

УДК 536.4

ИНТЕНСИВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ МОДЕЛИ СТЕНКИ РЕАКТОРА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ

О.В. Высокоморная, М.В. Пискунов, А.О. Опарин, А.П. Вергун

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия
vysokomornaja@tpu.ru

Резюме: Представлены результаты экспериментальных исследований интенсивного (кратковременного) охлаждения стального шара ($d \approx 20$ мм), разогретого до температуры 1000 К, в емкости объемом $0,003 \text{ м}^3$ с тремя видами хладагентов: водопроводная вода, морская вода с содержанием соли $\gamma \approx 18 \text{ г/л}$, водный раствор NaCl с концентрацией $\gamma_{\text{NaCl}} \approx 27 \text{ г/л}$. Процессы тепло-массообмена, протекающие на поверхности разогретого шара при контакте с жидкостью, анализировались с использованием средств высокоскоростной видеорегистрации. Выявлено, что при использовании в качестве охлаждающих жидкостей водных растворов солей на поверхности металлического шара отсутствует стадия пленочного кипения, что снижает времена охлаждения на 2–4 с по сравнению с водопроводной водой. Также показано, что минимальные времена установления теплового равновесия между стальным шаром и охлаждающей жидкостью соответствуют экспериментам с использованием водных растворов солей.

Ключевые слова: теплонагруженное оборудование, быстрый теплоотвод, жидкий хладагент, стальной шар, режим кипения, фазовое превращение, высокоскоростная видеорегистрация.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МД-1221.2017.8) и стипендии Президента РФ (СП-1049.2016.1).

INTENSIVE COOLING OF THE REACTOR WALL MODEL WHEN USING WATER SOLUBLE SOLUTIONS

O.V. Vysokomornaya¹, M.V. Piskunov¹, A.O. Oparin¹, A.P. Vergun¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
vysokomornaja@tpu.ru

Abstract: The paper reports experimental results on the intensive (fast) cooling of 20 mm steel ball heated to 1000 K when immersing in different coolants in 0.003 м^3 glass vessel: tap water, seawater with salt concentration γ of about 18 g/l, water solution of NaCl with $\gamma \approx 27 \text{ г/л}$. By using the high-speed video recording, we study heat and mass transfer on a surface of the heated ball during the cooling. Experiments allow us to conclude that the film boiling on a surface of the metallic ball is almost excluded when using water solutions of salt as coolants. As a result, a cooling time decreases by 2–4 s as compared to the tap water. In addition, when using water solutions of salt, the temperature balance between steel ball and coolant is reached during a minimum time versus the tap water and seawater.

Keywords: *heat temperature equipment, rapid heat removal, coolant fluid, steel ball, boiling regime, phase transformations, high-speed video recording*

Acknowledgments: *The study was carried out with the support of a grant from the President of the Russian Federation (MD-1221.2017.8) and a scholarship of the President of the Russian Federation (SP-1049.2016.1).*

Введение

Проблема быстрого и безопасного отведения тепловой энергии от теплонагруженных технологических поверхностей и узлов энергетических агрегатов является актуальной для многих производственных отраслей. Необходимость быстрого стока тепла зачастую возникает при развитии нештатных ситуаций на объектах энергетики или машиностроения. В частности, потребность быстрого и эффективного охлаждения существует при регулировании параметров работы соответствующих тепловых систем на атомных тепловых электрических станциях [1, 2], а также в других отраслях для предотвращения возникновения техногенных происшествий, таких как пожары и взрывы [3, 4].

подавляющее большинство поверхностей и узлов, нуждающихся в периодическом или экстренном (мгновенном) охлаждении, изготовлено из различных металлов и сплавов [5, 6]. Для охлаждения таких материалов наиболее часто используют воду, а также жидкие хладагенты на ее основе (растворы, эмульсии, суспензии). Теплофизические свойства [8, 9] (высокая теплоемкость и большая энергия фазового перехода) воды позволяют осуществлять быстрый теплоперенос между взаимодействующими средами. Однако к негативным аспектам использования воды для отвода тепла от металлических поверхностей (и других поверхностей с низкой шероховатостью) в условиях, соответствующих фазовому переходу, следует отнести возникновение пленочного кипения на поверхности теплообмена. Формирующийся при этом пограничный паровой слой значительно снижает коэффициент теплообмена между разогретой металлической поверхностью и теплоносителем.

В настоящее время предприняты попытки поиска теплоносителя на водной основе, использование которого минимизировало бы возникновение пленочного кипения на поверхностях теплообмена. Так, в работах [9, 10] представлены сравнительные эксперименты по охлаждению металлических шаров и цилиндрических стержней деионизированной и морской водой. Результаты [9, 10] позволяют сделать вывод о том, что при использовании морской воды режим кипения в зоне контакта «теплоноситель – поверхность теплообмена» не возникает, в то время как при использовании деионизированной воды достаточно продолжительное время (до 20 с) реализовывался режим пленочного кипения, который затем сменялся пузырьковым кипением. При этом значительно увеличивались времена охлаждения (снижалась эффективность теплоотвода). Доступность морской воды в качестве теплоносителя ограничена. Представляет интерес оценка целесообразности использования в качестве теплоотводящего теплоносителя искусственных водных солевых растворов.

Цель настоящей работы – сравнительный анализ эффективности применения различных теплоносителей на основе воды для быстрого охлаждения металлических поверхностей.

Методика проведения экспериментов и основные элементы стенда

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис.1.

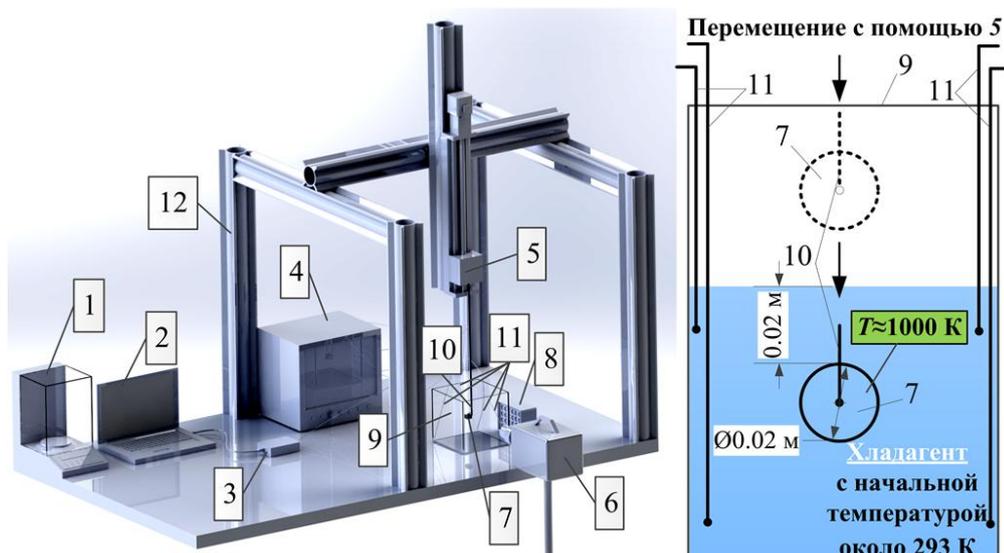


Рис. 1. Схемы экспериментального стенда (а) и области исследований (б): 1 – аналитические весы; 2 – ПК; 3 – устройство сбора данных; 4 – регистратор температуры; 5 – механизированное координатное устройство; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – металлический шар; 8 – светодиодный прожектор; 9 – резервуар для хладагента; 10 – термоэлектрический преобразователь (измерение температуры внутри металлического образца); 11 – термоэлектрические преобразователи, регистрирующие изменение температуры хладагента в резервуаре; 12 – алюминиевый каркас

Эксперименты выполнялись согласно следующей последовательности действий. Изготовленный из стали марки 45 шар 7 диаметром $d \approx 20$ мм разогревался с помощью портативной бутановой горелки до температуры $T \approx 1000$ К. На расстоянии нескольких сантиметров от сопла горелки диаметр поперечного сечения пламени (длиной около 0,1–0,15 м) превышал диаметр нагреваемого шара. Кроме того, при выполнении экспериментов прогрев шара осуществлялся с разных сторон (при данных условиях неоднородность прогрева шара сводилась к минимуму). В качестве держателя металлического шара использовался хромель-алюмелевый термоэлектрический преобразователь (тип К, диапазон измеряемых температур 233÷1273 К, предел допускаемых отклонений (ГОСТ 6616) в диапазоне температур от 607 до 1273 К – $\pm 0,0075 \cdot |T - 273|$, показатель тепловой инерции не более 1 с при диаметре защитной оболочки термоэлектрического преобразователя 1,5 мм), который помещался в заранее просверленное отверстие диаметром 1,5 мм и глубиной 10 мм. Термоэлектрический преобразователь достаточно надежно закреплялся в просверленном отверстии шара. Дополнительно зазор между защитной оболочкой термопары и внешней поверхностью шара заполнялся термостойким клеем для исключения попадания хладагента в процессе охлаждения внутрь (т.е. на чувствительный элемент термоэлектрического преобразователя). С помощью термоэлектрического преобразователя, учитывая указанные особенности его закрепления, проводились измерения температуры в центре металлического шара. По завершении нагрева шар с помощью мехатронного устройства 5 перемещался в емкость с охлаждающей жидкостью 9 (водопроводной, морской водой (содержание солей Na и Mg около 18 г/л), искусственным водным раствором NaCl (солесодержание $\gamma_{\text{NaCl}} \approx 27$ г/л); объем жидкости в емкости $V \approx 0,003$ м³). Необходимо отметить, что время движения шара в емкость с хладагентом составляло около 1 с. Это время компенсировало показатель тепловой инерции термопары ТХА. Процесс охлаждения шара, сопровождающийся быстропротекающим кипением, регистрировался с помощью высокоскоростной видеокамеры 6 (максимальное разрешение видеосъемки 1280×800

пикселей, максимальная скорость записи видеоматериала при уменьшенном разрешении $6 \cdot 10^5$ кадров/с). Полученные видеозаписи анализировались с помощью специализированного программного обеспечения «*Phantom Camera Control*», которое позволяло определять длительности стадий процессов тепломассопереноса, локализацию зон стока тепла, особенности интенсивного испарения и др. Охлаждение шара считалось завершённым, когда между ним и хладагентом в резервуаре 9 устанавливалось тепловое равновесие ($T \approx 293 \div 295$ К). Температура жидкости в емкости 9 контролировалась хромель-копелевыми термопарами 11 (тип *L*, диапазон измеряемых температур $223 \div 873$ К, класс точности 2, систематическая погрешность измерения температуры 2,5 К). Начальная температура хладагента составляла $T \approx 293$ К.

Для изучения динамики охлаждения нагретого до 1000 К стального шара в каждом хладагенте проводилось не менее семи опытов. Далее выполнялось осреднение экспериментальных данных. Максимальное среднеквадратичное отклонение серии измерений температуры внутри стального шара при неизменных параметрах системы не превышало 4 К. Систематические погрешности измерения температур стального шара и хладагента в емкости обусловлены указанными выше пределами допускаемых отклонений термоэлектрических преобразователей.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ видеок кадров проведенных экспериментов по охлаждению разогретого стального шара жидкими хладагентами различного состава позволил установить некоторые особенности процессов тепломассообмена на границе раздела сред «жидкость – металлический шар». На рис. 2 представлены характерные видеок кадры стадий кипения и испарения охлаждающих жидкостей на поверхности разогретого шара. Соответствующие указанным стадиям зависимости температуры шара (регистрируемой термопарой-держателем) от времени охлаждения показаны на рис. 3.

Стадия охлаждения «А–В» на рис. 2 и 3 характеризует начало кипения и интенсивного фазового перехода на поверхности разогретого шара при его контакте с относительно холодной жидкостью вследствие значительной разности температур. Необходимо отметить, что выделенная первая стадия имеет отличительные особенности для трех исследованных жидкостей (рис. 2, 3). Минимальная длительность этой стадии раствора NaCl $\gamma_{\text{NaCl}} \approx 27$ г/л, максимальная – у водопроводной воды. Эту разницу можно объяснить разными режимами кипения жидкости в начале контакта с разогретой поверхностью. При использовании в качестве хладагента водного раствора NaCl или морской воды на начальной стадии взаимодействия на поверхности разогретого шара наблюдался переходный режим кипения, характеризующийся формированием пульсационных волн и ростом отдельных пузырьков на поверхности теплообмена. Впоследствии кратковременный переходный режим кипения сменялся режимом пузырькового кипения (относительно длительным). При контакте же металлического шара с водопроводной водой в течение стадии «А–В» стабильно реализовывался пленочный режим кипения, что является причиной временной задержки падения температуры в интервале от 0 до 5 с (рис. 3). Вероятно, отсутствие пленочного кипения в случае использования солевого раствора и морской воды объясняется отличием физико-химических свойств этих жидкостей от свойств водопроводной воды. В частности, изменяются теплофизические свойства: теплоемкость, температура кипения, плотность и др. Кроме того, в водных растворах солей возникают иные силы межмолекулярного взаимодействия, вызванные наличием ионов растворенных солей. В работе [10] подробно описывается предположение об исключении пленочного кипения морской воды за счет выполнения эффекта «дзета-потенциала» (формирования двойного слоя ионов).

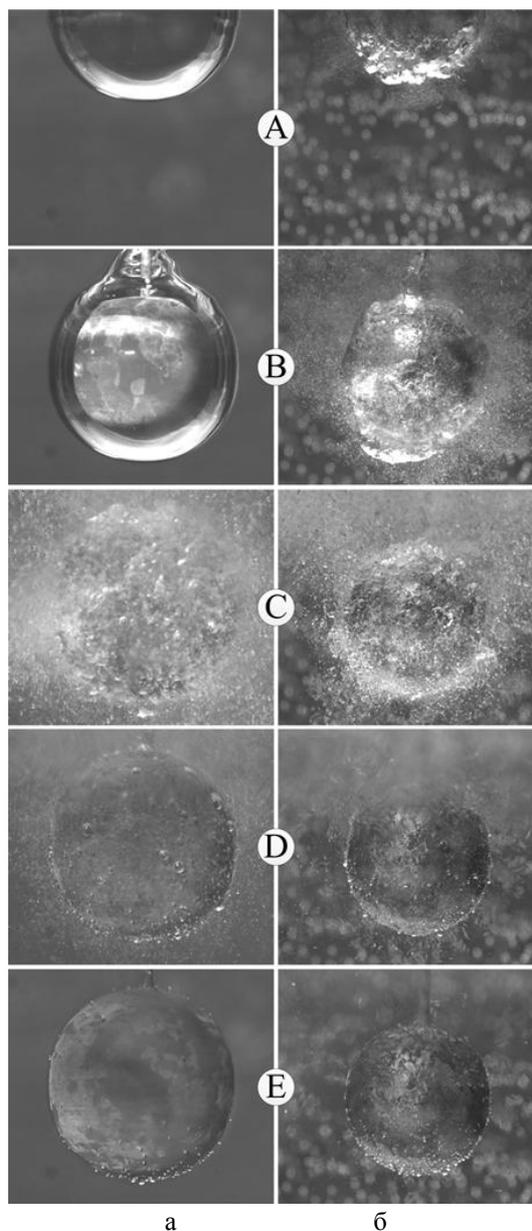


Рис. 2. Типичные видеокadres интенсивного теплообмена при охлаждении разогретого до высоких температур ($T \approx 1000$ К) стального шара в водопроводной воде (а), водном растворе NaCl $\gamma \approx 27$ % и морской воде (б). Примечание: стадии охлаждения при использовании водного раствора NaCl и морской воды идентичны

Вторая стадия охлаждения «В–С–D» характеризуется существенно нелинейным снижением температуры шара (более чем на 600 К) за относительно малый промежуток времени. Такое резкое снижение температуры поверхности металла связано со значительным теплоотводом за счет энергии испарения хладагента. Наибольшая длительность стадии «В–С–D» также соответствует водопроводной воде.

Далее скорость снижения температуры поверхности шара значительно замедляется («D–E») до установления теплового равновесия между стальным шаром и хладагентом.

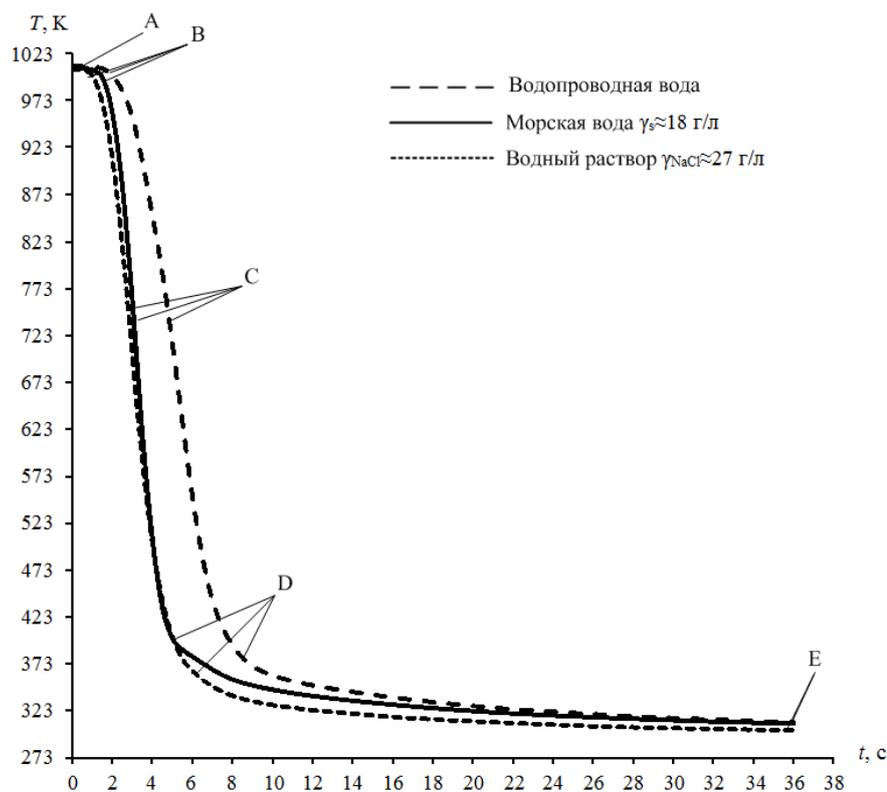


Рис. 3. Зависимость температуры стального шара от времени охлаждения

Полное время установления теплового равновесия в системе составило $34 \div 36$ с. При этом резкое (на $600 \div 650$ K) снижение температуры металла до уровня, близкого к температуре охлаждающей жидкости, было зафиксировано за 5,0, 6,0 и 8,5 секунды для морской воды, водного раствора NaCl и водопроводной воды, соответственно (рис. 3). Такое значительное падение температуры за короткий временной интервал достигается за счет высоких значений теплоемкости и энергии фазового перехода исследованных хладагентов.

Минимальные времена снижения температуры при использовании воды с примесями солей (раствор NaCl, морская вода), прежде всего, можно объяснить отсутствием стадии пленочного кипения на начальном этапе охлаждения разогретого металла. Вероятно, доминирование пузырькового кипения при использовании солевых растворов имеет следующее объяснение. Наличие в воде примесей в виде солей изменяет ее теплофизические свойства, в частности, снижает теплопроводность и теплоемкость, повышает температуру кипения. Вместе с тем, при локальном (точечном) перегреве раствора и возникновении на поверхности шара очага парообразования из испарившегося объема жидкости высвобождаются растворенные соли, кристаллизованные частицы которых выступают в качестве новых центров кипения. Таким образом, пузырьковое кипение приобретает характер «щепного» процесса, интенсивность которого возрастает до тех пор, пока это позволяет теплосодержание металлического шара. В экспериментах с водопроводной водой в результате пленочного кипения на поверхности шара формировался слой пара, который препятствовал отводу тепла в объем жидкости, поскольку выступал в качестве тепловой изоляции в силу гораздо меньшей (по сравнению с жидкой фазой) теплопроводности – этим объясняется задержка начала интенсивного охлаждения

металлического шара по сравнению с опытами при использовании солевых растворов (рис. 2, 3). Подобные эффекты, физико-химические предпосылки и механизмы их возникновения и развития были также описаны в работе [10].

Полученные результаты позволяют сделать также вывод о том, что наличие в жидкостях, используемых для экстренного охлаждения металлических поверхностей технологического оборудования при возникновении нештатных ситуаций природного или техногенного характера, мелких твердых частиц, способных выступать в качестве центров парообразования (по аналогии с микрокристаллами солей), является положительным фактором с точки зрения интенсификации теплообмена. Таким образом, оправданным может быть использование в чрезвычайных ситуациях воды из расположенных поблизости от места аварии естественных пресных водоемов, в которой могут содержаться мелкие грунтовые частицы (песок, ил и пр.) [11]. Также возможно создание научно-обоснованных специализированных составов в виде водяных эмульсий и суспензий (с добавлением мелких неметаллических частиц) для использования в процессе экстренного охлаждения разогретых металлических поверхностей. Например, анализ мест расположения атомных электрических станций показывает, что значительное их число находится поблизости от морских побережий, а часть этих станций – в сейсмоопасных зонах (юг Северной Америки, юго-восточная Азия), что свидетельствует о потенциальной опасности возникновения аварийных ситуаций, схожих с катастрофой на станции «Фукусима-1». В условиях, когда в результате стихийного бедствия нарушено энергоснабжение (в том числе и аварийное), и штатные системы охлаждения реактора (блокирующие графитовые стержни, поглощающий излучение раствор борной кислоты в подреакторной зоне и в системе аварийного распыления в помещении реакторного цеха) выведены из строя, экстренное применение морской воды, а также воды из пресных водоемов для охлаждения поверхностей энергетического оборудования (до восстановления функционирования аварийных систем) может быть эффективной мерой предотвращения вторичных взрывов и разрушений. При этом полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о преимуществе использования воды с примесями солей относительно фильтрованной пресной воды. Развитие экспериментальной базы данных об особенностях кипения и испарения хладагентов на основе воды с различными примесями позволит создать достоверные прогностические модели, которые могут быть использованы при возникновении экстренных ситуаций, подобных аварии на станции «Фукусима-1».

Необходимо также отметить, что температурные условия, созданные в проведенных экспериментах, близки к реальным условиям функционирования первого контура нагрева атомных электрических станций. Так, толщина стального (сталь конструкционная высокопрочная высоколегированная) цилиндрического корпуса реактора (без учета толщины антикоррозийной внутренней наплавки) составляет около 20 мм, температура перегретой воды около 600 К. Если же экстренное охлаждение необходимо применять к технологическому оборудованию других отраслей, то диапазоны температур, а также теплофизические свойства (термическое сопротивление, теплоемкость и др.) разогретых поверхностей определяются особенностями технологического процесса, но в редких случаях превышают параметры, заданные в проведенных экспериментах.

Следует сказать, что интенсивное снижение температуры металла за короткий временной промежуток при использовании всех исследованных хладагентов объясняется значительным превышением массы охлаждающей жидкости над массой разогретого модельного объекта. Использование для охлаждения разогретых тел потока хладагента вместо неподвижного объема позволит интенсифицировать тепломассоперенос относительно полученных результатов, поскольку обеспечит отвод разогретых объемов жидкости из зоны теплообмена, а также увеличит конвективную составляющую теплового потока [12].

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить возможность резкого снижения температуры разогретого ($T \approx 1000$ К) стального шара при охлаждении в большом объеме теплообменных жидкостей с различными теплофизическими свойствами. Установлено, что при использовании в качестве хладагента водных растворов солей (раствор NaCl, морская вода) на поверхности металлического шара при погружении в жидкость отсутствует режим пленочного кипения, который является одной из главных причин снижения интенсивности теплоотвода от разогретых тел. Показано, что минимальные времена резкого снижения температуры металла характерны экспериментам с использованием раствора NaCl, максимальные – экспериментам с водопроводной водой (времена снижения температуры стального шара на 600–650 К составили 5,0; 6,0 и 8,5 с для водного раствора NaCl, морской и водопроводной воды, соответственно). Сформулированы выводы о целесообразности использования для экстренного аварийного охлаждения энергетического оборудования (в том числе используемого на атомных электрических станциях) водных растворов солей.

Литература

1. Блинков В.Н., Мелихов В.И., Мелихов О.И., и др. Расчетно-экспериментальное исследование напорно-расходной характеристики эжектора для системы аварийного охлаждения активной зоны АЭС с ВВЭР // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 11–5. С. 1172–1175.
2. Ищенко О.П., Королев А.В. Необходимость исследования проблемы охлаждения бассейна выдержки при отказе штатной системы охлаждения // *Евразийский союз ученых*. 2015. Т. 17, № 8-2. С. 79–83.
3. Безюков О.К., Жуков В.А., Жукова О.В. Обеспечение эффективности и надёжности жидкостных систем охлаждения энергетических установок и технологического оборудования // *Вестник машиностроения*. 2008. № 11. С. 25–27.
4. Автономова И.В., Мазурин Е.Б., Братусь А.В. Разработка технологической схемы компрессорной установки с рекуперацией теплоты. анализ и подбор конструкции промежуточного охладителя // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана*. Серия: Машиностроение. 2011. № 5. С. 78–97.
5. Гетман А.Ф., Кузьмичевский А.Ю. Вероятностный метод оценки ресурса конструкционных сталей оборудования и трубопроводов атомных электростанций // *Тяжелое машиностроение*. 2010. № 10. С. 31–34.
6. Орыщенко А.С., Горынин И.В., Леонов В.П., Счастливая И.А. Титановые сплавы для корпусов атомных реакторов малой и средней мощности // *Вопросы материаловедения*. 2014. Т. 78. № 2. С. 199–210.
7. Поплавский В.М., Багдасаров Ю.Е. Актуальные проблемы НИОКР перспективных быстрых натриевых реакторов // *Атомная энергия*. 2016. Т. 121, № 1. С. 10–15.
8. Авраменко А.А., Кондратьева Е.А., Ковецкая М.М., Тыринов А.И. Гидродинамика и теплообмен потока воды с сверхкритическими параметрами в вертикальной сборке тепловыделяющих элементов // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86. № 4. С. 760–767.
9. 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. Vol. 95. Pp. 206–213.
10. 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. Vol. 86. Pp. 65–71.
11. Dmitriyenko M.A., Nyashina G.S., Zhdanova A.O., Vysokomornaya O.V. Experimental investigation of droplet evaporation of water with ground admixtures while motion in a flame of liquid fuel // *EPJ Web of Conferences*. 2016. Vol. 110. Article number 01046.

12. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Москва: Атомиздат, 1979. 416 с.

Авторы публикации

Высокоморная Ольга Валерьевна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: vysokomornaja@tpu.ru.

Пискунов Максим Владимирович – инженер лаборатории фундаментальных основ ресурсоэффективных и безопасных технологий тушения лесных пожаров с применением авиации Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: piskunovmv@tpu.ru.

Опарин Александр Олегович – магистрант Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: aoo2@tpu.ru.

Вергун Анатолий Павлович – докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры технической физики Национального исследовательского Томского политехнического университета. E-mail: anatoli@tpu.ru.

References

1. Blinkov V.N., Melihov V.I., Melihov O.I., Parfenov Ju.V., Nikonov S.M., Elkin I.V., Trubkin E.I., Jakush C.E. Fundamental Research [Fundamental'nye issledovanija]. 2012. No. 11-5. Pp. 1172–1175.
2. Ishhenko O.P., Korolev A.V. Eurasian Union of Scientists [Evrazijskij sojuz uchenyh]. 2015. Vol. 17. No. 8-2. Pp. 79–83.
3. Bezjukov O.K., Zhukov V.A., Zhukova O.V. Engineering Bulletin [Vestnik mashinostroenija]. 2008. No. 11. Pp. 25–27.
4. Avtomomova I.V., Mazurin E.B., Bratus' A.V. Bulletin of Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering [Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. N.Je. Baumana. Serija: Mashinostroenie]. 2011. No. S. Pp. 78–97.
5. Getman A.F., Kuz'michevskij A.Ju. Heavy Engineering [Tjazeloe mashinostroenie]. 2010. No. 10. Pp. 31–34.
6. Oryshhenko A.S., Gorynin I.V., Leonov V.P., Schastlivaja I.A. Materials Questions [Voprosy materialovedenija]. 2014. Vol. 78. No. 2. Pp. 199–210.
7. Poplavsky V.M., Bagdasarov Yu.E. Atomic Energy [Atomnaya Energiya]. 2016. Vol. 121. No. 1. Pp. 10–15.
8. Avramenko A.A., Kondrat'eva E.A., Koveckaja M.M., Tyrinov A.I. Journal of Engineering Physics And Thermophysics [Inzhenerno-fizicheskij zhurnal]. 2013. Vol. 86. No. 4. Pp. 811–819.
9. 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. Vol. 95. Pp. 206–213.
10. 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. Vol. 86. Pp. 65–71.
11. Dmitriyenko M.A., Nyashina G.S., Zhdanova A.O., Vysokomornaya O.V. Experimental investigation of droplet evaporation of water with ground admixtures while motion in a flame of liquid fuel // EPJ Web of Conferences. 2016. Vol. 110. Article number 01046.
12. Kutateladze S.S. Fundamentals of Heat Transfer Theory. – Moscow: Atomizdat, 1979. – 416 p.

Authors of the publication

Vysokomornaya Olga Valer'evna – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Assistant professor in Department of Department of Theoretical and Industrial Heat Systems Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: vysokomornaja@tpu.ru.

Piskunov Maxim Vladimirovich – Engineer in Lab for Resource-Efficient and Safe Technologies for Aircraft Extinguish of Wildfire, National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: piskunovmv@tpu.ru.

Oparin Alexander Olegovich – Graduate Student in Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: aoo2@tpu.ru.

Vergun Anatoly Pavlovich – Doc. Sci. (Phys. and Math.), Professor in Department of Technical Physics, National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: anatoli@tpu.ru.

Поступила в редакцию

20 апреля 2017 г.