

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

В.Ф. ПАНИН, М.В. ПИСКУНОВ, П.А. СТРИЖАК

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Выполнено экспериментальное исследование особенностей фазовых превращений неоднородных капель на основе воды с металлическими одиночными включениями (применены типичные для энергетических приложений металлы и сплавы). Установлены характерные времена полного испарения капель воды (начальные объемы 5–15 мкл). Определены соотношения энергии, подведенной к капле, аккумулированной водой и включением, и энергии, израсходованной на фазовый переход. Сформулированы рекомендации по использованию суспензий воды с металлическими включениями в системах охлаждения теплонагруженных поверхностей энергетического оборудования, а также высокотемпературных газовых и паровых потоков.

Ключевые слова: капля воды, металлическое включение, испарение, парообразование, высокотемпературные газы, условия охлаждения.

Введение

Гетерогенные газопарокапельные потоки нашли широкое применение [1–5] в большой группе приложений, например, теплоснабжение смесями на основе дымовых газов, паров и капель воды, очистка теплонагруженных поверхностей энергетического оборудования, размораживание сыпучих сред, полидисперсное пожаротушение, «огневая» очистка воды, эффективное охлаждение энергетического оборудования. Это стало возможным вследствие появления достоверной экспериментальной информационной базы [6–8] и сформулированной на ее основе фундаментальной теории [3] формирования газопарокапельных смесей.

До настоящего времени наименее изученными остаются процессы тепломассопереноса и фазовых превращений в гетерогенных газопарокапельных потоках с температурой более 800 К. Появление кросскорреляционных программно-аппаратных комплексов позволило получить [9–11] экспериментальные результаты исследований процессов испарения неоднородных (с различными мелкими включениями) капель воды при таких температурах газов. По результатам экспериментов выделены условия интенсификации испарения и даже взрывного разрушения неоднородных капель вследствие парообразования [11]. На основе полученных экспериментальных данных разработаны численные модели тепломассопереноса [12–14], с использованием которых сформулированы основные элементы технологии тушения пожаров гетерогенными капельными суспензионными потоками на основе воды.

При проведении экспериментальных исследований [9–14] использованы неметаллические включения. Представляет интерес проведение соответствующих экспериментов с неоднородными каплями воды на основе металлических включений. Это позволит определить перспективы использования гетерогенных капельных сред с указанными включениями для охлаждения теплонагруженных поверхностей. В работах [15, 16] данное направление выделено как определяющее, особенно для атомной промышленности, где важно максимально быстро охладить, например, поверхность

реактора (температуры могут достигать 1200–1400K и более). Для разработки технологий охлаждения таких устройств необходимы результаты фундаментальных исследований теплообмена металлических включений с водой и охлаждаемой поверхностью (средой). В первом приближении для проведения указанных экспериментов можно использовать стенд [11] с неоднородными каплями, нагреваемыми в потоке высокотемпературных газов.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование процессов испарения неоднородных капель воды с металлическими одиночными включениями в среде высокотемпературных (более 800 K) газов.

Экспериментальный стенд и методы исследований

Применялся экспериментальный стенд (рис. 1), по основным компонентам (регистрирующая аппаратура, тепловая экспериментальная зона, объект исследований) аналогичный использованному в опытах [11].

Исследования проводились с закрепленными на керамическом стержне неоднородными каплями жидкости (рис. 1). В исследовании [11] рассмотрены различные варианты формирования неоднородных капель жидкости (положения включений), выбранные на основании предварительных экспериментов с движущимися неоднородными каплями воды через высокотемпературную газовую среду. В настоящей работе процессы фазовых превращений неоднородных капель жидкости исследуются на примере одного варианта внутренней структуры капли (рис. 1). Необходимо отметить обязательное условие проведения каждого эксперимента – полное обволакивание металлического включения каплей воды (рис. 1).

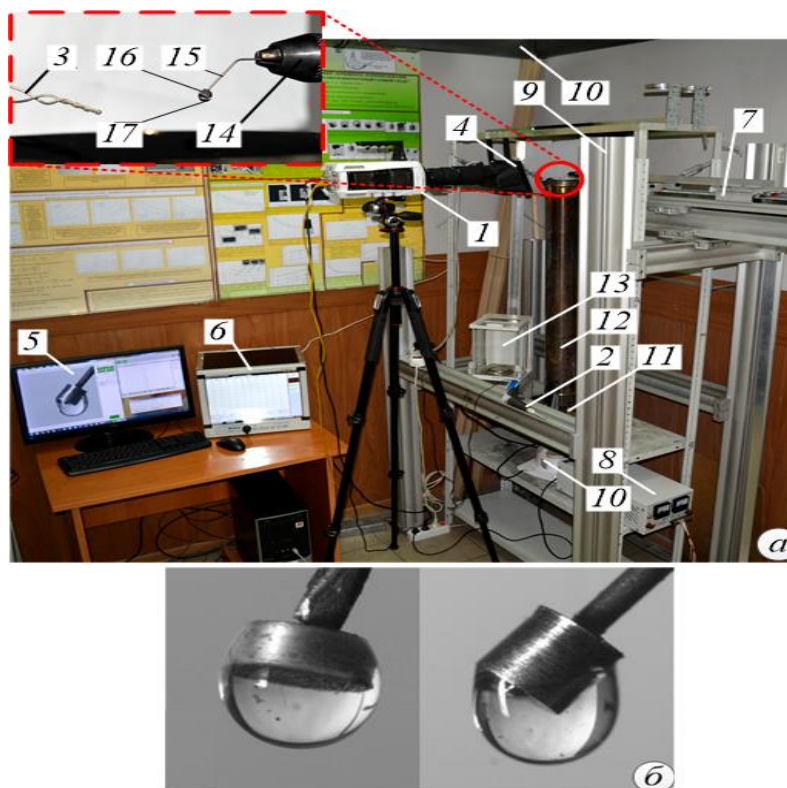


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда (а) и неоднородных капель с металлическими включениями (б)

Капля генерировалась электронным дозатором и помещалась на металлическое включение в форме цилиндрического диска (при такой конфигурации обеспечивалось полное обволакивание частицы [11]). Последнее с использованием специализированного крепления предварительно фиксировалось на координатном механизме, который перемещал неоднородную каплю в цилиндр из кварцевого стекла, заполненный высокотемпературными газами (продуктами сгорания). Температура газовой среды в цилиндре поддерживалась около 850 К (измерения проводились хромель-алюмелевой термопарой с погрешностью ± 10 К и диапазоном измерения 223–1473 К).

Для генерации газов (продуктов сгорания) использовалась горелка и технический спирт. Горение технического спирта (начальный объем 60 мл) продолжалось около 300 с. Данного времени достаточно для проведения одной серии из 5–7 опытов в зависимости от параметров неоднородной капли жидкости (масса капли воды, размер включения, марка металла). Продукты сгорания технического спирта имели следующий компонентный состав: CO_2 – 4,433 %, CO – 0,058 %, O_2 – 14,907 %, NO – 0,002 %, NO_x – 0,002 %, другие углеводородные компоненты – 80,598 %. Для измерения содержания компонентов продуктов сгорания применялся газоанализатор *Testo 300XXL* (погрешность измерения CO : ± 5 %, O_2 : $\pm 0,2$ %, NO : ± 5 %, NO_x : ± 5 %; содержание CO_2 и других углеводородных компонентов являются для указанной модели газоанализатора расчетными значениями). Скорость движения продуктов сгорания поддерживалась 1,5–2 м/с (измерения скоростей проводились с использованием панорамных оптических методов аналогично [11]).

Методика проведения экспериментов:

1. Инициировалось зажигание спирта в горелке, формировался поток продуктов сгорания с контролируемой температурой около 850 К.

2. Закрепленная на керамическом стержне капля воды объемом 5, 10 или 15 мкл с металлическим включением (размер 1 или 2 мм) подавалась в область, заполненную высокотемпературными газами.

3. Первый оператор экспериментального стенда перед размещением системы неоднородная капля/керамический стержень в области видеосъемки активировал процесс высокоскоростной видеорегистрации. При появлении рассматриваемой системы в области видеозахвата регистрировалось начальное время процесса испарения неоднородной капли жидкости τ_{h0} .

4. Второй оператор экспериментального стенда между опытами выполнял охлаждение металлической частицы (включения) и формирование неоднородной капли заданной массы. Сформированная неоднородная капля жидкости снова помещалась в газовую среду.

5. Затем по отснятому видеоматериалу проводили анализ времени существования (полного испарения) неоднородных капель воды τ_h в высокотемпературной газовой среде.

Для каждой из конфигураций неоднородной капли жидкости проводились 3 серии экспериментов по 5–7 опытов при идентичных условиях (размерах металлических включений, начальных массах капель воды, температурах продуктов сгорания и скоростях их движения).

По зарегистрированным временам начала испарения неоднородной капли жидкости τ_{h0} и с учетом выявленных на видеограммах продолжительностей процессов испарения с использованием записей многоканального технологического регистратора, фиксировавшего показания термопар, определялись соответствующие диапазоны изменения температуры газовой среды T_g .

Максимальная погрешность вычисления времен существования (полного испарения) неоднородных капель жидкости с учетом частоты видеорегистрации (400–600 кадров в секунду) составила 0,01 с. Систематические погрешности измерения размеров неоднородных капель жидкости не превышали 0,05 мм. Случайные погрешности определения основных параметров рассматриваемой системы (температура газовой среды T_g и времена существования неоднородных капель жидкости τ_h) не превышали 12 %.

Результаты и обсуждение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить, что, в отличие от капель с неметаллическими включениями [11], в настоящей работе интенсивное испарение воды происходило со свободной (внешней поверхности) капли. Процесс формирования пузырьков пара на поверхности включения, доминирующий в экспериментах [11], не был определяющим в проведенных опытах. Такое отличие обусловлено, скорее всего, высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью графитовых включений по сравнению с исследованными металлами и сплавами. У поверхности графита аккумулировалась достаточно большая доля энергии, подведенной от внешней газовой среды. За счет относительно небольшой теплопроводности включения лишь небольшое количество энергии проходило вглубь частицы. За счет высоких показателей отражения лучистая составляющая подведенной энергии также фокусировалась вблизи внутренней границы раздела сред (у поверхности включения). Как следствие, в экспериментах с неметаллическими включениями [11] интенсивно зарождались, росли и объединялись пузырьки пара. При высоких (более 800 К) температурах эти процессы даже сопровождалось интенсивным «взрывным» разрушением поверхности капли. При этом выделены [11] несколько режимов реализации таких процессов.

В проведенных экспериментах с металлическими включениями процессы испарения протекали без «взрывного» разрушения поверхности пленки воды вокруг включения даже при высоких температурах. Регистрировалось практически монотонное уменьшение размеров (соответственно и объема) капель при нагревании. В экспериментах с малыми объемами жидкости регистрировались процессы зарождения пузырьков на поверхности включений. Однако и число пузырьков, и динамика их роста были существенно ниже, чем в опытах [11]. Благодаря высокой теплопроводности материалов металлических включений последние прогревались и через определенный интервал времени подвели дополнительную энергию к поверхности испаряющейся капли. Как следствие, времена полного испарения капель воды на включениях из металлов и их сплавов были существенно ниже, чем в экспериментах с графитовыми включениями [11].

На рис. 2 показаны характерные времена полного испарения воды при разных размерах и материалах металлических включений. В проведенных экспериментах не удалось установить строгого соответствия между скоростью испарения воды и теплофизическими свойствами металлического включения, т.е. испарение воды проходило с сопоставимой скоростью для металлов с существенно отличающейся температуропроводностью. Однако в общем можно выделить закономерность, при которой процесс испарения воды проходил с минимальными временами при максимальной температуропроводности материалов включений.

На основании расчета количества теплоты, подводимого к системе «металлическое включение – вода» можно утверждать, что доля аккумулированного металлическим включением тепла является незначительной по сравнению с количеством теплоты, требуемым для парообразования воды (теплота испарения ≈ 2 МДж/кг).

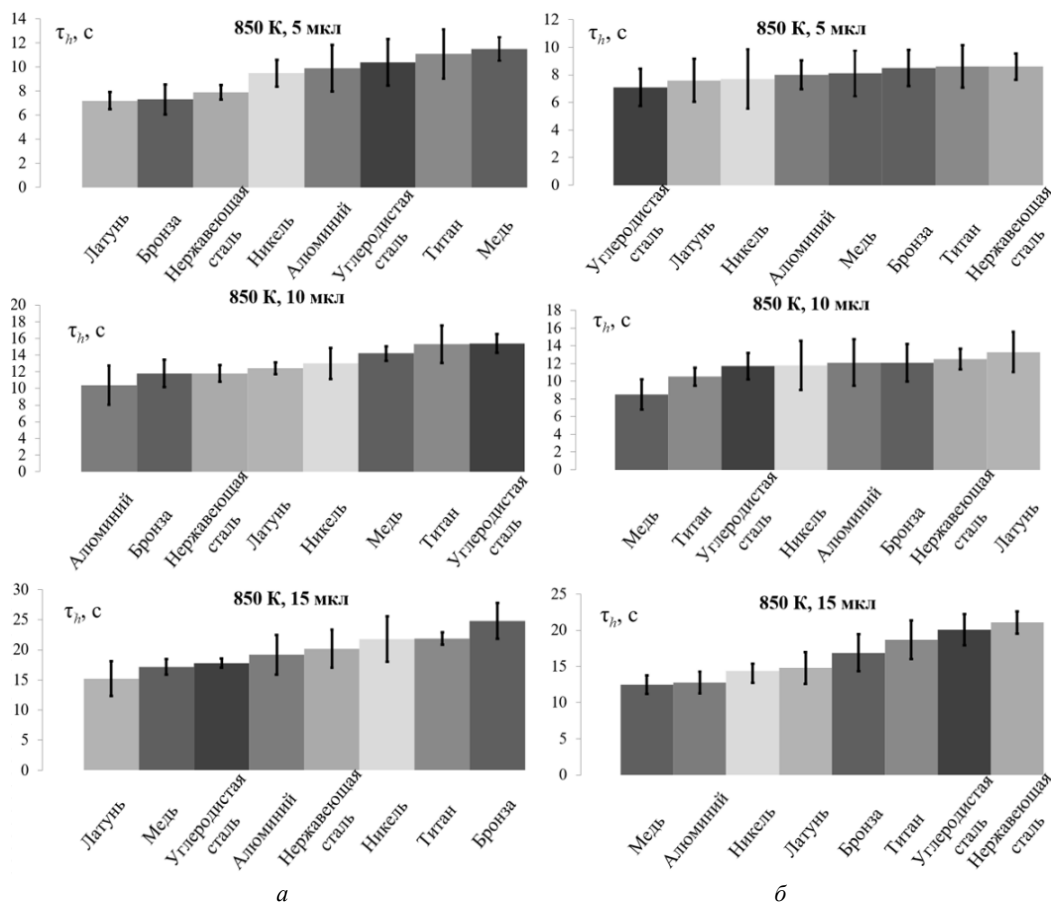


Рис. 2. Времена полного испарения капель воды с металлическими включениями размером 1 мм (а) и 2 мм (б)

На рис. 3 показаны результаты расчета общего количества теплоты, подведенной к рассматриваемым неоднородным каплям воды в зависимости от используемого материала включения. Теплота парообразования воды при температуре около 373 К заметно превышает энергию, расходуемую на прогрев воды и металла, и является практически постоянной величиной. Более того, среди трех составляющих общей подведенной теплоты только количество энергии, аккумулированной металлическим включением, изменяется в зависимости от свойств материала включения. Как следует из выражения $Q_{in} = c_p m_{in} \Delta T$ (где c_p – удельная теплоемкость металлического включения, Дж/кг·К; m_{in} – масса металлического включения, кг; $\Delta T = T_2 - T_1$, T_2 – температура кипения воды, К, T_1 – начальная температура гетерогенной капли, К), для расчета теплоты, аккумулированной металлическим включением Q_{in} , переменными являются удельные теплоемкости c_p и массы металлов m_{in} . По относительной доле энергии, расходуемой на испарение, можно сделать вывод о возможности применения большой группы материалов включений при интенсификации испарения.

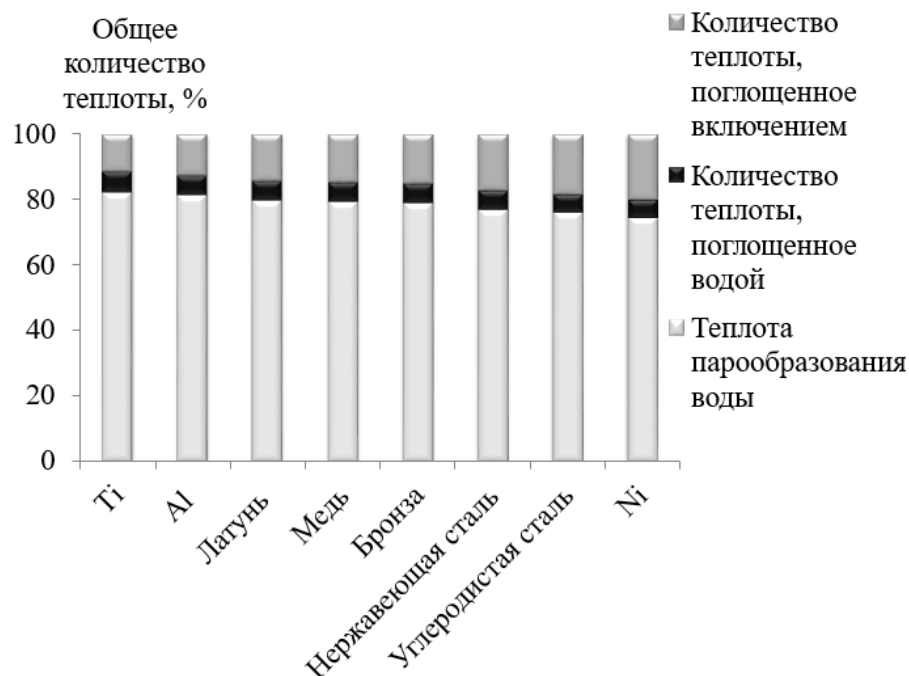


Рис. 3. Соотношение энергий в системе металлическое включение – капля воды при температуре газовой среды 850 К и объеме капли воды 5 мкл

Важно отметить, что для гетерогенных капель характерны условия, при которых с газовой средой контактирует не только пленка жидкости, но и включение. В работе [11] рассмотрены выделенные схемы. В проведенных опытах также были проведены такие исследования. Выделены достаточно существенно отличающиеся времена полного испарения жидкости и разные режимы существования капли (при контакте включения с газом и без него). Первый режим испарения (без контакта металла с газовой средой) характеризуется полным обволакиванием металлического включения каплями воды в течение всего процесса испарения (времени τ_h). Целостность пленки жидкости вокруг металлического включения сохраняется практически до завершения фазового перехода. Фронт испаряющейся пленки жидкости чаще всего продвигается сверху вниз по высоте включения. Как показали видеogramмы экспериментов, время существования фронта испарения на включении в таких случаях составляет 1–2 с. Рассматриваемый механизм подразумевает нагрев включения за счет передачи тепла через неравномерный слой воды вокруг металлического включения. Нагретое включение передает теплоту обратно в слой воды, но количества этой энергии недостаточно для парообразования на границе раздела сред металл/вода. Поэтому при реализации первого режима зарегистрировано только испарение воды с внешней поверхности капли.

Второй режим теплообмена в системе металлическое включение/слой воды характеризуется испарением пленки жидкости на поверхности включения (т.е. внутренней границе раздела сред) на начальной стадии нагрева гетерогенной капли жидкости. В этом случае в процессе нагрева энергия аккумулируется не только слоем воды, но и включением. Процесс испарения протекает интенсивнее и характеризуется меньшими временами существования капель.

Выделенные результаты показывают, что поток гетерогенных капель может быть использован как слой, хорошо поглощающий энергию. Наличие в таком потоке

металлических включений интенсифицирует эндотермические фазовые превращения за довольно короткий интервал времени. Данные превращения позволяют отводить довольно большую долю теплоты с высокой скоростью. Такой подход к интенсификации процесса испарения может, в качестве одного из основных, иметь приложение в системах охлаждения теплонагруженных поверхностей энергетических установок и соответствующих газопарокапельных сред. В частности, для атомных реакторов актуальной задачей является быстрый отвод тепла. При создании гетерогенного слоя из выделенных неоднородных капель и его непрерывном перемешивании возможно отводить существенную долю энергии от охлаждаемых поверхностей и сред за счет фазовых превращений (рис. 3).

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что процесс испарения капель воды с металлическими включениями является совокупностью сложных процессов теплопереноса. В отличие от графитовых включений [11], для частиц металлов и сплавов определяющую роль играет испарение со свободной поверхности капли (на внутренних границах раздела сред формирование пузырьков происходило достаточно умеренно). При этом в экспериментах зарегистрированы существенно меньшие времена полного испарения капель воды с металлическими включениями относительно капель с частицами графита. Установлено, что в случае введения в состав капель включений интенсифицируется парообразование с довольно существенным расходом энергии внешней среды на фазовый переход. В зависимости от соотношения размеров включения и капли (соответственно, их масс) и площадей их поверхности фазовые переходы могут реализовываться за достаточно малые времена. Выделенный эффект целесообразно использовать для интенсивного охлаждения теплонагруженных поверхностей энергетических установок и соответствующих газопарокапельных сред. Кроме того, результаты выполненных в настоящей работе экспериментов и данные опытов [11] также могут быть использованы при разработке технологий тушения пожаров гетерогенными парокапельными потоками.

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

Summary

We perform the experimental research on particularities of phase changes of heterogeneous droplets based on water with single metallic inclusions. We applied the metals and alloys which are typical of power engineering. Moreover, the lifetimes of 5–15 μ l water droplets were determined. We also established the estimated proportion of phase change energies (vaporization) as well as those absorbed by water and metallic inclusions. Finally, we formulated the recommendations how to use the suspensions of water with metallic inclusions in cooling systems of hot surfaces of power engineering equipment, as well as high-temperature gas-vapor flows.

Keywords: water droplet, metallic inclusion, evaporation, vaporization, high-temperature gases, cooling conditions.

Литература

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Москва: Наука, 1987.
 2. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421.
 3. Терехов В.И., Пахомов М.А. Теплоперенос и гидродинамика в газопарокапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.
- © Проблемы энергетики, 2016, № 1-2

4. 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.
5. 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.
6. Никитин М.Н. Влияние направленного впрыска воды в теплогенераторе на давление получаемой парогазовой смеси // Промышленная энергетика. 2010. № 6. С. 42–46.
7. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность. 2011. № 11. С. 54–57.
8. Flock A.K., Guildenbecher D.R., Chen J., Sojka P.E., Bauer H.J. Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops // International journal of multiphase flow. 2012. V. 47. P. 37–49.
9. Волков Р.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.
10. Антонов Д.В., Волков Р.С., Пискунов М.В., Стрижак П.А. Испарение капли воды с твердым непрозрачным включением при движении через высокотемпературную газовую среду // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 5. С. 49–56.
11. Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. V. 92. P. 360–369.
12. Пискунов М.В., Стрижак П.А., Щербинина А.А. Особенности испарения капель воды с твердым включением в потоке высокотемпературных газов // Ползуновский вестник. 2015. № 3. С. 81–86.
13. Высокоморная О.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А. Условия интенсивного испарения неоднородной капли воды в высокотемпературной газовой среде // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 5–6. С. 53–59.
14. Volkov R.S., Piskunov M.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Water Droplet With Carbon Particles Moving Through High Temperature Gases // Journal of Heat Transfer. 2016. V. 138, № 1. 014502. P. 1–5.
15. Hsu S.-H., Ho Y.-H., Ho M.-X., Wang J.-C., Pan C. On the Formation of Vapor Film During Quenching in De-Ionized Water and Elimination of Film Boiling During Quenching in Natural Sea Water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. V. 86. P. 65–71.
16. Fu B.-R., Ho Y.-H., Ho M.-X., Pan C. Quenching characteristics of a continuously-heated rod in natural sea water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. V. 95. P. 206–213.

Поступила в редакцию

3 февраля 2016 г.

Панин Владимир Филиппович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности» Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ). Тел: 8(3822)701-777, доп. 1917.

Пискунов Максим Владимирович – аспирант кафедры «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ).

Стрижак Павел Александрович – профессор, д-р физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ). Тел: 8(3822)701-777, доп. 1910, 8(903)9134829.