous water droplet with a solid inclusion — high-temperature gas area” were conducted. Two modes of phase transformations were indicated in the concerned system: the mode of formation of “flash” vaporization centers in a field of the contact between solid inclusion and liquid (at a temperature of gas area $T_f \geq 1050$ K and a radius of heterogeneous droplet $r_2 \geq 0.3 \cdot 10^{-3}$ m) and the mode of liquid evaporation from the free droplet surface into the field of high-temperature gases (at $T_f < 1050$ K and $r_2 < 0.3 \cdot 10^{-3}$ m). The distributions of temperature corresponding to each of revealed modes of phase transformations were presented.

The comparison of numerical simulation results with the results of conducted before experimental investigations of evaporation of water droplets with solid inclusions during motions in a “flame” combustion field was carried out. A good agreement with the results of numerical calculation using the developed model and the results of experimental investigations was revealed.

Keywords: heterogeneous water droplet; solid inclusion; carbonic particle; high-temperature gas area; evaporation; “flash” vaporization.

REFERENCES

1. 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.
2. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Application of water mist for fire extinguishing in high-rise buildings]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 54–57.
3. Kovalev A. N., Zhuravleva L. A. Perspektivnyye napravleniya tusheniya nizovykh lesnykh i stepnykh pozharov [Promising directions of ground forest and steppe fires extinguishing]. *Nauchnaya zhizn — Scientific Life*, 2012, no. 4, pp. 153–157.
4. Sokovikov V. V., Tugov A. N., Grishin V. V., Kamyshev V. N. Avtomaticheskoye vodyanoye pozharotusheniye s primeneniym tonkoraspylennoy vody na elektrostantsiyakh [Automated water fire-fighting using the water mist on power plants]. *Energetik — Energy Man*, 2008, no. 6, pp. 37–38.
5. Khasanov I. R., Moskvilin E. A. Aviatsionnyye metody tusheniya krupnykh lesnykh pozharov [The aviation methods of a large forest fire fightings]. *Problemy goreniya i tusheniya pozharov na rubezhe vekov. Materialy XV nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The problems of combustion and fire fighting at the turn of the century. Materials of the XV research and practical conference]. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia Publ., 1999, part 1, pp. 300–301.
6. Wighus R. Water mist fire suppression technology — status and gaps in knowledge. *Proceedings of the International Water Mist Conference*. Vienna, 2001, pp. 1–26.
7. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Chislennoye issledovaniye teplomassoperenosa pri dvizhenii “tandema” kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Numerical investigation of heat and mass transfer when moving of the “tandem” of water droplets in high-temperature gas domain]. *Teplovyye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2012, vol. 4, no. 12, pp. 531–538.
8. 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 Sciences*, 2015, vol. 88, pp. 193–200. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.002.
9. Yavorskiy B. M. *Spravochnik po fizike* [Reference book of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 942 p.
10. Samarskiy A. A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference scheme]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
11. Kozdoba L. A. *Metody resheniya nelineynykh zadach teploprovodnosti* [Solution methods of nonlinear heat conduction problem]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 227 p.
12. 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, vol. 19, no. 2, pp. 85–93. doi: 10.1134/S1810232810020049.
13. 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, vol. 2014, art. ID 269321. 9 p. doi: 10.1155/2014/269321.
14. Knake O., Stranskiy I. N. Mekhanizm ispareniya [Evaporation mechanism]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Advances in Physical Sciences*, 1959, vol. 68, no. 2, pp. 261–305.
15. 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.
16. Yurenev V. N., Lebedev P. D. (eds.). *Teplotekhnicheskii spravochnik* [Heat engineering reference book]. Moscow, Energiya Publ., 1975. vol. 1, 2.
17. Kuznetsov G. V., Baranovskiy N. V. *Prognoz vozniknoveniya lesnykh pozharov i ikh ekologicheskikh posledstviy* [Prediction of forest fires and their ecological consequences]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 301 p.