

Теплофизические исследования для оценки безопасности перспективных ядерных энергетических установок

Показана роль теплофизических исследований в оценке безопасности и совершенствовании технологий ядерных реакторов. Рассмотрены вопросы использования наножидкостей для охлаждения активной зоны ядерных реакторов. Проанализированы проблемы теплообмена в перспективных технологиях ядерных энергетических установок IV поколения с гелиевым теплоносителем и водой сверхкритического давления. Представлены оригинальные результаты расчетов режима ухудшенного теплообмена в семистержневой тепловыделяющей сборке с геометрическими параметрами реактора ВВЭР-СКД.

Ключевые слова: ядерные реакторы, теплофизические исследования, наножидкости, гелиевый теплоноситель, вода сверхкритического давления.

А. О. Авраменко, М. М. Ковецька, О. В. Кравчук, Ю. Ю. Ковецька

Теплофізичні дослідження для оцінки безпеки перспективних ядерних енергетичних установок

Показано роль теплофізичних досліджень в оцінці безпеки та вдосконаленні технологій ядерних реакторів. Розглянуто питання використання нанорідин для охолодження активної зони ядерних реакторів. Проаналізовано проблеми теплообміну в перспективних технологіях ядерних енергетичних установок IV покоління з гелієвим теплоносієм і водою надкритичного тиску. Наведено результати розрахунків режиму погіршеного теплообміну в семістрижневій тепловідільній збірці з геометричними параметрами реактора ВВЕР-СКД.

Ключові слова: ядерні реактори, теплофізичні дослідження, нанорідини, гелієвий теплоносій, вода надкритичного тиску.

Постоянное расширение теплофизических исследований, направленных на совершенствование математических моделей и программ, используемых для обоснования безопасности АЭС, является одним из приоритетов в обеспечении безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) [1–3]. На данном этапе развития ядерной энергетики ставится задача как повышения безопасности АЭС, так и улучшения их экономических и эксплуатационных характеристик путем сочетания свойств самозащищенности и пассивных систем безопасности. Разработка и обоснование таких систем требует проведения теплофизических исследований работы ЯЭУ в стационарных и нестационарных режимах, включая экспериментальные исследования, разработку и совершенствование методов численного моделирования [4]. Разработка ЯЭУ IV поколения с высоким уровнем безопасности диктует необходимость выполнения фундаментальных исследований в области теплофизики. В области гидродинамики и теплообмена для легководных ядерных реакторов основным направлением научных исследований остаются исследования кризиса теплообмена при новых вариантах геометрии тепловыделяющих сборок (ТВС), нестационарных и аварийных режимов. Для проектирования наиболее теплонапряженных областей активной зоны реакторов, парогенераторов и теплообменников нужно знать не только средние значения характеристик теплоносителя, но и их распределение по сечению, а также учитывать возможные отклонения действительных значений характеристик от расчетных. Для этого требуются экспериментальные исследования с использованием новейшей измерительной техники.

При расчетах теплогидравлических характеристик ТВС нужно учитывать массообмен между ячейками, прогибы и смещения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), влияние дистанционирующих решеток, неравномерность распределения теплоносителя по ячейкам. Теплогидравлический стенд Института технической теплофизики НАН Украины дает возможность проводить экспериментальные исследования гидродинамики и кризиса теплообмена в каналах сложной геометрии в стационарных и нестационарных режимах при диапазоне изменения массовой скорости от 120 до 3500 кг/(м²·с), давления до 18 МПа, плотности теплового потока до 2,6 МВт/м². В институте проводятся фундаментальные исследования границ области режимов кипения в парогенерирующих каналах в широком диапазоне изменения давления [5, 6], влияния смены режимов течения теплоносителя на энтальпию поперечных потоков между ячейками пучка стержней [7]. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют верифицировать математические модели и компьютерные программы, используемые для обоснования безопасности АЭС. Так, с помощью экспериментальных данных по перемешиванию теплоносителя в ячейках ТВС можно получить замыкающие уравнения для коэффициентов межканального тепло- и массопереноса, которые используются в поканальных (ячейковых) теплогидравлических кодах, а также при трехмерном моделировании активной зоны реакторов. Наличие экспериментальных данных по кризису теплообмена в каналах сложной геометрии (трубы, кольцевые каналы, пучки стержней) позволило верифицировать математические модели для исследования нестационарных и аварийных режимов в теплообменном оборудовании АЭС [8–10]. На основе разработанной трехмерной математической модели двухфазного потока и нестационарной RNG $k-\epsilon$ модели турбулентности проведены численные исследования нестационарных теплофизических

процессов в обогреваемых каналах при равномерной и неравномерной тепловой нагрузке [11–13].

Цель работы — проанализировать роль теплофизических исследований в оценке безопасности перспективных технологий ЯЭУ, а также исследовать условия возникновения режимов ухудшенного теплообмена в активной зоне реакторов, охлаждаемых водой сверхкритического давления.

Теплоперенос в наножижкостях при кипении. Особый интерес в теплофизике вызывают наножижкости — суспензии (коллоиды) наночастиц в базовой жидкости. Благодаря высокой эффективности отвода теплоты наножижкости предпочтительны во многих промышленных процессах. По некоторым экспериментальным данным теплоперенос в наножижкостях увеличивается на 100...120 % по сравнению с исходной жидкостью [14]. Подобное явление нельзя описать моделями эффективной среды. Для объяснения основных эффектов аномального теплопереноса в наножижкостях использовались модели, учитывающие, в частности, микроконвекцию, броуновское движение, наличие твердой пленки между жидкостью и наночастицами, различные модели кластеризации, модели внутренней радиационной передачи теплоты. Считается установленным, что при объемной доле наночастиц 0,1...3,0 % эффективное увеличение теплопереноса составляет 3...10 % [14]. При кипении наножижкости на обогреваемой поверхности наблюдается как увеличение, так и уменьшение коэффициента теплоотдачи, а критический тепловой поток в наножижкости, как правило, больше, чем в чистой жидкости [15–18]. Особенности теплоотдачи при кипении наножижкости Al_2O_3 —вода на вертикальной и горизонтальной обогреваемой поверхностях приведены в [16]: коэффициент теплоотдачи при кипении наножижкости меньше, чем в чистой жидкости, и уменьшается с увеличением концентрации наночастиц; критический тепловой поток в наножижкости увеличивается на 32 % для горизонтальной и на 13 % для вертикальной обогреваемой поверхности по сравнению с чистой жидкостью.

Проводятся исследования по использованию наножижкостей в системах безопасности легководных ядерных реакторов, в частности по повторному заливу активной зоны при тяжелой аварии с потерей теплоносителя. Использование наножижкости для охлаждения горячей активной зоны может существенно увеличить скорость охлаждения. Проведены экспериментальные исследования с целью изучения механизмов влияния наночастиц на процессы закаливания металлических сфер и стержней в наножижкостях. Авторы публикации [19] приходят к выводу, что увеличение шероховатости и смачиваемости поверхности вследствие осаждения наночастиц может быть ответственно за ускорение смены режима кипения от пленочного к пузырьковому и быстрый переход к конвективному теплообмену. Например, скорость распространения фронта смачивания раскаленного стержня с осажденными на поверхности наночастицами в наножижкости на несколько порядков превышала скорость распространения фронта смачивания гладкого стержня.

Вопросы использования наножижкостей в качестве теплоносителя первого контура водоохлаждаемых реакторов изучаются как с точки зрения теплофизики, так и нейтронной физики [20]. При очень низкой концентрации наночастиц их влияние на свойства теплоносителя минимально, однако с повышением концентрации наночастиц происходит уменьшение эффективного коэффициента

размножения K_{eff} и повышение отложений на стенках твэлов. В диапазоне объемной доли наночастиц от 0,0001 до 0,1 наблюдаются увеличение критического теплового потока и минимальное изменение коэффициента теплоотдачи пузырькового кипения. Результаты исследования изменения K_{eff} показали его уменьшение с увеличением объемной доли наночастиц, причем этот эффект для различных типов наночастиц различен. Для нормальной работы реактора с небольшим изменением K_{eff} наилучшей, по мнению авторов, будет наножижкость Al_2O_3 —вода с объемной долей наночастиц 0,001. Наножижкости CuO —вода в наибольшей степени способствуют снижению K_{eff} . Отложения наночастиц на поверхности элементов активной зоны могут повысить безопасность ядерного реактора, но ценой снижения мощности.

Для выбора наиболее подходящих наножижкостей в качестве теплоносителя необходимы систематические исследования процессов теплопереноса в двухфазных потоках. Результаты теоретических исследований влияния наночастиц на процессы теплопереноса в наножижкостях при кипении и конденсации представлены в [21–24]. Процессы теплопереноса при пленочном кипении на плоской вертикальной обогреваемой стенке рассматриваются в [23, 24]. Получено выражение для коэффициента теплоотдачи в зависимости от шести параметров, учитывающих влияние броуновской и термодиффузионной диффузии наночастиц, их концентрации и теплофизических свойств.

Инновационные ЯЭУ. В рамках международной программы GIF IV (Generation IV International Forum), направленной на разработку ядерных энергетических систем IV поколения с высокими эксплуатационными характеристиками, повышенной экономичностью и безопасностью, выбраны шесть инновационных ядерных реакторов, которые могут быть введены в эксплуатацию до 2030 года [25]. Среди предложенных технологий выделяются две технологии производства электроэнергии с КПД 45...47 %, использующие высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем, и реакторы, охлаждаемые водой сверхкритического давления.

Высокотемпературные газовые реакторы (ВТГР). Разработка ВТГР осуществляется по следующим направлениям: энергоблоки с паровым циклом (температура теплоносителя на выходе 750 °C); с прямым газотурбинным циклом (температура на выходе 850 °C); для получения технологического тепла (температура на выходе 950 °C и более). Высокий уровень безопасности ВТГР достигается сочетанием свойств внутренне присущей безопасности и конструктивных решений. Разрабатываются проекты реакторов на тепловых и быстрых нейтронах для производства электроэнергии, минимизации высокоактивных отходов, производства водорода. В активной зоне реактора могут использоваться как призматические ТВС, так и шаровая засыпка. Основными проблемами высокотемпературных реакторов для получения электроэнергии и технологического тепла специалисты считают выбор типа твэлов, создание конструкционных материалов для теплообменных и теплотранспортных систем, работающих в условиях очень высоких температур, повышение надежности и безопасности.

Учитывая перспективность ВТГР для производства электроэнергии и высокотехнологического тепла, проведены исследования теплофизических процессов в элементах активной зоны реакторов для оценки их безопасности [11].

Изучены закономерности и особенности теплообмена при течении гелия в активной зоне стержневого и насыпного типа. Усовершенствована трехмерная нестационарная математическая модель турбулентного теплообмена на основе ренормализационно-группового (RNG) подхода для исследования нестационарных процессов и учета эффектов макропористой среды.

При исследовании гидродинамических и теплообменных процессов в модели активной зоны реактора насыпного типа с шаровыми твэлами установлены зависимость температуры оболочки твэлов от проницаемости засыпки, распределение профилей скорости и температуры в активной зоне в зависимости от проницаемости пористой среды, критерии гидродинамической неустойчивости. Полученные результаты могут быть использованы для оценки безопасности высокотемпературных гелиевых реакторов с шаровыми твэлами.

Исследованы также закономерности гидродинамики и теплообмена в активной зоне высокотемпературных гелиевых реакторов с гексагональными ТВС стержневого типа. Расчеты проведены для модельной семистержневой ТВС треугольной упаковки в стационарных и нестационарных режимах [26]. Получены распределения скоростей и температур по ячейкам пучка обогреваемых стержней, определено влияние необогреваемой стенки и межканальных перетечек на параметры теплоносителя. Исследована азимутальная неравномерность температуры обогреваемых стержней и ее зависимость от входных параметров. Минимальные значения коэффициентов теплоотдачи наблюдались в угловом зазоре между тепловыделяющим стержнем и стенкой.

Исследованы нестационарные режимы с уменьшением расхода теплоносителя и скачками тепловой мощности. Определено время достижения температуры стенки обогреваемого стержня предельно допустимого значения. Знание локальных характеристик течения и теплообмена в активной зоне реактора позволяет оценить его надежность и безопасность.

Реакторы, охлаждаемые водой сверхкритического давления (СКД). Основная задача использования сверхкритического давления в легководных реакторах состоит в повышении их экономичности. Эта концепция реакторов рассматривается специалистами России, Японии, США, Франции, Канады, Китая и других стран. Строительство АЭС с реакторами SCWR (Supercritical Water Reactor) позволит повысить КПД установок до 44...48 %, снизить металлоемкость оборудования по сравнению с существующими АЭС с ВВЭР или PWR [27, 28]. Рассматриваются концепции реакторов корпусного и канального типа, с тепловым и быстрым спектром нейтронов.

Осваивая технологии легководных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя, необходимы полное понимание теплогидравлических процессов в теплоносителе и решение проблемы создания новых конструкционных материалов активной зоны. В теплофизическом плане одной из важных является проблема определения коэффициента теплоотдачи в активной зоне реактора и безопасной области тепловых нагрузок, чтобы исключить возможность возникновения режима ухудшенного теплообмена. В этом режиме наблюдается резкое снижение коэффициента теплоотдачи с образованием локальных зон перегрева, что может привести к разрушению оболочки твэлов. Поэтому фундаментальные исследования природы явления ухудшенного теплообмена

при переходе от докритических к сверхкритическим параметрам теплоносителя и разработка надежных методов его прогноза важны для обеспечения безопасности реакторной установки.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований ухудшенного теплообмена при течении воды СКД в каналах свидетельствуют о том, что это явление имеет гидродинамическую природу и связано с существенным изменением структуры как осредненного, так и пульсационного течения [29]. При возникновении режима ухудшенного теплообмена и последующем выходе из него наблюдается резкое изменение температуры по высоте обогреваемой стенки. Параметры, при которых возникают такие режимы, существенно ограничивают уровень мощности реактора. Экспериментальных исследований теплообмена и гидродинамики в ТВС с водой сверхкритических параметров очень мало. Для обоснования безопасности подобных энергоблоков проводят расчеты возможных аварийных режимов на основе трехмерных математических моделей теплообмена и гидродинамики в активной зоне реакторов и одномерных моделей с поканальным (ячейковым) теплогидравлическим расчетом [30].

Далее представлены результаты численного моделирования теплообмена и гидродинамики при течении воды сверхкритического давления в вертикальной семистержневой ТВС. Параметры ТВС соответствуют параметрам активной зоны ВВЭР-СКД [27]. Пучок стержней диаметром 9 мм с обогреваемой длиной 4,05 м расположен в треугольной упаковке с соотношением шага к диаметру стержней 1,4. Центральный стержень и стенка канала не обогреваются. На стенках шести обогреваемых стержней задается плотность теплового потока, на вход подается вода с температурой меньше критической для данного давления.

Численное моделирование течения и теплообмена в сборке выполнено на основе RNG $k-\epsilon$ модели турбулентности [11, 31], включающей систему уравнений сохранения массы, количества движения, энергии теплоносителя, а также уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии. Уравнения состояния воды при до- и сверхкритических параметрах задавались согласно формуляции IFC-97 [32]. Определены локальные характеристики потока в ячейках пучка обогреваемых стержней, изменение температуры стенки и коэффициента теплоотдачи по длине и сечению ТВС, влияние необогреваемой стенки на характеристики потока, условия возникновения режима ухудшенного теплообмена. На рис. 1 представлено изменение температуры стенки твэла по длине при условии, что температура воды на входе равна 290 °С, скорость — 0,5 м/с, давление — 25 МПа, плотность теплового потока на стенках обогреваемых стержней — 400 кВт/м². Наиболее теплонпряженными являются центральные ячейки пучка с максимальной температурой стенки в зазоре между обогреваемыми стержнями, а наиболее теплонпряженной — точка 1 (рис. 1). В этой точке температура стенки T_w по длине стержня меняется неравномерно. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине стержня в теплонпряженной точке (точка 1, рис. 1) представлено на рис. 2.

В области, где температура теплоносителя достигает критического значения (штриховая линия), коэффициент теплоотдачи увеличивается, азимутальная неравномерность температуры стенки уменьшается. В сечении $z = 2$ м азимутальная неравномерность температуры стенки минимальная (рис. 1), а коэффициент теплоотдачи максимальный. В сечении $z > 2$ м наблюдается резкое уменьшение коэффициента

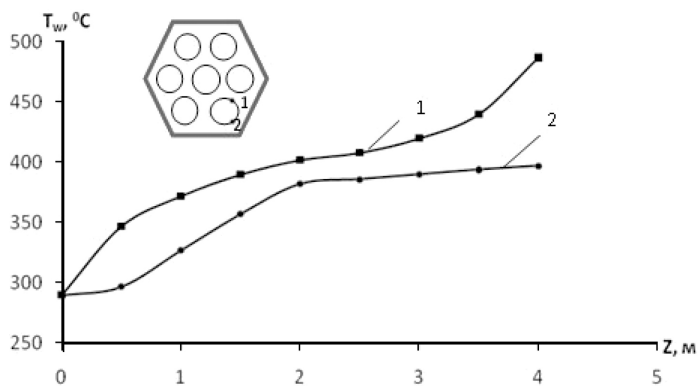


Рис. 1. Изменение температуры стенки твэла по длине в точках 1, 2

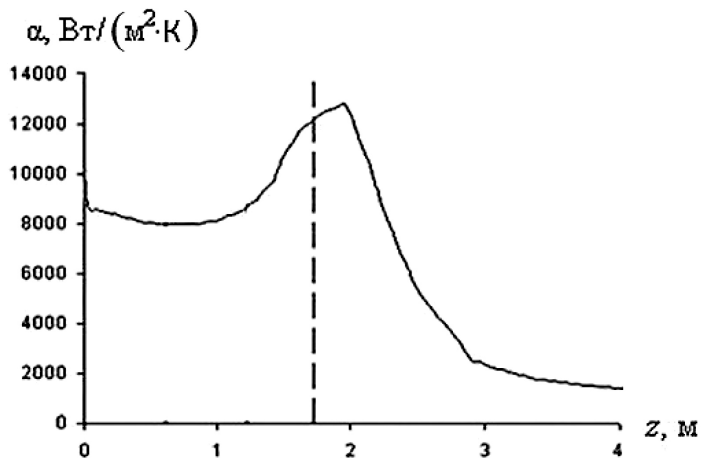


Рис. 2. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине твэла в точке 1

теплоотдачи, что связано с уменьшением теплоемкости в этой области и сильным термическим ускорением потока. Возникает режим ухудшенного теплообмена. Температура стенки в точке 1 (рис. 1) резко увеличивается и достигает на выходе из сборки 487 °С, при этом азимутальная неравномерность температуры стенки составляет 90 °С.

Выводы

Для усовершенствования математических моделей и программ, используемых для обоснования безопасности АЭС, необходимы дальнейшие фундаментальные исследования теплофизических процессов в теплообменном оборудовании.

Разработка инновационных проектов высокотемпературных гелиевых реакторов требует дальнейших теплофизических исследований надежности внутриреакторных и теплообменников систем.

Результаты численного моделирования течения и теплообмена в семистержневой тепловыделяющей сборке, охлаждаемой водой сверхкритического давления, показали возможность возникновения режима ухудшенного теплообмена, который характеризуется резким уменьшением коэффициента теплоотдачи, ростом температуры стенки твэла и сильной азимутальной неравномерностью температуры стенки.

Список использованной литературы

1. Шараевский И. Г., Фиалко Н. М., Носовский А. В., Зимин Л. Б., Шараевский Г. И. Актуальные проблемы теплофизики проектных и тяжелых аварий ядерных энергоблоков. *Ядерная радиационная безопасность*. 2016. № 2(70). С. 32–36.
2. Ключников А. А., Шараевский И. Г., Фиалко Н. М., Зимин Л. Б., Шараевский Г. И. Теплофизика безопасности атомных электростанций : Монография. Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. 484 с.
3. Ключников А. А., Шараевский И. Г., Фиалко Н. М., Зимин Л. Б., Шараевский Г. И. Теплофизика надежности активных зон : Монография. Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2015. 528 с.
4. Ефанов А. Д., Калякин С. Г., Сорокин А. П. Теплофизические исследования в обоснование проектов ядерных реакторов нового поколения. *Атомная энергия*. 2012. Т. 112, № 1. С. 12–18.
5. Антипов В. Г. Экспериментальное определение границ области неравновесного кипения в парогенерирующем канале. *Промышленная теплотехника*. 2011. Т. 33, № 6. С. 25–31.
6. Антипов В. Г. Теплообмен в области неравновесного кипения воды в вертикальной трубе. *Промышленная теплотехника*. 2015. Т. 39, № 3. С. 16–23.
7. Авраменко А. А., Кондратьева Е. А., Ковецкая М. М., Тыринов А. И. Влияние режимных параметров на энтальпию поперечных потоков между ячейками пучка стержней. *Промышленная теплотехника*. 2015. Т. 37, № 3. С. 16–23.
8. Ковецкая М. М., Колесниченко Ю. М., Богорош А. Т. Особенности нестационарного кризиса теплообмена в вертикальных парогенерирующих каналах. *Промышленная теплотехника*. 2007. Т. 29, № 1. С. 43–48.
9. Ковецкая М. М., Домашев В. Е., Ковецкая Ю. Ю. Исследование кризиса теплообмена в парогенерирующем канале при набросе мощности. *Промышленная теплотехника*. 2012. Т. 34, № 6. С. 53–57.
10. Dolinsky A. A., Kovetskaya M. M., Skitsko A. I., Avramenko A. A., Basok V. I. Nonstationary Heat Transfer Crisis in Annular Dispersed Flows. *Journal of Engineering Thermo physics*. 2008. V. 17, № 2. P. 126–129.
11. Авраменко А. А., Басок Б. И., Дмитренко Н. П., Ковецкая М. М., Тыринов А. И., Давыденко Б. В. Ренормализационно групповой анализ турбулентности : Монография. К. : ТОВ «Видавничо-поліграфічний центр «ЕКСПРЕС»», 2013. 300 с.
12. Скицко А. И., Ковецкая М. М., Тыринов А. И. Численное исследование тепломассопереноса в вертикальном парогенерирующем канале под влиянием возмущающих факторов. *Промышленная теплотехника*. 2013. Т. 35, № 6. С. 9–15.
13. Ковецкая М. М., Кондратьева Е. А., Скицко А. И. Влияние неравномерности тепловой нагрузки на локальные характеристики потока при течении воды в парогенерирующих каналах и тепловыделяющих сборках. *Промышленная теплотехника*. 2014. Т. 36, № 3. С. 38–44.
14. Дмитриев А. С. Теплофизические проблемы наноэнергетики. Часть 2. *Теплоэнергетика*. 2011. № 4. С. 29–36.
15. Ramesh G., Prabhu N. K. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment. *Nanoscale Research Letters*. 2011. 6:334. P. 1–15.
16. Bang I. C., Chang S. H. Boiling Heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃ — water nanofluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. № 48. P. 2407–2419.
17. Wang X. Q., Mujumdar A. S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. № 46. P. 1–19.
18. Das S. K., Choi S. U. S., Patel H. E. Heat Transfer in Nanofluids — A Review. *Heat Transfer Engineering*. 2006. № 27(10). P. 3–19.
19. Kim H., Buongiorno J., Hu L. W., McKrell T. Nanoparticles deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based alumina nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. № 53. P. 1542–1553.

20. Hadad K., Hajizadeh A., Jafarpour K., Hanapol B. D. Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000. *Annals of Nuclear Energy*. 2010. V. 37, № 11. P. 1447–1455.

21. Avramenko A. A., Shevchuk V. I., Tyrinov A. I., Blinov D. G. Heat transfer at film condensation of stationary vapor with nanoparticles near a vertical plate. *Applied Thermal Engineering*. 2014. № 73. P. 389–396.

22. Avramenko A. A., Tyrinov A. I. Heat transfer at film condensation of moving vapor with nanoparticles over a flat surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. № 82. P. 316–324.

23. Avramenko A. A., Tyrinov A. I. Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015. № 92. P. 106–118.

24. Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Abdallah S., Blinova D. G., Harmand S., Tyrinov A. I. Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. *Journal of Molecular Liquids*. 2016. 223. P. 156–164.

25. Piore I., Kirillov P. Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World, available at: <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>

26. Ковецкая М. М., Дмитренко Н. П., Скицко А. И., Кондратьева Е. А. Процессы теплообмена при течении гелия и воды сверхкритического давления в тепловыделяющей сборке. *Промышленная теплотехника*. 2014. Т. 36, № 2. С. 46–53.

27. Кириллов П. Л. Водоохлаждаемые реакторы на воде сверхкритических параметров. *Теплоэнергетика*. 2008. № 5. С. 2–5.

28. Cao L., Oka Y., Ishiwatari Y., Shang Z. Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2008. V. 45, № 2. P. 138–148.

29. Силин В. А., Семченков Ю. М., Алексеев П. Н., Митькин В. В. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления при течении воды сверхкритических параметров применительно к реакторным установкам. *Атомная энергия*. 2010. Т. 108, № 6. С. 340–347.

30. Смирнов В. П., Папандин М. В., Логинов А. ., Ванюкова Г. В., Афонин С. Ю. Применение CFD- кода к расчету теплообмена в реакторе со сверхкритическими параметрами. *Атомная энергия*. 2011. Т. 111, № 4. С.196–201.

31. 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.

32. Александров А. А., Орлов К. А., Очков В. Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики : справочник. М. : Изд. дом МЭИ, 2009. 224 с.

References

1. Sharaievskii, I.G., Fialko, N.M., Nosovsky, A.V., Zimin, L.B., Sharaievskii, G.I. (2016), “Urgent Problems in Thermal Physics of Design-Basis and Severe Accidents at Nuclear Power Plants” [Aktualnyie problemy teplofiziki proektnykh i tiazhelykh avarii yadernykh energoblokov], *Nuclear and Radiation Safety*, No. 2 (70), pp. 32–36. (Rus)

2. Kliuchnikov, A.A., Sharaievskii, I.G., Fialko, N.M., Zimin, L.B., Sharaievskii, G.I. (2010), “Thermal Physics of NPP Safety: Monograph” [Teplofizika bezopasnosti atomnykh elektrostantsii: Monografiia], Chornobyl, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NASU, 484 p. (Rus)

3. Kliuchnikov, A.A., Sharaievskii, I.G., Fialko, N.M., Zimin, L.B., Sharaievskii, G.I. (2015), “Thermal Physics of Core Reliability” [Teplofizika nadiozhnosti aktivnykh zon: Monografiia], Chornobyl, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NASU, 528 p. (Rus)

4. Yefanov, A.D., Kaliakin, S.G., Sorokin, A.P. (2012), “Thermal Studies to Justify New Generation Nuclear Reactor Designs” [Teplofizicheskie issledovaniia v obosnovaniiie proektov yadernykh reaktorov], *Nuclear Energy*, V. 112, No. 1, pp. 12–18. (Rus)

5. Antipov, V.G. (2011), “Experimental Determination of Nonequilibrium Boiling Area Boundaries in Steam Generating Channel” [Experimentalnoie opredeleniie granits oblasti neravnovesnogo kipeniia

v parogeneriruiushchem kanale], *Industrial Thermal Engineering*, V. 33, No. 6, pp. 25–31. (Rus)

6. Antipov, V.G. (2015), “Heat Transfer in Nonequilibrium Boiling Area in Vertical Tube” [Teploobmen v oblasti neravnovesnogo kipeniia vody v vertikalnoi trubel], *Industrial Thermal Engineering*, V. 39, No. 3, pp. 16–23. (Rus)

7. Avramenko, A.A., Kondratieva, E.A., Kovetskaia, M.M., Tyrinov, A.I. (2015), “Influence of Regime Parameters on the Enthalpy of Cross Flows between Rod Bundle Cells” [Vliianie rezhimnykh parametrov na entalpiiu poperechnykh potokov mezhdru yacheikami puchka sterzhnei], *Industrial Thermal Engineering*, V. 37, No. 3, pp. 16–23. (Rus)

8. Kovetskaia, M.M., Kolesnichenko, Yu.M., Bogorosh, A.T. (2007), “Features of Nonstationary Departure from Nucleate Boiling in Vertical Steam Generating Channels” [Osobennosti nestatsionarnogo krizisa teploobmena v vertikalnykh parogeneriruiushchikh kanalakh], *Industrial Thermal Engineering*, V. 29, No. 1, pp. 43–48. (Rus)

9. Kovetskaia, M.M., Domashev, V.E., Kovetskaya, Yu.Yu. (2012), “Study of Departure from Nucleate Boiling in Steam Generating Channel at Power Surge” [Issledovaniie krizisa teploobmena v parogeneriruiushchem kanale pri nabrose moshchnosti], *Industrial Thermal Engineering*, V. 34, No. 6, pp. 53–57. (Rus)

10. Dolinsky, A.A., Kovetskaya, M.M., Skitsko, A.I., Avramenko, A.A., Basok, B.I. (2008), “Nonstationary Departure from Nucleate Boiling in Annular Dispersed Flows”, *Journal of Engineering Thermal Physics*, V. 17, No. 2, pp. 126–129.

11. Avramenko, A.A., Basok, B.I., Dmitrenko, N.P., Kovetskaya, M.M., Tyrinov, A.I., Davydenko, B.V. (2013), “Renormalization Group Analysis of Turbulence: Monograph” [Renormalizatsionno gruppovoi analiz turbulentnosti: Monografiia], Kyiv, Express Publishing House, 300 p. (Rus)

12. Skitsko, A.I., Kovetskaya, M.M., Tyrinov, A.I. (2013), “Numerical Study of Heat and Mass Transfer in a Vertical Steam Generating Channel under the Influence of Disturbing Factors” [Chislennoie issledovaniie teplomassoperenosa v vertikalnom parogeneriruiushchem kanale pod vliyaniem vozmyshchchayushchikh faktorov], *Industrial Thermal Engineering*, V. 35, No. 6, pp. 9–15. (Rus)

13. Kovetskaya, M.M., Kondratieva, E.A., Skitsko, A.I. (2014), “Effect of Uneven Heat Load on Local Flow Characteristics during Water Flow in Steam Generating Channels and Fuel Assemblies” [Vliianie neravnomernosti teplovoi nagruzki na lokalnyie kharakteristiki potoka pri techenii vody v parogeneriruiushchikh kanalakh i teplovydeliaiushchikh sborkakh], *Industrial Thermal Engineering*, V. 36, No. 3, pp. 38–44. (Rus)

14. Dmitriiev, A.S. (2011), “Thermophysical Problems of Nanoenergy. Part 2” [Teplofizicheskie problemy nanoenergetiki. Chast 2.], *Heat and Power Engineering*, No. 4, pp. 29–36. (Rus)

15. Ramesh, G., Prabhu, N.K. (2011), “Review of Thermo-Physical Properties, Wetting and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids and Their Applicability in Industrial Quench Heat Treatment”, *Nanoscale Research Letters*, No. 6, pp. 1–15.

16. Bang, I.C., Chang, S.H. (2005), “Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al₂O₃ – Water Nanofluids from a Plain Surface in a Pool”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 48, pp. 2407–2419.

17. Wang, X.Q., Mujumdar, A.S. (2007), “Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: a Review”, *International Journal of Thermal Sciences*, No. 46, pp. 1–19.

18. Das, S.K., Choi, S.U.S., Patel, H.E. (2006) “Heat Transfer in Nanofluids – A Review”, *Heat Transfer Engineering*, No. 27(10), pp. 3–19.

19. Kim, H., Buongiorno, J., Hu, L.W., McKrell, T. (2010), “Nanoparticles Deposition Effects on the Minimum Heat Flux Point and Quench Front Speed During Quenching in Water-Based Alumina Nanofluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 53, pp. 1542–1553.

20. Hadad, K., Hajizadeh, A., Jafarpour K., Hanapol, B.D. (2010), “Neutronic Study of Nanofluids Application to VVER-1000”, *Annals of Nuclear Energy*, V. 37, No. 11, pp. 1447–1455.

21. Avramenko, A.A., Shevchuk, V.I., Tyrinov, A.I., Blinov, D.G. (2014), “Heat Transfer at Film Condensation of Stationary Vapor with Nanoparticles near a Vertical Plate”, *Applied Thermal Engineering*, No. 73, pp. 389–396.

22. Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I. (2015), "Heat Transfer at Film Condensation of Moving Vapor with Nanoparticles over a Flat Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 82, pp. 316–324.
23. Avramenko, A.A., Tyrinov A.I. (2015), "Heat Transfer in Stable Film Boiling of a Nanofluid Over a Vertical Surface", *International Journal of Thermal Sciences*, No. 92, pp. 106–118.
24. Avramenko, A.A., Shevchuk, I.V., Abdallah, S., Blinov, D.G., Harmand, S., Tyrinov, A.I. (2016), "Symmetry Analysis for Film Boiling of Nanofluids on a Vertical Plate Using a Nonlinear Approach", *Journal of Molecular Liquids*, 223, pp. 156–164.
25. Piro, I., Kirillov P. (2013), "Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World", available at: <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>, pp. 818–830.
26. Kovetskaya, M.M., Dmitrenko, N.P., Skitsko, A.I., Kondratieva, E.A. (2014), "Heat Transfer Processes in Flow of Helium and Supercritical Water in a Fuel Assembly" [Protsesty teploobmena pri techenii geliia i vody sverkhkriticheskogo davleniia v teplovydeliaiushchei sborke], *Industrial Thermal Engineering*, V. 36, No. 2, pp. 46–53. (Rus)
27. Kirillov, P.L. (2008), "Water-Cooled Reactors with Supercritical Water" [Vodookhlazhdaiemye reaktory na vode sverkhkriticheskikh parametrov], *Heat and Power Engineering*, No. 5, pp. 2–5. (Rus)
28. Cao, L., Oka, Y., Ishiwatari, Y., Shang, Z. (2008), "Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor", *Journal of Nuclear Science and Technology*, V. 45, No. 2, pp. 138–148.
29. Silin, V.A., Semchenkov, Yu.M., Alekseev, V.V., Mitkin, V.V. (2010), "Study of Heat Transfer and Flow Resistance for Supercritical Water Flow in Relation to Reactor Facilities" [Issledovaniie teploobmena i gidravlicheskogo soprotivleniia pri techenii vody sverkhkriticheskikh parametrov primenitelno k reaktornym ustanovkam], *Nuclear Energy*, V. 108, No. 6, pp. 340–347. (Rus)
30. Smirnov, V.P., Papandin, M.V., Loginov, A.Ya., Vanyukova, G.V., Afonin, S.Yu. (2011), "Application of CFD – Code for Heat Transfer Calculation in the Reactor with Supercritical Parameters" [Primenenie CFD-koda k raschiotu teploobmena v reaktore s sverkhkriticheskimi parametrami], *Nuclear Energy*, V. 111, No. 4, pp. 196–201. (Rus)
31. Avramenko, A.A., Kondratieva, E.A., Kovetskaya, M.M., Tyrinov, A.I. (2013), "Hydrodynamics and Heat Transfer of Supercritical Water Flow in Vertical Fuel Assembly" [Gidrodinamika i teploobmen potoka vody s sverkhkriticheskimi parametrami v vertikalnoi sborke teplovydeliaiushchikh elementov], *Journal of Engineering Physics*, V. 86, No. 4, pp. 760–767. (Rus)
32. Aleksandrov, A.A., Orlov, K.A., Ochkov, V.F. (2009), "Thermophysical Properties of Working Substances of Power System: Monograph" [Termofizicheskie svoistva rabochikh veshchestv teploenergetiki: Monografiia], MEI Publishing House, Moscow, 224 p. (Rus)

Получено 10.01.2017.