

УДК 536.24

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-4-469-477

**ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО ИСПАРЕНИЯ ПОЛУСФЕРОИДАЛЬНЫХ
КАПЕЛЬ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ****ESTIMATION OF TIME OF SEMISPHEROID COMPLETE EVAPORATION
FOR DROPS OF AQUEOUS SOLUTIONS OF SALTS AT HIGH TEMPERATURE
HORIZONTAL SURFACE****В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев, А.С. Шипулина
V.Y. Gubarev, A.G. Arzamastsev, A.S. Shipulina**Липецкий государственный технический университет,
Россия, 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30

Lipetsk state technical University, 30 Moskovskaya St, Lipetsk, Russia

E-mail: adelino4ka@inbox.ru

Аннотация

В статье предложен вид аналитической зависимости времени полного испарения полусфероидальной капли водного раствора соли на высокотемпературной горизонтальной поверхности от начальной концентрации соли с точностью до коэффициента, который может являться функцией начального объема капли и температуры поверхности. На основе экспериментов для растворов солей NaCl и CaCl₂ определены значения данного коэффициента. Проведен факторный анализ, выявивший незначительное влияние начального объема и температуры поверхности на данный коэффициент, величина которого зависит только от типа соли. Проведен регрессионный анализ, показавший хорошее согласование экспериментальных данных и полученных зависимостей по определению времени полного испарения капель водных растворов солей.

Abstract

The article based on the analysis of the available literature identifies the fact that drops of salt solutions evaporate faster than drops of distilled water, while the salt concentration increase reduces time of evaporation. The relevance of the study is determined by the absence of data on complete evaporation time of the drop conditional on the initial salt concentration. The article proposes a form of analytical dependence of the full evaporation time on the initial salt concentration for a semispherical drop of an aqueous salt solution placed on a high-temperature horizontal surface to the nearest coefficient, which can be a function of the initial volume of the drop and the surface temperature. The coefficient values for solutions of NaCl and CaCl₂ salts are determined by experimentation. The factor analysis has been conducted and insignificance of initial volume and surface temperature for this coefficient value is obtained. The coefficient value depends only on salt type. The regression analysis showed a good harmonization for experimental data and the obtained dependences which determine the time of complete evaporation for drops of aqueous salt solutions.

Ключевые слова: высокотемпературная поверхность, время полного испарения, начальная концентрация соли.

Keywords: high temperature surface, the time of complete evaporation, the initial concentration of salt.

Введение

Охлаждение высокотемпературной поверхности (температура которой выше температуры Лейденфроста) струями диспергированной жидкости находит широкое применение в металлургии и энергетике. При относительно малых значениях плотности орошения и скорости струи происходит гравитационное осаждение отдельных капель жидкости на нагретой поверхности. Тепловой эффект в этом случае определяется как сумма теплосъема отдельных капель. Основным параметром, определяющим интенсивность теплоотвода, является время полного испарения капли, которое в свою очередь зависит от значений температуры поверхности и начального объема капли.

Исследованию процесса теплообмена при испарении капли дистиллированной воды на высокотемпературной поверхности посвящены работы [1–9]. В данных работах предложена методика для расчета времени испарения капли и показано совпадение полученных зависимостей с экспериментальными данными.

Однако при наличии в капле солей полученные для дистиллированной воды зависимости [5–6] дают завышенное время испарения.

В работах [10–20] на основании проведенных экспериментов выявлено, что увеличение концентрации соли приводит к уменьшению времени полного испарения капли. Недостатком данных работ, посвященных испарению капель водных растворов солей, является отсутствие зависимости по определению времени полного испарения капли от начальной концентрации соли.

Целью данной статьи является получение зависимости времени полного испарения капли водного раствора на высокотемпературной горизонтальной поверхности от начальной концентрации соли с точностью до определяемого эмпирическим путем поправочного коэффициента и анализ влияния различных параметров на величину данного коэффициента.

Оценка времени испарения капли водного раствора соли

При гравитационном взаимодействии одиночной капли и высоконагретой поверхности, температура которой выше температуры Лейденфроста, полностью исключен непосредственный контакт охлаждаемой поверхности с испаряющейся каплей. В этом случае процесс испарения капли можно разделить на 2 неравномерные стадии: практически мгновенное формирование парового зазора под каплей и последующее испарение капли, отделенной от стенки паровым слоем. Температура Лейденфроста для капель воды составляет 300–350°C [5].

В работе [5] приведена методика расчета времени испарения полусфероидальной капли при взаимодействии с высокотемпературной поверхностью. Показано, что относительно небольшие капли (до 0,8 мл) принимают полусфероидальную форму. Все переданное капле от стенки тепло расходуется на испарение капли, а образовавшийся пар поступает в паровой зазор. Показано, что тепло от стенки к капле передается теплопроводностью через паровой слой, поэтому его толщина является основным фактором при определении интенсивности теплоподвода. Тепловые потоки излучением и за счет диффузионного испарения с поверхности капли в окружающую среду существенно ниже теплового потока теплопроводностью через паровой слой, поэтому их значениями при расчетах можно пренебречь. На основании аналитического решения дифференциального уравнения Навье-Стокса для ламинарного течения пара в зазоре получено распределение давления пара в паровом слое по радиальной координате. Основным условием поддержания капли на паровом слое является равенство веса капли силе давления пара. На основании равенства данных сил получена аналитическая зависимость для определения толщины парового слоя.

С учетом зависимости для расчета толщины парового слоя из уравнения теплового баланса найдено выражение для определения изменения радиуса капли с течением времени:

$$\frac{dR_k}{d\tau} = \frac{A}{R_k^{0,25}},$$

где $A = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{п}} \cdot \Delta T}{r \cdot \rho_{\text{ж}}} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}}} \right)^{0,25}$; $\lambda_{\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности пара, Вт/(м·К); ΔT – разность температуры стенки и температуры насыщения при атмосферном давлении, °С; r – теплота парообразования, Дж/кг; $\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{п}}$ – плотности воды и пара соответственно, кг/м³; R_k – текущий радиус капли, м; $\mu_{\text{п}}$ – динамическая вязкость пара, Па·с, τ – время с начала процесса испарения, с.

На основании выражения для изменения радиуса капли с течением времени получена аналитическая зависимость по определению времени испарения для полусфероидальных капель дистиллированной воды на высокотемпературной поверхности:

$$\tau = \frac{R_{k,0}^{1,25} - R_k^{1,25}}{1,25 \cdot A}, \quad (1)$$

где $R_{k,0}$ – начальный радиус капли, м;

В работах [10–20] рассмотрено испарение водяных капель различных растворов солей. Выявлено, что с ростом концентрации соли уменьшается время полного испарения капли. Показано, что первые кристаллы соли появляются на нижнем основании капли при величине среднемассовой концентрации соли меньшей, чем концентрация насыщения, что объясняется неравномерностью распределения концентрации соли внутри капли. При появлении кристаллов соли вес капли превышает силу давления пара, что приводит к касанию капель высоконагретой поверхности. Дальнейшее поведение капли сильно зависит от типа соли. Для соли NaCl касания с последующим выбросом соли и установлением временного равновесия сил до появления новых кристаллов соли будут происходить до полного испарения капли и образования сухого остатка. Для соли CaCl₂ после определенного количества касаний наблюдается разбрызгивание капли на мелкие части. Дополнительной сложностью при расчете скорости испарения капли водного раствора солей является неравномерность роста кристаллов соли в продольном и поперечном направлении.

Указанные выше причины серьезно затрудняют точный расчет локальных характеристик теплоотвода. Поэтому представляется обоснованным, взяв за основу формулу (1) для расчета времени испарения капли дистиллированной воды, получить расчетную зависимость по определению полного времени испарения капли водного раствора в зависимости от концентрации соли с точностью до введенного коэффициента; получить на основе обработки экспериментальных данных значение этого коэффициента и провести анализ влияния параметров процесса на его величину.

Расчет времени полного испарения капли может быть условно разбит на 2 стадии. Продолжительность первой стадии ограничивается появлением на нижнем основании капли кристаллов соли, что позволяет использовать для расчета времени испарения зависимости для испарения капли дистиллированной воды.

Введем безразмерное время испарения капли до начала процесса кристаллизации, равное отношению рассматриваемого отрезка времени испарения ко времени полного испарения капли дистиллированной воды при одинаковых значениях начального объема и температуры охлаждаемой поверхности:

$$\bar{\tau}_{\text{до кр.}} = \frac{\tau_{\text{до кр.}}}{\tau_{\Sigma}^{\text{дист}}},$$

где $\tau_{\Sigma}^{\text{дист}}$ – полное время испарения капли дистиллированной воды, с; $\tau_{\text{до кр.}}$ – время испарения капли до начала процесса кристаллизации, с.

С учетом (1), безразмерное время испарения капли до начала кристаллизации равно:

$$\bar{\tau}_{\text{до кр.}} = 1 - \left(\frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{к.0}}} \right)^{1.25} = 1 - \left(\frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{к.0}}} \right)^{\frac{5}{12}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{к}}, m_{\text{к.0}}$ – текущая и начальная массы капли соответственно, кг.

В процессе испарения масса соли остается постоянной, что приводит к увеличению концентрации соли за счет испарения воды.

Текущая концентрация соли находится по формуле:

$$c = \frac{m_{\text{С}}}{m_{\text{С}} + m_{\text{В}}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{С}}, m_{\text{В}}$ – массы соли и воды соответственно, кг.

Так как плотность соли несущественно отличается от плотности воды, примем, что одинаковые по массе капли дистиллированной воды и раствора соли имеют одинаковый объем.

С учетом (2) – (3), безразмерное время испарения капли до начала процесса кристаллизации можно рассчитать по формуле:

$$\bar{\tau}_{\text{до кр.}} = 1 - \left(\frac{c_0}{c_{\text{нач.кр.}}} \right)^{\frac{5}{12}}, \quad (4)$$

где $c_0, c_{\text{нач.кр.}}$ – начальная концентрация и концентрация соли в начале процесса кристаллизации, %.

Введем коэффициент неравномерности распределения концентрации:

$$k_{\text{с}} = \left(\frac{c_{\text{нас}}}{c_{\text{нач.кр.}}} \right)^{\frac{5}{12}}, \quad (5)$$

где $c_{\text{нас}}$ – концентрация насыщения, %.

Согласно [10], коэффициент $k_{\text{с}}$ больше 1, что объясняется повышенной концентрацией соли у нижнего основания капли.

С учетом (5), выражение (4) можно преобразовать:

$$\bar{\tau}_{\text{до кр.}} = 1 - k_{\text{с}} \cdot \left(\frac{c_0}{c_{\text{нас}}} \right)^{\frac{5}{12}}.$$

Теоретическое безразмерное время испарения капли после появления кристаллов соли составляет:

$$\bar{\tau}_{\text{кр.теор}} = \left(\frac{c_0}{c_{\text{нач.кр.}}} \right)^{\frac{5}{12}}.$$

Действительное безразмерное время испарения капли после появления кристаллов соли представим как:

$$\bar{\tau}_{\text{кр.}} = k_{\text{кр.}} \cdot \left(\frac{c_0}{c_{\text{нач.кр.}}} \right)^{\frac{5}{12}},$$

где $k_{\text{кр.}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние процесса кристаллизации на величину времени испарения.

Согласно данным из [10], коэффициент $k_{\text{кр.}}$ всегда меньше 1, то есть появление кристаллов соли приводит к интенсификации процессов испарения.

Тогда полное безразмерное время испарения капли можно представить как:

$$\bar{\tau}_{\Sigma} = \bar{\tau}_{\text{докр.}} + \bar{\tau}_{\text{кр.}} = 1 - k_c \cdot \left(\frac{c_0}{c_{\text{нас}}} \right)^{\frac{5}{12}} \cdot (1 - k_{\text{кр.}}). \quad (6)$$

Введем коэффициент:

$$k_{\Sigma} = k_c \cdot (1 - k_{\text{кр.}}).$$

Коэффициент k_{Σ} является обобщающим коэффициентом, учитывающим влияние различных факторов на полное время испарения капли.

Тогда уравнение (6) можно записать как:

$$\bar{\tau} = 1 - k_{\Sigma} \cdot \left(\frac{c_0}{c_{\text{нас}}} \right)^{\frac{5}{12}} \quad (7)$$

Зависимость (7) можно использовать в качестве аппроксимационной при обработке экспериментальных данных по испарению капли водного раствора соли с различными значениями начальной концентрации. Для разных типов солей значение коэффициента k_{Σ} можно определить на основе обработки экспериментальных данных, полученных при испарении капель раствора соли с различными значениями начальной концентрации.

Проверка зависимости по определению времени полного испарения на основе экспериментальных данных

Для проведения экспериментов были использованы капли водяных растворов солей NaCl и CaCl₂. Соль NaCl образует при кристаллизации безводные кристаллы, соль CaCl₂ – кристаллогидраты. Концентрация насыщения при температуре насыщения воды для атмосферного давления для NaCl составляет 28 %, а для CaCl₂ равна 60 %.

Экспериментальная установка представляет собой диск из жаростойкой стали диаметром 150 мм и толщиной 6 мм с электрическим нагревом. Эксперименты проводились в диапазоне температуры поверхности 400–550 °С с шагом по температуре 50 °С. Начальные объемы капель составляли 0,5, 0,6 и 0,7 мл. Для каждого значения объема и температуры поверхности измерено время полного испарения капли дистиллированной воды.

Концентрация соли изменялась в пределах от 1 до 10 % с шагом 1 %. Конечной точкой испарения принимался момент времени, когда на поверхности оставался только сухой остаток.

По полученным экспериментальным данным для каждого типа солей проведен факторный анализ влияния температуры поверхности и начального объема капли на поправочный коэффициент. В ходе проведения анализа для каждого значения температуры и начального объема находился методом наименьших квадратов суммарный поправочный коэффициент k_{Σ} . Принималась гипотеза о независимости данного коэффициента от величин температуры поверхности и начального объема капли при

уровне значимости 99 %. Сравнение рассчитанных для каждого рассмотренного фактора критерия Фишера-Снедекора с табличными значениями позволило принять при заданном уровне значимости гипотезу об отсутствии влияния температуры поверхности и начального объема капли на поправочный коэффициент k_{Σ} .

На основании экспериментальных данных для каждого типа солей при использовании в качестве регрессионной зависимости уравнения (7) были получены эмпирические зависимости для определения полного времени испарения:

для капли водного раствора NaCl:

$$\bar{\tau} = 1 - 0,59 \cdot \left(\frac{c_0}{c_{\text{нас}}} \right)^{\frac{5}{12}}, \quad (8)$$

для капли водного раствора CaCl₂:

$$\bar{\tau} = 1 - 0,51 \cdot \left(\frac{c_0}{c_{\text{нас}}} \right)^{\frac{5}{12}}. \quad (9)$$

На рисунках 1–2 приведены графики зависимости времени полного испарения капель водных растворов NaCl и CaCl₂ от начальной концентрации соли при начальном объеме капель 0,5 мл и температуре поверхности 450 °С.

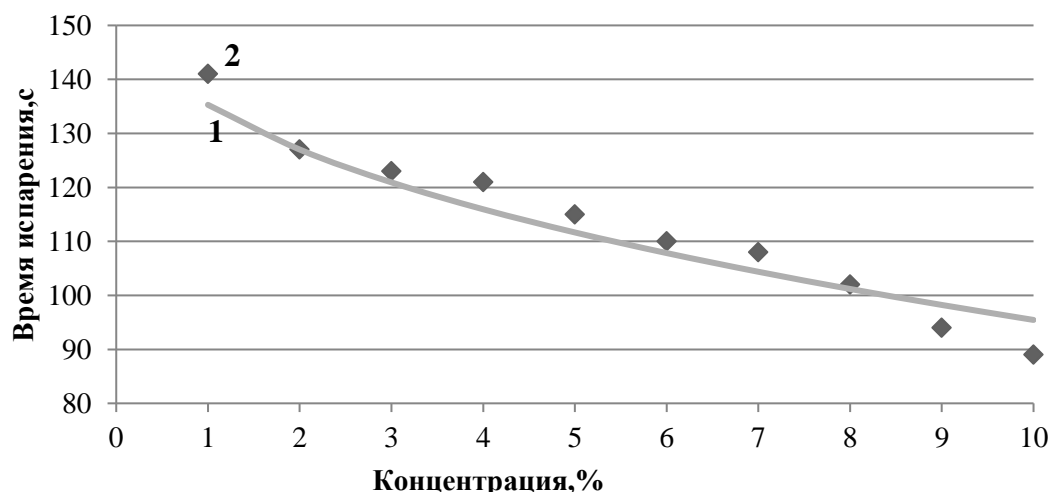


Рис. 1. Зависимость времени полного испарения капли водного раствора NaCl от начальной концентрации соли: 1 – аппроксимационная зависимость; 2 – экспериментальные данные

Fig. 1. Dependence of the time of complete evaporation of a drop of aqueous solution of NaCl on the initial salt concentration: 1 – approximation dependence; 2 – experimental data

Проведен регрессионный анализ, показавший, что коэффициенты детерминации для расчета безразмерного времени испарения солей NaCl и CaCl₂ составляют 0,94 и 0,89 соответственно, что позволяет сделать вывод о достаточно высокой согласованности рассчитанного по зависимостям (8) и (9) времени полного испарения капли с полученными по экспериментальным данным значениями.

Заключение

В статье предложен подход к определению времени полного испарения полусфероидальной капли раствора соли на высокотемпературной горизонтальной поверхности, заключающийся в разбивке времени полного испарения капли на две стадии: стадию испарения капли до появления первых кристаллов соли на нижнем

основании капли и стадию испарения капли при появлении кристаллов соли. На основании анализа имеющихся зависимостей по определению времени испарения капли дистиллированной воды, предложен вид зависимости по расчету времени полного испарения полусфероидальной капли раствора соли на высокотемпературной поверхности от начальной концентрации соли с точностью до поправочного коэффициента. Проведенный факторный анализ выявил, что поправочный коэффициент не зависит от температуры поверхности и начального объема капли, а определяется только видом соли. На основе обработки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости по определению времени полного испарения капель водных растворов солей NaCl и CaCl₂. На основании регрессионного анализа выявлена высокая степень согласования расчетных и экспериментальных данных по определению времени полного испарения капель водных растворов данных солей. Результаты регрессионного анализа позволяют сделать вывод о применимости при расчетах предложенного в статье вида зависимости по расчету полного времени испарения капель водных растворов солей.

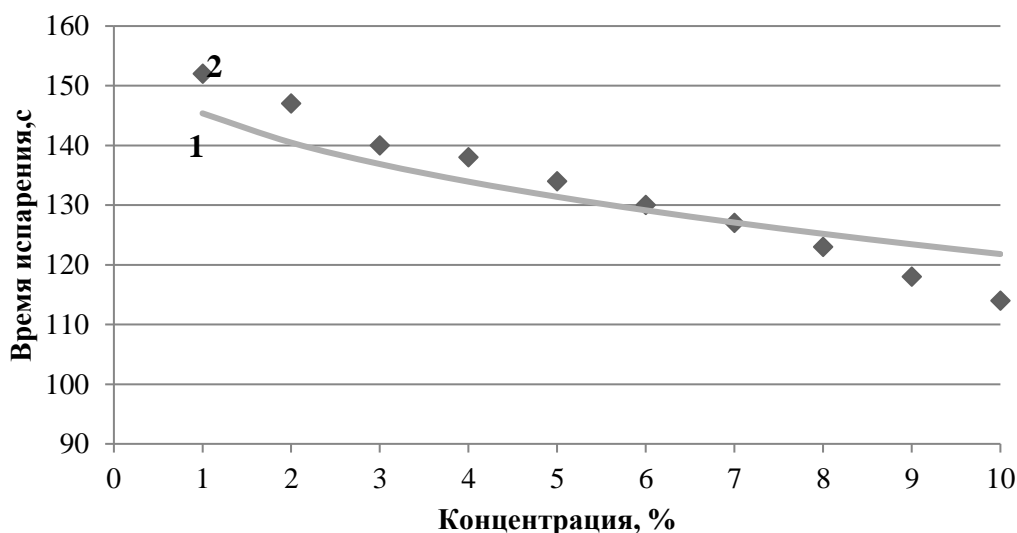


Рис. 2. Зависимость времени полного испарения капли водного раствора CaCl₂ от начальной концентрации соли: 1 – аппроксимационная зависимость; 2 – экспериментальные данные

Fig. 2. Dependence of the time of complete evaporation of a drop of aqueous solution of CaCl₂ on the initial salt concentration: 1 – approximation dependence; 2 – experimental data

**Список литературы
References**

1. Губарев В.Я., Ефремова А.С. 2014. Исследование процесса испарения капель на высокотемпературной поверхности. В кн.: Тезисы Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. М., Издательский дом МЭИ: 127–129.
Gubarev V.YA., Efremova A.S. 2014. Issledovanie processa ispareniya kapel' na vysokotemperaturnoj poverhnosti. V kn.: Tezisy SHestoj Rossijskoj nacional'noj konferencii po teploobmenu. M., Izdatel'skij dom MЭИ: 127–129.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. 1981. Теплопередача. М., Энергоатомиздат, 440.
Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. 1981. Teploperedacha. M., EНnergoatomizdat, 440.
3. Губарев В.Я., Шацких Ю.В. 2005. Теплообмен газокapельной среды с высокотемпературной поверхностью. Теплофизика высоких температур, 5: 774–779.
Gubarev V.YA., SHackih YU.V. 2005. Teploobmen gazokapel'noj sredy s vysokotemperaturnoj poverhnost'yu. Teplofizika vysokih temperatur, 5: 774–779.
4. Гарбер Э.А., Гончарский А.А., Шаравин М.П. 1991. Технический прогресс систем охлаждения прокатных станов. М., Металлургия, 256.



Garber E.N.A., Goncharskij A.A., SHaravin M.P. 1991. Tekhnicheskij progress sistem ohlazhdeniya prokatnyh stanov. M., Metallurgiya, 256.

5. Исаченко В.П., Кушнырев В.И. 1984. Струйное охлаждение. М., Энергоатомиздат, 216.

Isachenko V.P., Kushnyrev V.I. 1984. Strujnoe ohlazhdenie. M., EНnergoatomizdat, 216.

6. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г. 2010. Испарение капли на высокотемпературной поверхности. Тепловые процессы в технике, 3: 63–67.

Gubarev V.YA., Arzamascev A.G. 2010. Isparenije kapli na vysokotemperaturnoj poverhnosti. Teplovyje processy v tekhnike, 3: 63–67.

7. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г., Шипулина А.С. 2017. Исследование процесса теплообмена при испарении крупной плоской капли на высокотемпературной поверхности. Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 3 (4): 10–23.

Gubarev V.YA., Arzamascev A.G., SHipulina A.S. 2017. Issledovanie processa teploobmena pri isparenii krupnoj ploskoj kapli na vysokotemperaturnoj poverhnosti. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, ehnergetika, 3 (4): 10–23.

8. Yagov V.V., Zabirow A.R., Kabankov O.N., Minko M.V. 2017. Heat transfer during cooling of high temperature spheres in subcooled water at different pressures. International Journal of Heat and Mass Transfer, 110: 219–230.

9. Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Елистратов С.Л. 2013. Особенности испарения капель воды на нагреваемой поверхности. Доклады Академии наук, 448 (3): 293–296.

Nakoryakov V.E., Misyura S.YA., Elistratov S.L. 2013. Osobennosti isparenija kapel' vody na nagrevaemoj poverhnosti. Doklady Akademii nauk, 448 (3): 293–296.

10. Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Елистратов С.Л. 2013. Влияние концентрации растворов солей на процесс десорбции капель. Известия вузов: проблемы энергетике, 1 (2): 14–17.

Nakoryakov V.E., Misyura S.YA., Elistratov S.L. 2013. Vliyanie koncentracii rastvorov solej na process desorbicii kapel'. Izvestiya vuzov: problemy ehnergetiki, 1 (2): 14–17.

11. Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Овчинников В.В. 2015. Кризис кипения капель водного раствора соли. Современная наука, 1: 39–42.

Nakoryakov V.E., Misyura S.YA., Ovchinnikov V.V. 2015. Krizis kipeniya kapel' vodnogo rastvora soli. Sovremennaya nauka, 1: 39–42.

12. Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Елистратов С.Л. 2012. Десорбция водных растворов солей на горизонтальной поверхности нагрева. В кн: Сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий». Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет: 54–56.

Nakoryakov V.E., Misyura S.YA., Elistratov S.L. 2012. Desorbciya vodnyh rastvorov solej na gorizontal'noj poverhnosti nagreva. V kn: Sbornik trudov III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Teplofizicheskie osnovy ehnergeticheskikh tekhnologij». Tomsk, Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politekhnicheskij universitet: 54–56.

13. Мисюра С.Я., Исламова А.Г., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. 2016. Десорбция капель водных растворов LiBr, CaCl₂, LiCl, NaCl. В кн: Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ». СПб: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»: 224–226.

Misyura S.YA., Islamova A.G., Orlova E.G., Feoktistov D.V. 2016. Desorbciya kapel' vodnyh rastvorov LiBr, CaCl₂, LiCl, NaCl. V kn: Materialy nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Nedelya nauki SpbPU». SPb: FGAOU VO «Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo»: 224–226.

14. Губарев В.Я., Ефремова А.С. 2015. Исследование испарения крупных плоских сферидальных капель идеальных растворов на высокотемпературной поверхности. В кн.: Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (24–29 мая 2015 г., г. Звенигород). М., Издательский дом МЭИ: 203–204.

Gubarev V. YA., Efremova A.S. 2015. Issledovanie isparenija krupnyh ploskih sferoidal'nyh kapel' ideal'nyh rastvorov na vysokotemperaturnoj poverhnosti. V kn.: Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v ehnergeticheskikh ustanovkah: Tezisy докладов XX SHkoly-seminara molodyh

uchenyh i specialistov pod rukovodstvom akad. RAN A.I. Leont'eva (24–29 maya 2015 g., g. Zvenigorod). M., Izdatel'skij dom МЕНІ: 203–204.

15. Шипулина А.С., Арзамасцев А.Г., Губарев В.Я. 2016. Определение времени испарения крупных плоских капель раствора хлорида натрия на высоконагретой поверхности. Международный научный журнал «Инновационное развитие», 2: 17–18.

SHipulina A.S., Arzamascev A.G., Gubarev V.YA. 2016. Opredelenie vremeni ispareniya krupnyh ploskih kapel' rastvora hlorida natriya na vysokonagretoj poverhnosti. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Innovacionnoe razvitiye», 2: 17–18.

16. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L. 2012. The behavior of water droplets of the heated surface. Int.Journal of the Heat Mass Transfer, 55: 6609-6617.

17. Misyura S.Y. 2014. Nucleate boiling in bidistillate droplets. Int.Journal of the Heat Mass Transfer, 71: 197–205.

18. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L. 2011. Peculiarities of nonisothermal desorption of lithium bromide water solution on a horizontal heated surface. Journal of Engineering Thermofysics, 20: 338–343.

19. Misyura S.Y. 2015. High temperature nonisothermal desorption in a water salt droplets. Int.Journal of Thermal Sciences, 9: 34–43.

20. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L. 2012. Nonisothermal desorption of droplets of complex composition. Int.Journal of Thermal Sciences, 16: 997–1004.