

## 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.*

**П**остоянное 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/(м<sup>2</sup>·с), давления до 18 МПа, плотности теплового потока до 2,6 МВт/м<sup>2</sup>. 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 наножидкостях при кипении.** Особый интерес в теплофизике вызывают наножидкости — суспензии (коллоиды) наночастиц в базовой жидкости. Благодаря высокой эффективности отвода теплоты наножидкости предпочтительны во многих промышленных процессах. По некоторым экспериментальным данным теплоперенос в наножидкостях увеличивается на 100...120 % по сравнению с исходной жидкостью [14]. Подобное явление нельзя описать моделями эффективной среды. Для объяснения основных эффектов аномального теплопереноса в наножидкостях 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 наножидкости на обогреваемой поверхности наблюдается как увеличение, так и уменьшение коэффициента теплоотдачи, а критический тепловой поток в наножидкости, как правило, больше, чем в чистой жидкости [15–18]. Особенности теплоотдачи при кипении наножидкости  $Al_2O_3$ —вода на вертикальной и горизонтальной обогреваемой поверхностях приведены в [16]: коэффициент теплоотдачи при кипении наножидкости меньше, чем в чистой жидкости, и уменьшается с увеличением концентрации наночастиц; критический тепловой поток в наножидкости увеличивается на 32 % для горизонтальной и на 13 % для вертикальной обогреваемой поверхности по сравнению с чистой жидкостью.

Проводятся исследования по использованию наножидкостей в системах безопасности легководных ядерных реакторов, в частности по повторному заливу активной зоны при тяжелой аварии с потерей теплоносителя. Использование наножидкости 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 наножидкостях. 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 наножидкости на несколько порядков превышала скорость распространения фронта смачивания гладкого стержня.

Вопросы использования наножидкостей 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 наножидкость  $Al_2O_3$ —вода с объемной долей наночастиц 0,001. Наножидкости  $CuO$ —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 наножидкостей в качестве теплоносителя необходимы систематические исследования процессов теплопереноса в двухфазных потоках. Результаты теоретических исследований влияния наночастиц на процессы теплопереноса в наножидкостях 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/м<sup>2</sup>. 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

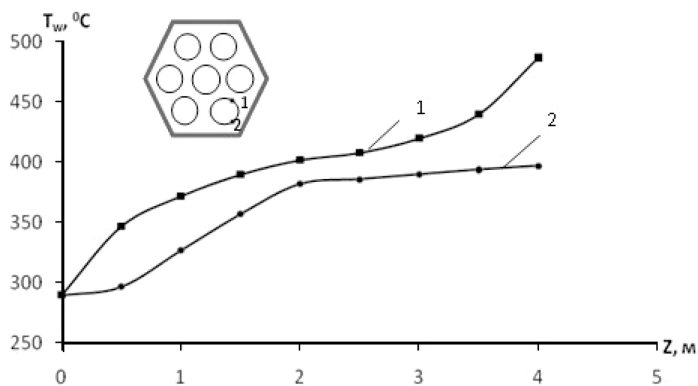


Рис. 1. Изменение температуры стенки твэла по длине в точках 1, 2

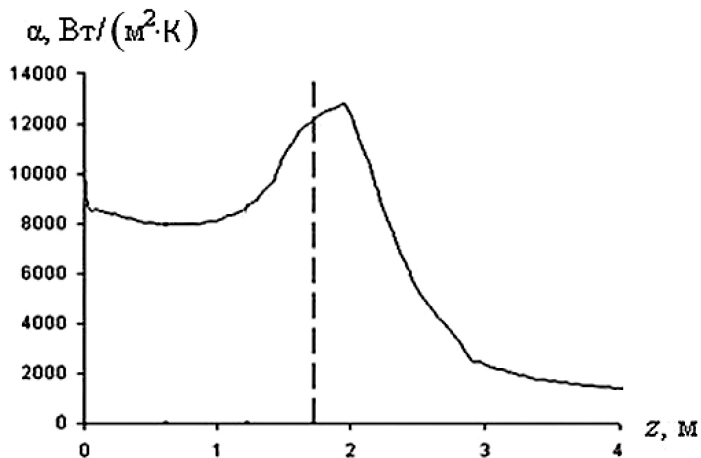


Рис. 2. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине твэла в точке 1

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 теплообменных 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 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], Chernobyl, 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], Chernobyl, 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 obosnovaniie 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” [Vliianiie 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 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.