

**А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС НА ОСНОВЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ**

Рассмотрены основные направления применения современных высокотехнологичных разработок в области нанотеплофизики для повышения безопасности атомных электрических станций. Выполнен анализ возможностей практического использования эффективных нанотехнологий для атомной энергетики. Рассмотрен комплекс проблемных вопросов, связанных с использованием наножидкостей в качестве теплоносителя для наиболее ответственного оборудования атомной электростанции. В числе этого оборудования рассматривается первый контур водоохлаждаемого ядерного реактора, а также система его аварийного охлаждения. Выполнен анализ основных проблем, которые связаны с определением критического теплового потока при кипении жидкости на рабочей поверхности. С этих позиций оценены известные результаты относительно данных о критическом тепловом потоке при использовании наножидкостей. Рассмотрены основные задачи перспективных исследований в области нанотеплофизики для повышения безопасности атомных электростанций в условиях Украины.

*Ключевые слова:* наножидкости, безопасность АЭС, водоохлаждаемый ядерный реактор, критический тепловой поток.

Как известно [1], современные нанотехнологии представляют собой комплекс методов и технических средств, обеспечивающих возможность целенаправленного манипулирования веществом на атомном и молекулярном уровнях для получения конечных продуктов с заранее заданной атомной структурой. При этом конечной целью является возможность эффективной реализации физических процессов, которые принципиально не могут быть обеспечены на макроуровне в обычном, не подвергнувшись такой нанотрансформации, веществе. Иными словами, современные нанотехнологии предоставляют возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, которые не только обладают принципиально новыми физическими характеристиками благодаря включению компонентов с максимальными размерами на уровне 100 нм, но также позволяют эффективно интегрировать наноструктуры в специализированные функциональные системы микро- и макромасштаба. Следует подчеркнуть, что в настоящее время развитие нанотехнологий как одного из важнейших направлений научно-технического прогресса, в основном, осуществляется в двух определяющих направлениях. Первое из них связано с созданием собственно наноматериалов, обладающих принципиально новыми физическими свойствами, которые и обеспечивают функциональным устройствам, использующим эти материалы, качественно более совершенные эксплуатационные характеристики. Второе направление связано с разработкой специализированных функциональных наносистемных устройств, которые непосредственно используют наноматериалы и технологии, обеспечивающие им качественно новые, более совершенные характеристики, недоступные устройствам аналогичного назначения, созданным с использованием известных, ставших уже традиционными технологических принципов. Так, например, использование наномасштабных технологий позволяет получить принципиально новые возможности для реализации высокоэффективного катализа с использованием таких взаимодействий, при которых межфазные границы обеспечивают аномально высокую интенсивность переноса элементарных носителей массы, заряда и энергии. Показательно, что определяющей в указанных условиях является доминантная роль тех процессов, которые происходят именно на низкоразмерных связях, образованных наноструктурными элементами. Именно создание специализированных архитектур на основе таких элементов позволяет радикально изменить физико-химические свойства соответствующих материалов и обеспечить реализацию в них процессов, которые не могут быть достигнуты в обычных условиях при отсутствии наноструктур.

Оценивая в этой связи наиболее важные направления научно-исследовательских и опытно-конструкторских исследований и разработок в области нанотехнологий применительно к задачам атомной энергетики, а также кратко характеризуя актуальные проблемы современной нанотеплофизики, которую следует рассматривать как теоретический фундамент грядущего нанотехнологического прорыва в производстве и использовании энергии, необходимо конкретизировать важнейшие на-

© А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, 2013

учные направления наноэнергетики. В их числе: 1) разработка и исследование новых материалов на основе наноархитектур для нужд энергетики; 2) создание новых технологических решений для реализации наноэффектов при течении рабочих жидкостей в нанопорсунках и нанофильерах, а также исследование процессов смешения и диспергирования рабочих сред на наномасштабных уровнях; 3) изучение определяющих особенностей гидродинамики и теплообмена наножидкостей с учетом того определяющего факта, что уравнение Навье - Стокса в указанных условиях в классической постановке не может считаться корректным; 4) исследование процессов переноса энергии в наноматериалах с учетом невозможности использования закона Фурье при решении задач теплопроводности в нанотрубках и в нанокompозитах; 5) изучение особенностей смачивания рабочих поверхностей наноматериалами с учетом их аномальной гидрофобности; 6) разработка наноматериалов для принципиально новых подшипниковых узлов, минимизирующих потери на трение в трибосопряжениях (турбоагрегаты, насосное оборудование и др.); 7) создание новых типов теплообменных поверхностей, использующих эффекты нанофильтрации теплоносителя; 8) исследование и практическая реализация наноэффектов в качественно новых системах прямого преобразования тепловой и солнечной энергии в электрическую.

Учитывая изложенное, а также переходя к анализу определяющих тенденций создания эффективных нанотехнологий на основе выполнения исследований и разработок теплофизической направленности (которые на современном этапе развития атомной энергетики следует считать наиболее приоритетными ввиду очевидных перспектив их широкого внедрения на действующих и проектируемых АЭС), необходимо обратить внимание на следующие принципиальные аспекты. Прежде всего следует подчеркнуть, что наиболее важными практическими приложениями нанотехнологий на ядерных энергоблоках в настоящее время признана разработка принципиально новых: а) теплоносителей на основе наножидкостей (например, жидких щелочных металлов с добавлением наночастиц для нового поколения энергетических реакторов на быстрых нейтронах); б) теплообменных поверхностей с использованием нанопокровов, а также конструкционных неметаллических материалов на основе нанопенных структур для теплообменного оборудования; в) систем безопасности, предусматривающих использование нанокремниевых графитоподобных структур; г) нанотехнологий утилизации ядерных отходов на основе использования принципиально новых кислородных соединений урана; д) совершенных видов ядерного топлива на основе его наномасштабного структурирования; е) эффективных первичных микродатчиков технологических параметров активной зоны (АкЗ) для оперативного мониторинга ядерного реактора (ЯР) с использованием наносенсорных материалов, обеспечивающих надежный и всеобъемлющий (а не выборочный, как в настоящее время) контроль нейтронного потока, температуры, давления и других технологических параметров.

Таким образом, быстрое расширение сфер применения современных высокоэффективных нанотехнологий также и в атомной энергетике неизбежно ставит комплекс проблем реакторной нанотеплофизики, определяющих возможность практической реализации результатов соответствующих НИОКР на АЭС Украины. В этой связи в ряде недавних публикаций (например, [2 - 6]) упоминается о принципиальной возможности повышения эффективности теплообмена в ядерных энергоустановках (ЯЭУ), в частности на основе применения наножидкостей в качестве не только охлаждающего агента широкого назначения (например, в системах аварийного охлаждения АкЗ и кориума в подреакторном пространстве), но также и в качестве теплоносителя первого контура действующих водородных ядерных реакторов повышенной безопасности (ВОЯР). Естественно, что обосновываются такие предложения как необходимостью повышения энергетической эффективности ЯР, так и современными требованиями к системам их аварийного расхолаживания (САОЗ). Физическим основанием для таких предложений служат результаты ряда некоторых новых экспериментальных исследований процессов теплообмена при кипении, например [7, 8], которые, по мнению их авторов, свидетельствуют о принципиальной возможности повышения уровня критического теплового потока (КТП) при кипении теплоносителя в условиях большого объема. В этой связи следует отметить, что в условиях Украины экономическая эффективность предлагаемых для этих целей технических решений могла бы быть достаточно высокой благодаря наличию разработанной в последние годы специалистами Института газа НАН Украины технологической базы для получения наножидкостей на основе графитовых суспензий [9 - 11].

С позиций анализа реальных возможностей разработки и использования перспективных нанотехнологий для современных АЭС с ВОЯР, а также проблем нанотеплофизики в контексте первого из двух вышеуказанных перспективных направлений исследований, а именно изучения возможностей применения теплоносителей на основе наножидкостей, представляется необходимым далее рассмот-

реть ряд наиболее важных тепло-, нейтроннофизических, а также материаловедческих аспектов этой комплексной проблемы с учетом имеющихся данных о разработках указанных теплоносителей. В этой связи необходимо отметить следующее.

При решении комплекса задач, связанных с повышением теплогидравлической надежности ВОЯР, значительный интерес вызывают, в первую очередь, наножидкости, которые представляют собой суспензии (коллоиды) наночастиц в базовой жидкости. Этот интерес объясняется уникальными тепловыми свойствами подобных систем, которые обусловлены увеличением теплопроводности (теплопереноса) даже при незначительной объемной доле наночастиц в исходной жидкости. Так, согласно ряду публикаций теплоперенос в нанотеплоносителях возрастает на величину 100...120 % по сравнению с исходной базовой жидкостью. Вместе с тем теоретическое описание физики увеличения тепловой эффективности наножидкостей не может быть получено на основе традиционных подходов с использованием моделей эффективной среды. Для объяснения основных эффектов аномального теплопереноса в наножидкостях использовались модели, учитывающие микроконвекцию, броуновское движение, наличие твердой пленки между жидкостью и наночастицами, различные модели кластеризации, модели внутренней радиационной передачи тепла, и т. п. [12 - 21].

В целом, однако, следует полагать, что указанные нанотеплоносители в условиях АЭС Украины принципиально могут быть использованы в различных приложениях и, в первую очередь, для повышения эффективности существующих комплексов САОЗ, применяемых на современных ядерных энергоблоках, оснащенных ВОЯР. Указанное предположение основывается, в частности, на имеющейся патентной информации [22, 23] относительно американских разработок систем повышенной эффективности для аварийного расхолаживания АкЗ и кориума в подреакторном пространстве. В то же время следует отметить, что экспериментальные результаты, полученные в вышеуказанных работах [12 - 21], были и остаются весьма противоречивыми. Так, в работе [24] убедительно показано, что многие из этих экспериментальных данных не могут быть признаны надежными. Тем не менее к настоящему времени уже можно считать достоверно установленным, что при объемной доле наночастиц около 0,1...3,0 % эффективное увеличение теплопереноса не превышает

3...10 %. Характерный вид (полученный путем электронной микроскопии) наножидкости на основе наночастиц алюминия и базовой жидкости (гексадекана) показан на рис. 1 [24], где также приведена функция распределения наночастиц по размерам.

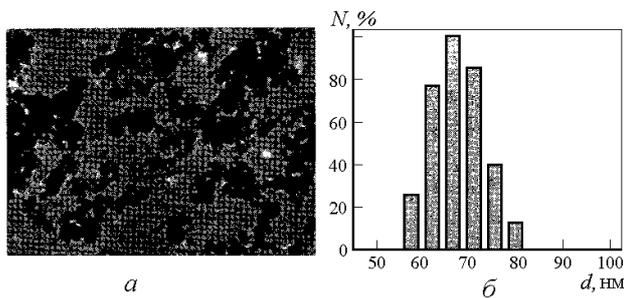


Рис. 1. Электронная фотография наножидкости (а) и функция распределения наночастиц по размерам (б).

Типичные зависимости относительной теплопроводности  $\Delta = (\lambda_n - \lambda_{ж})/\lambda_{ж}$  (где  $\lambda_n, \lambda_{ж}$  – коэффициенты теплопроводности нано- и базовой жидкости) от доли наночастиц представлены на рис. 2 [24].

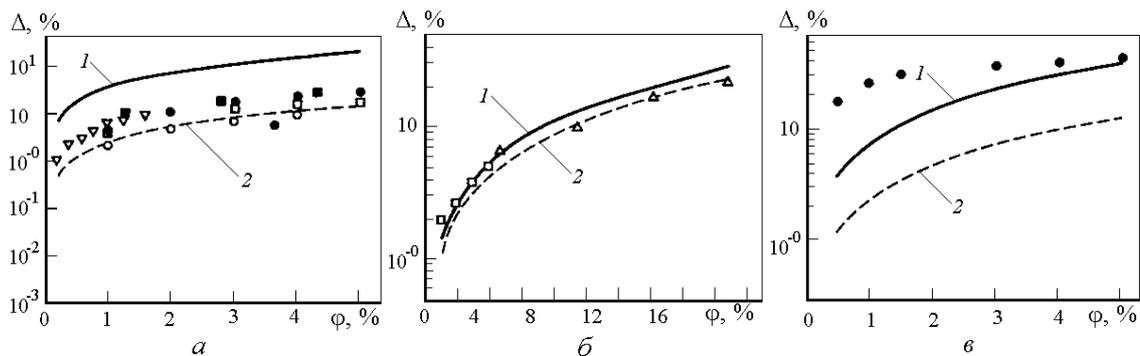
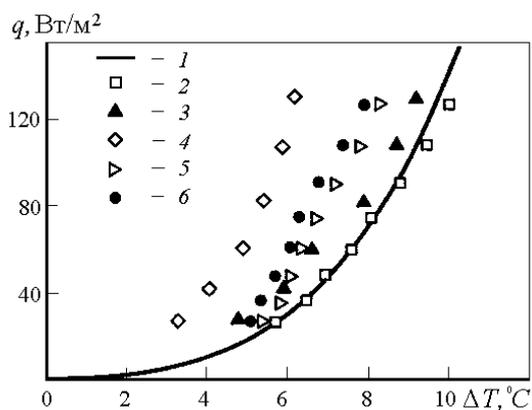


Рис. 2. Зависимости относительной теплопроводности от доли различных наночастиц для наножидкостей на основе воды [24]. Наножидкости: а -  $Al_2O_3$ ; б -  $SiO_2$ ; в -  $Fe_2O_3$ ; □ - Eapea et al., 2007; ● - Eastman et al., 1997; ■ - Masuda et al., 1993; ○ - Das et al., 2003; ▽ - Wen et al., 2004; △ - Kag et al., 2006; линиями обозначены верхняя (1) и нижняя (2) границы значений относительной теплопроводности.



На рис. 3 [24] приведена кривая кипения для нескольких наножидкостей. Из этого рисунка следует, что значения теплового потока при кипении воды с добавлением наночастиц  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$  значительно отличаются от значений этого показателя для чистой воды [25, 26].

Рис. 3. Зависимости теплового потока при кипении различных наножидкостей от температуры перегрева: 1, 2 - чистая вода; 3 - вода +  $TiO_2$  (0,31 %); 4 - вода +  $TiO_2$  (0,72 %); 5 - вода +  $Al_2O_3$  (0,32 %); 6 - вода +  $Al_2O_3$  (0,71 %).

Изложенное позволяет заключить, что теплообмен при кипении наножидкостей даже в простейших условиях (кипение в большом объеме) характеризуется специфическими закономерностями, и это, несомненно, должно учитываться при оценке возможностей применения указанных теплоносителей в различных технических приложениях. В связи с изложенным не требует доказательств тот очевидный факт, что для широкого практического использования такого принципиально нового и, вместе с тем, весьма специфического по своим теплофизическим свойствам теплоносителя, как наножидкость (рассматриваемая, например, в качестве охлаждающего агента для САОЗ ВОЯР) необходима постановка обширного комплекса теоретических и экспериментальных исследований. Несомненно также и то, что указанные исследования фактически могут быть проведены только на основе использования того научного и технического потенциала, который в настоящее время все еще сохраняется в соответствующих профильных институтах НАН Украины. Очевидная актуальность и высокая практическая эффективность указанных исследований и разработок в этой области для повышения безопасности АЭС сомнений не вызывают.

Далее, переходя к оценке возможности применения наножидкостей в качестве теплоносителя первого контура ВОЯР с целью повышения безопасности АкЗ реакторных установок (РУ) на основе обсуждаемой [2 - 6, 11] в настоящее время возможности повышения располагаемого уровня КТП на поверхности ТВЭЛ, необходимо подчеркнуть следующие принципиальные аспекты этой проблемы.

Находящийся в настоящее время в эксплуатации парк украинских ядерных энергоблоков безальтернативно оснащен водо-водяными реакторами типа ВВЭР, которые, равно, как и практически все прочее технологическое оборудование этих АЭС, спроектированы и построены при главенствующей роли общесоюзных ведомств и входивших в их состав исследовательских, проектных и строительных организаций, которые после распада СССР являются российскими. В соответствии с межгосударственными соглашениями эти организации продолжают определять все регламенты эксплуатации и безопасности АЭС Украины и вести мониторинг функционирования как отдельных единиц оборудования, так и станций в целом. В этой связи любые возможные модернизации используемых на АЭС Украины технологий и оборудования принципиально могут быть реализованы только на основе тесного международного сотрудничества с соответствующими профильными российскими организациями.

Переходя к нейтронно-физическим аспектам рассматриваемой задачи, необходимо отметить следующее. Как известно, в ВОЯР (отечественных ВВЭР, а также зарубежных конструкциях PWR и BWR) водный теплоноситель является также и замедлителем нейтронов. При этом вода выполняет функцию замедления именно благодаря значительной концентрации в ее молекулах легких ядер водорода, имеющих массу, близкую к массе нейтрона. Кроме того, водный замедлитель имеет высокое значение сечения рассеяния нейтронов, что существенно повышает вероятность их замедления еще до того, как они будут упущены из делящейся системы, в которой происходит деление ядер урана. При этом водный замедлитель отличается высокой способностью к замедлению нейтронов, одновременно имея низкий уровень сечения их поглощения. Это позволяет поддерживать в АкЗ нейтронный баланс на приемлемом уровне и использовать в качестве ядерного топлива низкообогащенный уран.

Нейтронно-физические характеристики водного замедлителя (в особенности, его способности к замедлению и поглощению нейтронов) хорошо изучены и учитывались в качестве определяющего фактора при выборе параметров тепловыделяющих сборок ВОЯР, в частности таких, как ВВЭР, например при определении геометрических характеристик решеток ТВЭЛ, которые являются строго соответствующими вышеупомянутым характеристикам воды.

Напротив, использование вместо химически чистой воды суспензий (даже с незначительным содержанием ядер углерода) радикально влияет на вышеупомянутые свойства воды как замедлителя, что требует существенных изменений геометрии АкЗ, тепловыделяющих сборок, отражателя нейтронов и др. С учетом этого можно утверждать, что использование углеродсодержащих наножидкостей с фактически слабо изученными в настоящее время нейтронно-физическими свойствами способно радикально изменить не только характеристики ядерной безопасности ВОЯР, но также и физические параметры собственно процесса замедления, что может потребовать, например, изменения исходного уровня обогащения ядерного топлива.

Кроме того, наличие в наножидкостях атомов углерода может существенно повлиять на характеристики обратных связей по реактивности, которыми охвачен реактор. Как известно, негативное влияние реакторного излучения на атомы углерода заключается в наличии у этого химического элемента так называемого «эффекта Вигнера», согласно которому в результате облучения графита с флюенсом нейтронов на уровне  $10^{19}$  нейтрон/см<sup>2</sup> происходит накопление внутренней энергии, достигающее уровня 1,7 МДж/кг. Последующее внезапное выделение этой энергии приводит к почти мгновенному разогреву углеродсодержащего материала до уровня 1000 °С. Подобный разогрев частиц углерода, входящих в состав наножидкости, используемой в качестве теплоносителя первого контура, способен привести к возникновению нерегламентного предаварийного теплофизического процесса в ЯР типа ВВЭР, а именно его внезапного вскипания в АкЗ. Как известно [27], выделение энергии Вигнера в реакторах с графитовым замедлителем может иметь существенно более тяжелые последствия. Именно по этой причине имела место известная авария на графитовом реакторе в Уиндскейле (Великобритания) в 1957 г. Для предотвращения таких аварий ЯР с графитовым замедлителем, работающем при достаточно низких температурах, периодически подвергают контролируемому медленному нагреву с целью их радиационного отжига. Реализация такого отжига в условиях ЯР типа ВВЭР представляется трудноосуществимой.

В связи с изложенным подлежат рассмотрению также и фундаментальные теплофизические аспекты проблемы использования наножидкостей в качестве теплоносителя первого контура реакторов ВВЭР. Как известно, реакторные установки этого типа спроектированы именно на использование легкой воды также и в качестве теплоносителя с соответствующим ему термодинамическим циклом ЯЭУ. В соответствии с этим циклом расчетные уровни температуры на каждом его этапе имеют достаточно жесткие и весьма узкие диапазоны, продиктованные компромиссом целей энергетической эффективности и безопасности. Наиболее важно соблюдение этих диапазонов в АкЗ, где теплоотдающая поверхность циркониевых оболочек ТВЭЛ является весьма уязвимой и быстро разрушается при нерегламентных повышениях ее температуры, следствием чего является выход продуктов деления в первый контур циркуляции теплоносителя. В силу очевидной опасности этого вида повреждений ТВЭЛ явлениям кризиса теплоотдачи на их поверхности при вскипании теплоносителя уже более полувека уделяется пристальное внимание исследователей и разработчиков ЯР. В соответствии с расчетным термодинамическим циклом именно использование воды с регламентированными значениями температуры и давления на входе в парогенераторы обеспечивает их эффективную работу, в результате которой формируются приемлемые для работы влажнопарового турбоагрегата расчетные уровни давления, температуры и влажности водяного пара. Из изложенного следует, что даже в гипотетическом случае экспериментального подтверждения возможности существенного увеличения тепловой мощности ЯР путем использования в качестве теплоносителя вышеупомянутых наножидкостей реализация подобной комплексной модернизации основного оборудования существующих ядерных энергоблоков потребует проведения широкого спектра исследований и значительной реконструкции всей тепловой схемы ядерного энергоблока, включая необходимость соответствующего увеличения мощности парогенераторов, турбоагрегатов и других структурных элементов этого оборудования.

Вышеупомянутые данные [7, 8 и др.] о существенном (на 200 - 500 %) повышении уровня КТП на теплоотдающей поверхности за счет применения в качестве охлаждающей среды наножидкостей пока ограничены областью теплообмена при атмосферном давлении в условиях свободной конвекции на линейных модельных нагревателях, располагающихся в большом объеме охлаждающей наножидкости и не сопровождаются физически адекватными объяснениями. Условия большого объема практически по всем рабочим параметрам существенно отличаются от условий высокофорсированного теплообмена при вынужденном движении теплоносителя в АкЗ ВОЯР, которым, как свидетельствует накопленный в мире опыт лабораторных и натурных теплофизических исследований, присущ существенно иной характер протекания взаимосвязанных процессов гидродинамики и тепло-

обмена. Кроме того, практически не исследованной является область знаний, касающаяся теплофизических свойств перспективных наножидкостей не только в обычных условиях, но также и в требуемом диапазоне изменения основных физических параметров, таких как температура и давление.

С другой стороны, имеются серьезные опасения относительно надежности оценок достигаемых при использовании наножидкостей уровней КТП. Подобная осторожность продиктована тем, что эти оценки, на наш взгляд, являются недостаточно обоснованными и не могут считаться надежными. Сложность данной проблемы может быть проиллюстрирована далее на примере результатов подробного анализа данных многочисленных отечественных и зарубежных исследований КТП в условиях большого объема при возникновении кризиса теплоотдачи 1-го рода на теплоотдающей поверхности, приведенного в нашей недавней монографии [28]. Согласно неопровержимо установленным данным, достигнутый в указанных экспериментальных исследованиях уровень КТП в решающей степени определяется выбранным при исследованиях методом фиксации этого физического явления. Наиболее часто используемые для этой цели методы включают: визуальную фиксацию начала разрушения поверхности теплосъема; фиксацию резкого повышения ее температуры; фиксацию перестройки структуры двухфазного пристеночного слоя; оценку начала разбаланса фиксирующей мостовой измерительной схемы и др. При этом зарегистрированные уровни КТП в зависимости от выбранного при экспериментах метода идентификации кризиса теплоотдачи у разных авторов могут отличаться на 200 - 500 %.

Основные положения и результаты упомянутого анализа определяющих физических особенностей кризиса теплоотдачи при кипении [28] кратко могут быть представлены следующим образом.

Экспериментально установлено, что тонкая пленка жидкости на теплоотдающей поверхности сохраняется вплоть до наступления кризиса теплоотдачи. В силу этого физического эффекта распределение истинного паросодержания в пристенном слое при тепловых потоках, близких к КТП, находится в полном противоречии с основными положениями широко использовавшейся ранее и даже сейчас гидродинамической теории кризиса.

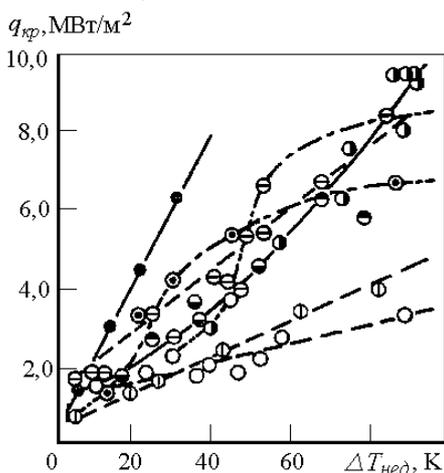
Физически обоснованной альтернативой известному гидродинамическому подходу следует считать современную модель кризиса теплоотдачи, в основу которой положен анализ динамики роста сухих пятен как непосредственной причины кризиса. Применение совершенной измерительной техники, включающей средства прецизионной кинофотосъемки для визуализации процесса кипения в условиях большого объема, позволило ряду зарубежных авторов доказать существование макрослоя - ранее неизвестного элемента структуры двухфазного пристенного слоя и кипящей поверхности. Было установлено, что, наряду с жидкостным микрослоем, который формируется у основания растущего парового пузыря и испаряется в его полость, существует также и тонкая пристенная пленка жидкости с инкорпорированными в ее структуру основаниями паровых пузырей (макрослой). Признание факта существования макрослоя позволило также дать четкую физическую интерпретацию данным экспериментов, выполненных с просвечиванием поверхности кипения пучком элементарных частиц, в результате которых была впервые обнаружена зона с максимальным объемным паросодержанием в верхней части двухфазного кипящего слоя непосредственно над пристенной областью, выделяющейся минимальным содержанием пара.

Важными для понимания механизмами кризиса теплоотдачи представляются также и данные работ, в которых впервые была получена количественная информация о доле смоченной жидкостью площади поверхности нагрева. Согласно этим данным, даже при достижении КТП доля сухих пятен обычно не превышает 10...13 % площади поверхности нагрева, а в режиме начала возникновения паровых пленок над первыми сухими пятнами на эти несмоченные участки поверхности приходится только единицы или даже доли процента ее площади.

Для случаев кипения в большом объеме, а также в условиях принудительной циркуляции теплоносителя было установлено, что максимум теплоотдачи достигается именно в условиях, когда в макрослое начинают возникать несмоченные жидкостью сухие пятна и формирующиеся над ними в двухфазном пристенном слое локальные нестабильные паровые пленки. Таким образом, с позиций экспериментально обоснованных модельных представлений режим нестабильного пленочного кипения и, следовательно, кризис теплоотдачи следует рассматривать именно как результат последовательной трансформации пузырьковой структуры двухфазного пристенного слоя.

В основу близкой к этим реальным физическим эффектам более ранней тепловой модели кризиса, которая также основана на анализе роста сухих пятен на теплоотдающей поверхности, положен механизм пузырькового кипения и представление о возникновении кризиса в условиях предельного насыщения теплоотдающей поверхности центрами парообразования. Согласно этой модели, харак-

терная для пузырькового кипения высокая интенсивность теплоотдачи потока достигается при предельном заполнении теплоотдающей поверхности паровыми пузырями. Таким образом, эта модель исходит из предположения о кризисе теплоотдачи как о предельном насыщении теплоотдающей поверхности центрами парообразования. Согласно ряду известных экспериментальных данных, плотность теплового потока, реально соответствующей критическому значению, является тепловой поток начала перехода к режиму нестабильных паровых пленок. Такое понимание кризиса теплоотдачи принципиально отличает его от гидродинамического подхода к оценке КТП, согласно которому в кризисных условиях теплоотдающая поверхность уже разрушается вследствие пережога. Именно такой традиционный подход к фиксации КТП использует подавляющее большинство исследователей КТП. При этом необходимо также отметить следующий общий недостаток большинства расчетных зависимостей по КТП, полученных на основе гидродинамической модели кризиса теплоотдачи, которая трактует кризис теплоотдачи как физическое состояние поверхности кипения при уже развившейся паровой пленке. При обработке опытных данных авторы, ввиду отсутствия надежных технических средств идентификации критического теплового потока, были вынуждены использовать значения плотности теплового потока, фактически относящиеся к иному тепловому состоянию поверхности, а именно к переходу в режим стабильного пленочного кипения и ее разрушения вследствие пережога. Именно по этой причине расчетные зависимости, полученные на основе гидродинамической модели кризиса, дают существенно завышенные значения КТП. При этом значительное расхождение результатов эксперимента с расчетами представляется вполне закономерным, поскольку расчетные соотношения, полученные в рамках гидродинамического подхода, фактически характеризуют условия сохранения устойчивости уже сформировавшейся стабильной паровой пленки. Иными словами, эти соотношения соответствуют условиям пережога теплоотдающей поверхности и фактически не могут описывать явление кризиса теплоотдачи как процесс перехода от пузырькового кипения к пленочному.



Таким образом, анализ существующих в настоящее время подходов к трактовке механизма кризиса теплоотдачи свидетельствует о значительном расхождении современных модельных представлений об этом явлении даже для наиболее простых условий кипения в большом объеме. Наглядной иллюстрацией этого могут служить упомянутые выше и представленные на рис. 4 [28] зависимости КТП от недогрева теплоносителя, полученные различными исследователями. Как следует из сопоставления, имеет место значительное (200...500 %) расхождение данных, полученных различными авторами.

Рис. 4. Зависимость КТП от недогрева воды при ее кипении в экспериментах различных исследователей.

Представленное на рис. 4 рассогласование данных по КТП является типичным для большинства подобных современных исследований. В числе основных причин этой ситуации следует назвать не только отсутствие единого физического представления о том, что считать кризисом теплоотдачи при кипении, но также и использование в работах различной (в ряде случаев весьма несовершенной) методики фиксации КТП.

Таким образом, анализ современных негидродинамических модельных подходов к кризису теплоотдачи при кипении позволяет заключить, что модель, основанная на экспериментально установленном факте существования макрослоя, в настоящее время является наиболее физически обоснованной. В этой связи тем не менее следует отметить, что динамика роста и деградации паровых пленок является стохастическим процессом, подчиняющимся вероятностным закономерностям, которые также должны быть учтены при создании эмпирических зависимостей, которые основываются на вышеуказанной физической модели макрослоя. В этом отношении показателем и стохастический характер пульсаций основных теплогидравлических параметров двухфазного парожидкостного потока в предкризисной области, представленный на рис. 5 [28] для кольцевого парогенерирующего канала. Из рисунка следует, что наличие интенсивных пульсаций паросодержания в предкризисной области существенно затрудняет визуальное определение даже такого важного параметра, как недогрев теплоносителя, без надежной фиксации которого адекватная экспериментальная зависимость (см. рис. 4) не может быть получена.

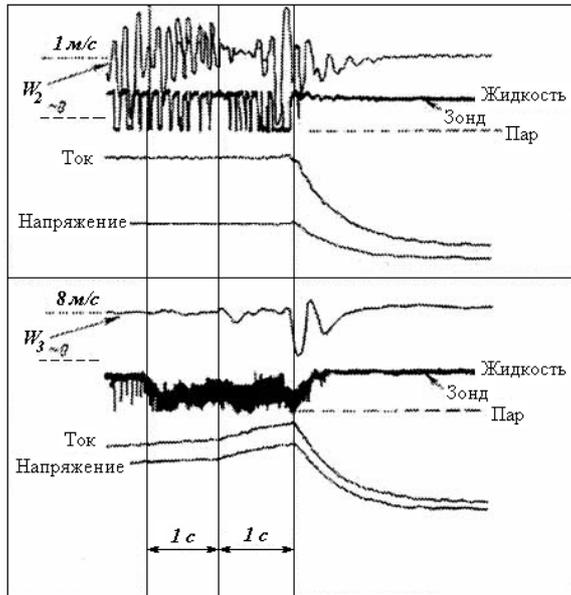


Рис. 5. Результаты синхронной фиксации скорости теплоносителя, паросодержания и нагрузки в электрообогреваемом канале.

Переходя к рассмотрению технических, организационных и кадровых проблем обеспечения указанного перспективного направления работ в области повышения безопасности украинских АЭС, необходимо отметить следующее. Как следует из вышеизложенного, определенный прогресс, достигнутый за прошедшие полвека в понимании физики сложных теплогидродинамических процессов, протекающих в каналах АкЗ ВОЯР в условиях высокой температуры и давления, в значительной степени опирается на фундаментальные исследования процесса кипения воды и других жидкостей в большом объеме, а также при вынужденной циркуляции теплоносителя. Однако и в этой достаточно глубоко

исследованной области теплообмена в АкЗ ВОЯР имеется значительное количество проблемных вопросов (часть из них рассмотрена выше), не получивших к настоящему времени общепризнанного адекватного объяснения. Указанные явления (например, термоакустическая неустойчивость потока [28]) в большинстве случаев являются причиной периодического возникновения на АЭС мира потенциально опасных аварийных ситуаций.

Изложенное позволяет заключить, что реализацию предложений о применении наножидкостей в качестве теплоносителя первого контура реакторов типа ВВЭР на действующих АЭС Украины на данном этапе следует считать органической частью значительного комплекса неотложных работ в области повышения безопасности действующих и проектируемых АЭС. В этой связи относительно перспективных предложений о выполнении широкой программы стендовых лабораторных исследований теплогидравлических процессов и, в особенности, кризисов теплоотдачи при кипении наножидкостей в каналах АкЗ ВОЯР можно высказать следующие соображения.

Как известно, большинство весьма сложных и дорогостоящих лабораторных экспериментальных исследований КТП, выполнявшихся в ряде ведущих ядерных научных центров бывшего СССР, директивно планировалось, координировались, щедро финансировались, а также материально-технически бесперебойно обеспечивались военно-промышленным комплексом. Научно-технические организации Украины - НТУУ «КПИ», ИТТФ НАН Украины, НТУ «ОПИ» и Севастопольский НТУ ядерной технологии и промышленности - участвовали в указанных работах и имели соответствующие теплогидравлические стенды (два последних из них, Одесский и Севастопольский, обладали, однако, малой мощностью и не обеспечивали высоких давлений). Наиболее мощным и многопрофильным в их числе являлся стенд НТУУ «КПИ», который до недавнего времени обеспечивал (единственный в странах бывшего СССР) возможность проведения исследований при до- и сверхкритическом давлении теплоносителя ( $> 22,5$  МПа), располагая электрической мощностью 4 МВт. В настоящее время приходится, к сожалению, констатировать, что указанный стенд за последние несколько лет был полностью демонтирован и фактически перестал существовать. Единственным сохраненным в законсервированном виде стендом (электрическая мощность 2 МВт, давление до 20 МПа) располагает ИТТФ НАН Украины. Указанный стенд, созданный в 50 - 60-е годы под руководством академика В. И. Толубинского, представляет собой трубный замкнутый контур высокого давления, в котором принудительно циркулирует водяной теплоноситель. Основным элементом стенда является сменный вертикальный рабочий участок с восходящим потоком теплоносителя, в пределах которого имитируется тепловыделение в одиночных каналах АкЗ различной геометрии путем их прямого электронагрева. С учетом вышеуказанной (относительно небольшой) электрической мощности стенда длина его типичного рабочего участка (семистержневая сборка тепловых имитаторов ТВЭЛ) не может превышать 1 м. Следует отметить, что указанная длина экспериментального канала является типичной для высоты АкЗ транспортных ВОЯР, что не позволяет надежно экстраполировать результаты исследований по КТП в указанных каналах для расчета параметров эксплуатационной безопасности полномасштабных натуральных сборок энергетических реакторов типа ВВЭР-440, ВВЭР-1000, которые находятся в эксплуатации на АЭС Украины. Естественно, что указанные эксперименты проводились

в диапазонах параметров, соответствующих реальным условиям теплоотдачи с поверхности ТВЭЛ в энергетических ВОЯР. В каждом опыте по определению величины КТП значение удельной мощности, отдаваемой воде с поверхности теплосъема (или входной энтальпии теплоносителя), постепенно повышалось от нуля до момента возникновения кризиса теплоотдачи, в большинстве случаев сопровождавшегося разрушением (пережогом) рабочего участка. Соответствующие массивы экспериментальных данных по критическим тепловым потокам были получены путем одновременной регистрации комплекса режимных параметров в момент фиксации предельной тепловой нагрузки поверхности теплового имитатора ТВЭЛ (на основе одного из вышеуказанных методов обнаружения кризиса теплоотдачи, например по броску температуры). В проведении экспериментов и последующей обработке, а также интерпретации их результатов были задействованы многочисленные коллективы высококвалифицированных специалистов. В этой связи следует, однако, с прискорбием констатировать, что подавляющего большинства руководителей и исполнителей этих работ в ИТТФ НАН Украины, а также в других организациях нашей страны практически не осталось в живых.

Кроме того, опыт последних лет показал, что вывод из консервации стенда, который не эксплуатировался более двух десятилетий, представляет собой достаточно сложную задачу в первую очередь по причине фактически полной утраты кадров специалистов, компетентных именно в области высокофорсированного теплообмена.

Следует особо отметить, что даже в случае восстановления подобного стенда и выполнения на нем широкой программы исследований кризисов теплоотдачи при кипении наножидкостей на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ результаты этих исследований практически не могут быть (в силу неправомерности геометрического моделирования в парогенерирующих каналах) распространены на типичную для современных реакторов ВВЭР длину их тепловыделяющих сборок. Поэтому с точки зрения повышения достоверности данных по КТП целесообразным представляется создание полномасштабного теплогидравлического стенда (электрической мощностью порядка 12 МВт), измерительная и регистрирующая часть которого использует новейшие информационные технологии. Следует отметить, что подобными стендами (включая Россию) располагают все страны, активно развивающие атомную энергетику. Указанное обстоятельство настоятельно предопределяет необходимость сооружения подобного полномасштабного теплогидравлического стенда большой мощности (подобный стенд уже проектировался и должен был быть введен в эксплуатацию в Украине в 80-е годы минувшего столетия) для эффективного научного сопровождения эксплуатации украинских АЭС. Не может вызывать сомнения также и тот факт, что разработка, создание, наладка и последующая эксплуатация подобного стенда большой мощности, требующего значительных интеллектуальных, материальных и финансовых ресурсов, не может быть реализована без целевой долговременной государственной поддержки. Кроме того, на этапе проектирования этого сложного экспериментального оборудования должен быть всесторонне учтен опыт создания и эксплуатации подобных стендов в ядерных исследовательских центрах других стран (США, Японии, Германии и России), что, естественно, диктует необходимость подготовки соответствующих межгосударственных соглашений, а также тесного международного сотрудничества на этой основе.

Из вышеизложенного следует, что в Украине при нынешнем состоянии исследований и экспериментальной базы НАН по соответствующему научному направлению, а также при весьма скромных возможностях со стороны государства обеспечивать на протяжении как минимум полутора десятков лет достаточное и устойчивое финансирование подобных работ их осуществление представляет собой задачу исключительной сложности. Решение этой задачи значительно осложняется также и практически полным отсутствием кадров исследователей и разработчиков требуемой квалификации. Ведущие технические университеты Украины, включая НТУУ «КПИ», решение кадровой проблемы, к сожалению, также не обеспечивают. Причина указанного обстоятельства состоит не только в процессе нарастающей деградации учебных планов, которые давно перестали соответствовать аналогичным унифицированным нормативным документам профильных российских технических университетов, но также и в значительном ослаблении за минувшие годы состава преподавательского корпуса, подавляющее большинство представителей которого не только не являются специалистами в области атомной энергетики, но также слабо знакомы с особенностями высокофорсированного теплообмена в штатных и аварийных режимах эксплуатации ВОЯР. Тем не менее значимость стоящих перед атомной энергетикой Украины задач по внедрению перспективных нанотехнологий и решению соответствующих проблем, связанных с повышением безопасности ядерных энергоблоков, позволяет проявить осторожный оптимизм и рассчитывать на то, что при условии активной государственной поддержки профильных институтов НАН Украины, а также при должном усилении их кадрового потен-

циала на основе назревшей реорганизации подготовки специалистов в ведущих технических университетах нашей страны успешное решение комплекса указанных проблем может быть обеспечено.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Handbook Springer of Nanotechnology* / В. Bharat (ed.). – Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2007. - 1916 p.
2. *Халатов А. А., Долинский А. А.* Нанотехнологии в энергетике и проблемы теплофизики // Пром. теплотехника. - 2010. - № 4. - С. 5 - 14.
3. *Дмитриев А. С.* Теплофизические проблемы наноэнергетики. Часть 1 // Теплоэнергетика. - 2010. - № 12. - С. 13 - 21.
4. *Дмитриев А. С.* Теплофизические проблемы наноэнергетики. Часть 2 // Теплоэнергетика. - 2011. - № 4. - С. 29 - 36.
5. *Халатов А. А.* Перспективные энергетические технологии и проблемы теплофизики. Часть 1 // Пром. теплотехника. - 2011. - № 1. - С. 5 - 18.
6. *Халатов А. А.* Перспективные энергетические технологии и проблемы теплофизики. Часть 2 // Пром. теплотехника. - 2011. - № 2. - С. 5 - 10.
7. *Wang L., Wei X.* Nanofluids: synthesis, heat conduction, and extension // *Journal of Heat Transfer*. - 131. - 2006. - P. 1 - 7.
8. *Das S., Choi U., Patel H.* Heat transfer in nanofluids - A Review // *Heat Transfer Engineering*. - 2006. - 27. - № 10. - P. 1 - 19.
9. *Бондаренко В. И., Святенко А. М., Котов В. Г. и др.* Технология получения углеродных нанотрубок с заданными свойствами // Междунар. науч.-техн. конф. «Энергоэффективность – 2010», 19 - 21 окт. 2010 г., Киев, Украина: Тез. докл. - С. 238 - 240.
10. *Bondarenko V. I., Komysch D. V., Sydorenko S. V. et al.* Specialized test unit for investigation of a critical heat flux with nanofluids boiling / Intern. Conf. Thermec'2011 August 1 - 5 "PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS". - Abstracts. - Quibec, Canada. - P. 186.
11. *Бондаренко В. И., Морару В. Н., Сидоренко С. В. и др.* Наножидкости для энергетики: влияние стабилизации на критический тепловой поток при кипении // ПЖТФ. - 2012. - Вып. 18.
12. *Experimental investigation of heat conduction mechanisms in nanofluids. Clue on clustering* / J. Gao, R. Zheng, H. Ohtani et al. // *Nano Letters*. - 2009. - Vol. 9, № 12. - P. 4128 - 4132.
13. *Choi S.* Nanofluids: from vision to reality through research // *J. Heat Transfer*. - 2009. - Vol. 131. - № 3. - 033106 (9 pages).
14. *Kahveci K.* Buoyancy driven heat transfer of nanofluids in a tilted enclosure // *J. Heat Transfer*. - 2010. - Vol. 132, № 6. - 062501 (12 pages)
15. *Chandrasekar M., Suresh S.* A review on the mechanisms of heat transport in nanofluids // *Heat Transfer Engng.* - 2009. - Vol. 30 (14). - P. 1136 - 1150.
16. *Kakac S., Pramuanjaroenkij A.* Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. - 2009. - Vol. 52 (1344). - P. 3187 - 3196.
17. *Ju Y., Kim J., Hung M.* Experimental study of heat conduction in aqueous suspensions of aluminum oxide nanoparticles // *J. Heat Transfer*. - 2008. - Vol. 130. - № 9. - 092403 (6 pages).
18. *The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids* / M.P. Beck, Y. Yuan, P. Warner, A.S. Teja // *J. Nanopart. Res.* - 2009. - Vol. 11 (5). - P. 1129 - 1136.
19. *Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids* / W. Evans, R. Prasher, 3. Fish et al. // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. - 2008. - Vol. 51 (5 - 6). - P. 1431 - 1438.
20. *Keblinski P., Prasher R., Eapen J.* Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over? // *J. Nanopart. Res.* - 2008. - Vol. 10. - P. 1089 - 1097.
21. *Дмитриев А. С.* Об описании течений наножидкостей в скрученных нанотрубках и полых нанопроволоках // *Тепловые процессы в технике*. - 2009. - Т. 1. - № 6. - С. 218 - 221.
22. *US Patent 2008/0212733 A1 (376/282)* - Nuclear power plant using nanoparticles in emergency systems and related method. - Filed on March 2, 2007. Published on September 4, 2008.
23. *US Patent 2008/0219396 A1 (376/282)* - Nuclear power plant using nanoparticles in closed circuits emergency systems and related method. - Filed on March 2, 2007. Published on September 11, 2008.
24. *A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids* / J. Buongiorno, D. Venerus, N. Prabhat et al. // *J. Appl. Phys.* - 2009. - Vol. 106, № 9. - 094312 (14 pages).
25. *Measurement of key pool boiling parameters in nanofluids for nuclear applications* / I. Bang, J. Buongiorno, L. Hu, H. Wang // *J. Power & Energy Systems*. - 2008. - Vol. 2, № 1. - P. 340 - 351.
26. *Wen D.* On the role of structural disjoining pressure to boiling heat transfer of thermal nanofluids // *J. Nanopart. Res.* - 2008. - № 10. - P. 1129 - 1140.
27. *Теплофизика аварий ядерных реакторов: монография* / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012. - 528 с.

28. *Теплофизика безопасности атомных электростанций* : монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фялко и др. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. – 484 с.

**О. О. Ключников, І. Г. Шараєвський, Н. М. Фялко, Л. Б. Зимін**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, корп. 106, Київ, 03028, Україна*

### **ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ АЕС НА ОСНОВІ НАНОТЕХНОЛОГІЙ**

Розглянуто основні напрямки застосування сучасних високотехнологічних розробок у галузі нанотеплофізики для підвищення безпеки атомних електричних станцій. Виконано аналіз можливостей практичного використання ефективних нанотехнологій для атомної енергетики. Розглянуто комплекс проблемних питань, пов'язаних із використанням нанорідин як теплоносія для найбільш відповідального устаткування атомної електростанції. У числі цього устаткування розглянуто перший контур водоохолоджуваного ядерного реактора, а також систему його аварійного охолодження. Виконано аналіз основних проблем, які пов'язані з визначенням критичного теплового потоку при кипінні рідини на робочій поверхні. Із цих позицій оцінено відомі результати стосовно даних про критичний тепловий потік при використанні нанорідин. Розглянуто основні задачі перспективних досліджень у галузі нанотеплофізики.

*Ключові слова:* нанорідини, безпека АЕС, водоохолоджуваний ядерний реактор, критичний тепловий потік.

**A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharayevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, 12, Lysogirska Str., Kyiv, 03680, Ukraine*

### **THE PROSPECTS OF IMPROVING NUCLEAR POWER STATION'S SAFETY BASED ON NANOTECHNOLOGY**

The article describes the main areas of application of modern high-tech developments in nanothermophysics to improve the safety of nuclear power plants. Performed an analysis of the possibilities of practical applications of efficient nanotechnology for nuclear energy. The article describes the complex issues of concern with the use of nanofluids as a coolant for the most critical equipment of nuclear power plants. It's examined among these equipment the first line of water-cooled nuclear reactor, as well as its emergency cooling system. Performed an analysis of the main issues that relate to the definition of the critical heat flux at boiling liquid on the work surface. From these positions, evaluated the known results on the data of the critical heat flux using nanofluids. In this article was given the main tasks of advanced research in nano-thermal physics for increase nuclear power plant safety in Ukraine.

*Keywords:* nanofluids, nuclear power plant safety, water-cooled nuclear reactor, critical heat flux.

### **REFERENCES**

1. *Handbook Springer of Nanotechnology* / B. Bharat (ed.). – Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2007. – 1916 p.
2. *Khalatov A. A., Dolynsky A. A. Nanotechnologies in power engineering and thermophysics problems // Promyshlennaya Teplonechnika. - 2010. - № 4. - P. 5 - 14. (Rus).*
3. *Dmytriev A. C. Thermophysical problems of nanopower. Part 1 // Teploenergetika. - 2010. - № 12. - P. 13 - 21. (Rus).*
4. *Dmytriev A. C. Thermophysical problems of nanopower. Part 2 // Teploenergetika. - 2011. - № 4. - P. 29 - 36. (Rus).*
5. *Khalatov A. A. Perspective power technology and thermophysics problems. Part 1 // Promyshlennaya Teplonechnika. - 2011. - № 1. - P. 5 - 18. (Rus).*
6. *Khalatov A. A. Perspective power technology and thermophysics problems. Part 2 // Promyshlennaya Teplonechnika. - 2011. - № 2. - P. 5 - 10. (Rus).*
7. *Wang L., Wei X. Nanofluids: synthesis, heat conduction, and extension // Journal of Heat Transfer. - 131. - 2006. - P. 1 - 7.*
8. *Das S., Choi U., Patel H. Heat transfer in nanofluids - A Review // Heat Transfer Engineering. - 2006. - 27. - № 10. - P. 1 - 19.*
9. *Bondarenko B. I., Sviatenco A. M., Kotov V. G. et al. Technology of carbon nanopipes with adjusted properties / Int. sci-tech. conf. «Power efficiency - 2010». - Oct. 2010, Kiev, Ukraine. Abstracts. - P. 238 - 240. (Rus).*
10. *Bondarenko B. I., Komysch D. V., Sydorenko S. V. et al. Specialized test unit for investigation of a critical heat flux with nanofluids boiling / Intern. Conf. Thermec'2011 August 1 - 5 "Processing & Manufacturing of Advanced Materials". - Abstracts. - Quibec, Canada. - P. 186.*
11. *Bondarenko B. I., Moraru V. N., Sydorenko S. V. et al. Nanofluids for Power: Influence of stabilization at the boiling CHF // PJTF. - 2012. - Vol. 18. (Rus).*

12. *Experimental investigation of heat conduction mechanisms in nanofluids. Clue on clustering* / J. Gao, R. Zheng, H. Ohtani et al. // *Nano Letters*. - 2009. - Vol. 9. - № 12. - P. 4128 - 4132.
13. *Choi S. Nanofluids: from vision to reality through research* // *J. Heat Transfer*. - 2009. - Vol. 131. - № 3. - 033106 (9 pages).
14. *Kahveci K. Buoyancy driven heat transfer of nanofluids in a tilted enclosure* // *J. Heat Transfer*. - 2010. - Vol. 132. - № 6. - 062501 (12 pages)
15. *Chandrasekar M., Suresh S. A review on the mechanisms of heat transport in nanofluids* // *Heat Transfer Engng.* - 2009. - Vol. 30 (14). - P. 1136 - 1150.
16. *Kakac S., Pramuanjaroenkij A. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids* // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. - 2009. - Vol. 52 (1344). - P. 3187 - 3196.
17. *Ju Y., Kim J., Hung M. Experimental study of heat conduction in aqueous suspensions of aluminum oxide nanoparticles* // *J. Heat Transfer*. - 2008. - Vol. 130. - № 9. - 092403 (6 pages).
18. *The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids* / M. P. Beck, Y. Yuan, P. Warner, A. S. Teja // *J. Nanopart. Res.* - 2009. - Vol. 11 (5). - P. 1129 - 1136.
19. *Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids* / W. Evans, R. Prasher, Z. Fish et al. // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2008. - Vol. 51 (5 - 6). - P. 1431 - 1438.
20. *Kebllinski P., Prasher R., Eapen J. Thermal conductance of nanofluids: is the controversy over?* // *J. Nanopart. Res.* - 2008. - Vol. 10. - P. 1089 - 1097.
21. *Dmytriiev A.C. Description nanoliquids flows in stranded nanopipes and hollow nanowires* // *Тепловыє Processy v Tekhnike*. - 2009. - Vol. 1. № 6. - P. 218 - 221. (Rus).
22. *US Patent 2008/0212733 A1 (376/282) - Nuclear power plant using nanoparticles in emergency systems and related method.* - Filed on March 2, 2007. Published on September 4, 2008.
23. *US Patent 2008/0219396 A1 (376/282) - Nuclear power plant using nanoparticles in closed circuits emergency systems and related method.* - Filed on March 2, 2007. Published on September 11, 2008.
24. *A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids* / J. Buongiorno, D.Venerus, N. Prabhat et al. // *J. Appl. Phys.* - 2009. - Vol. 106. - № 9. - 094312 (14 pages).
25. *Measurement of key pool boiling parameters in nanofluids for nuclear applications* / I. Bang, J. Buongiorno, L. Hu, H. Wang // *J. Power & Energy Systems*. - 2008. - Vol. 2. - № 1. - P. 340 - 351.
26. *Wen D. On the role of structural disjoining pressure to boiling heat transfer of thermal nanofluids*//*J. Nanopart. Res.* - 2008. - № 10. - P. 1129 - 1140.
27. *Thermophysic of Nuclear Reactors Damages: monography* / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al. - Chornobyl: NAS of Ukraine, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, 2012. - 528 p. (Rus).
28. *Thermophysic of Nuclear Power Plants Safety: monography* / A. A. Kliuchnykov, I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko et al. - Chornobyl: NAS of Ukraine, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, 2010. - 484 p. (Rus).

Надійшла 20.02.2013  
Received 20.02.2013