

УДК 544.54:539.2/.6:539./04

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**Т.Н.Агаев, Г.Т.Иманова***Институт радиационных проблем Национальной АН Азербайджана
AZ 1143, Баку, ул. Ф.Агаева, 9; e-mail: agayevteymur@rambler.ru*

Представлен обзор результатов исследований, разработок и использования наноматериалов в ядерной энергетике и технике. Приведены основные свойства наноструктурных материалов. Рассмотрены перспективы применения наноматериалов в ядерной энергетике, связанные с созданием наноструктурных материалов и покрытий конструкционных элементов АЭС (атомная электростанция) и будущих ТЯР (тепловой ядерный реактор) для увеличения показателей твердости и прочности, повышения коррозионной и радиационной стойкости.

Ключевые слова: наноматериалы, нанотехнология, ядерный топливный цикл, радиационная и коррозионная стойкость.

Ядерная энергетика является главным источником электрической и тепловой энергии и обеспечивает энергетическую независимость и безопасность каждой страны. Ядерная энергетика включает добычу и обогащение ядерного топлива, производство конструкционных материалов и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) для активной зоны ядерных реакторов, выгорание топлива в активной зоне ядерных реакторов и производство электроэнергии, переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), регенерацию, удаление и захоронение радиоактивных отходов (РАО). Эта многоотраслевая цепочка составляет замкнутый ядерный топливный цикл (ЯТЦ) [1,2].

В ядерной энергетике и ядерной промышленности очень важна проблема модернизации топливных и конструкционных материалов для активной зоны ядерных реакторов. К топливным материалам относится широкий круг урановых и трансураниевых элементов и их соединений. К конструкционным материалам ядерных реакторов принадлежат аустенитные, ферритные, ферритно-мартенситные и другие сорта сталей и сплавов, графитоуглеродные материалы, циркониевые сплавы, различные керамические материалы. Кроме того, важным является решение проблемы окончательного и надежного захоронения

отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), а также разработка новых квазистационарных методов переработки и минимизации жесткости нейтронного спектра ОЯТ. В связи с этим одной из задач является развитие фундаментальных и прикладных исследований в области радиационного материаловедения и радиационных технологий. При проведении таких исследований важной задачей является создание новых топливных и конструкционных материалов и новых методов анализа и контроля материалов.

Нанотехнологии в последнее время стали применяться практически во всех сферах новейших технологий и по сути дела превратились в междисциплинарную область науки и техники. В атомной отрасли нанотехнологии применялись еще до того, когда стали использовать приставку «нано», так как созданные топливные и конструкционные материалы во многом были основаны на качественном изменении свойств материалов при переходе в нанометрический диапазон размеров [3-5].

Целью настоящей работы является краткий обзор результатов исследований и последних разработок в области использования конструкционных и функциональных наноструктурных материалов в ядерной энергетике и технике.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Интерес к наноструктурным материалам (наноматериалам) и нанотехнологиям обусловлен рядом важных проблемных причин:

- нанотехнологии позволяют получить принципиально новые квантовые устройства и материалы с характеристиками, существенно превосходящими достигнутый уровень;

- нанотехнология объединяет знания и технику в области физики, химии, материаловедения, математики, биологии, медицины, компьютерной техники;

Термин «нанотехнология» означает совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами от 1 до 100 нм, хотя бы в одном измерении [3-5]. Соответственно объекты, содержащие структурные элементы, размеры которых хотя бы в одном измерении менее 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками, относят к наноматериалам. Термины «наноструктура», «нанокompозиты» относят к материалам, образованным совокупностью наночастиц определенного размера и состава, либо полученным введением наночастиц в какие-либо матрицы с образованием у объектов качественно новых свойств, связанных с проявлением наномасштабных факторов. К наноструктурам также относят макроскопические материалы, составляющими которых являются нанобъекты и наноразмерные элементы. Первичные образования из небольшого числа атомов (10^1-10^4) размером $0.1 \div 1$ нм относят к нанокластерам. Под наночастицами обычно подразумеваются промежуточные образования из атомов (молекул), малых молекулярных нанокластеров и имеющих характеристические размеры <100 нм. Физические и химические свойства кластера зависят от числа атомов в нём. Когда свойства кластера перестают

зависеть от числа атомов, можно считать, что в малом объёме получен макроскопический материал. Примером нульмерных наносистем, т.е. размеры, которых меньше 100 нм в трех измерениях, являются кластеры с числом атомов от 10 до 10^4 . Одномерными наноструктурами с размерами меньше 100 нм в двух измерениях являются, например, углеродные нанотрубки (УНТ) графена. [6]. Таким образом, в зависимости от размерности нанобъектов квантово-механические явления могут проявляться в трех, двух либо в одном направлении.

До определения наноструктур и наноматериалов и выделения их в особый класс уже существовали и применялись разнообразные материалы с ультрадисперсными частицами и наночастицами. Ультрадисперсные порошки металлов, сплавов, оксидов и полупроводников, а также эти вещества в объёмном состоянии, с зёрнами микронного размера, получили широкое применение. Таким образом, классификация материалов по размерному признаку при переходе от дисперсных и ультрадисперсных частиц, составляющих структуру материала, к наночастицам, вполне закономерна.

В наноструктурных материалах проявляются существенные отличия практически всех физических свойств по сравнению с макроскопическими или микроскопическими объектами. Основные проявления размерных эффектов заключаются в следующем:

- общая причина отличия свойств наносистем от свойств макроскопических систем - это сопоставимость размеров их структурных элементов с длиной волн коллективных возбуждений;

- уменьшение с размерами наноструктур времени протекания разнообразных процессов:

- большую роль в свойствах наноструктур играет туннельный эффект;

- кластер плавится при существенно более низкой температуре, чем массивное твёрдое

тело, и точка плавления не совпадает с точкой замерзания;

- кластеры могут иметь отрицательную теплоёмкость: при сообщении некоторого количества теплоты их температура падает за счёт перестройки структуры;

- доля поверхностных атомов увеличивается по мере уменьшения размеров частицы. Для наночастиц практически все атомы «поверхностные», поэтому их химическая активность очень велика,

- с уменьшением размера зерна возрастает роль поверхностей раздела,

- свойства поверхности в нанометрическом диапазоне отличаются от микроструктурной поверхности,

- размер кристаллитов сопоставим с длиной свободного пробега носителей при анализе кинетических явлений,

Для металлов влияние размера зерен нанометаллов и наносплавов на электронные свойства может проявляться лишь для очень малых кристаллитов или в очень тонких пленках.

Анализ эволюции структурно-фазового состояния металлических материалов, в частности изменения диаграмм состояния за счет размерных эффектов вызывает значительные трудности из-за недостатка ряда значений термодинамических параметров. Например, известно, что температура эвтектики в ряде систем снижается при размере зерен менее десятков нанометров, хотя надо учитывать, что расчеты носят оценочный характер в простейшем приближении регулярных растворов. Фазовые превращения в наночастицах оксидов в зависимости от размера могут отличаться за счет вклада упругой энергии, так в наночастицах ZrO_2 зафиксировано одновременное формирование моноклинной (область существования $T < 1440$ К) и тетрагональной ($T = 1440-2640$ К) модификации [7]. Изменение динамики колебаний атомов проявляется в изменении температуры плавления решеточной компоненты теплопроводности и связано с увеличением амплитуды колебаний атомов в нанокристаллах и появлением в фононном спектре дополнительных как низко-

частотных (смягчение спектра), так и высокочастотных мод. Обнаруженное повышение теплоемкости для наноматериалов обусловлено действием деформации при получении наночастиц. Уменьшение размеров кристаллитов приводит к уменьшению характеристической температуры. Изменение фононного спектра наноматериалов проявляется и в уменьшении температуры плавления, что установлено для многокомпонентных систем. В однородных однокомпонентных наноматериалах при температурах близких к температуре плавления происходит интенсивная кристаллизация и наноструктура исчезает [7].

Изучение механических свойств наноматериалов (твердости, прочности, пластичности, параметров упругости) исключительно важно для решения проблем разработки конструкционных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. Механизм деформации наноматериалов неясен. С одной стороны, твердость, прочность, пластичность, относительное удлинение макроскопических твердых тел состоящих из наночастиц являются структурно чувствительными параметрами, зависящими от размера зерен, размера частиц порошка при горячем прессовании и т.д. Твердость закономерно увеличивается при уменьшении размера зерна таких наноматериалов, прочность и особенно пластичность наноматериалов в целом значительно снижаются за счет трещинообразования при наличии в структуре нарушений сплошности и пор, которые и приводят к зарождению трещин. Рост твердости металлических наноматериалов может достигать 600%, хрупкие материалы повышают твердость до 300%. Заметим, что значение модуля упругости наноматериалов с малой долей поверхности практически не отличается от модуля крупномасштабных материалов. Так как разрушение макроскопических материалов с наноструктурными элементами носит интеркристаллитный характер, практически не оправдались ожидания повышения пластичности охрупчиваемых материалов

при создании таких наноструктур. Длина трещин в монокристаллах и отдельных зернах наноструктур мало отличается, поэтому вязкость разрушения после достижения своего максимального значения может уменьшаться при уменьшении размера зерна. Таким образом, нанокристаллические материалы являются примером зависимости физико-химических свойств от размера структуры в наномасштабе. В последние десятилетия выяснилось, что когда средний размер зерна в поликристаллическом материале становится меньше 100 нм, свойства ультрадисперсных и нанокристаллических материалов существенно изменяются. Особенно большие изменения возникают для материалов с размером зёрен менее 10 нм.

Поэтому, с другой стороны, при создании наноструктур в чистом виде с характерными размерами хотя бы в одном направлении менее 100 нм, нанокристаллические материалы демонстрируют одновременно высокую прочность и пластичность. Даже нанокристаллическая керамика пластична при низких температурах. Именно в связи с этими противоречиями по имеющейся классификации дисперсные и ультрадисперсные материалы разделяют на макроскопические (крупнозернистые), микроскопические (субмикрокристаллические) и нанокристаллические.

Отдельный класс составляют аморфные сплавы или металлические стёкла, получаемые при быстром охлаждении расплава. Характер связей в

металлических стёклах сохраняется. Аморфные сплавы, как и нанокристаллические, по ряду характеристик превосходят свои кристаллические аналоги. Прочность примерно вдвое больше прочности стали, ударная прочность – втрое. Вязкость возрастает с увеличением скорости деформации.

Некоторые металлические стёкла имеют повышенную коррозионную стойкость и высокую износостойкость, некоторые – очень малый коэффициент теплового расширения. Проводимость может быть в несколько раз ниже проводимости железа. Важным свойством аморфных сплавов на основе железа является низкий уровень электромагнитных потерь, что определяет их применение в сердечниках высокочастотных трансформаторов, магнитных усилителей, дросселей.

В данное время достаточно проблематично прогнозировать процессы формирования, эволюции и стабильности наноматериалов, в основном из-за недостатка однозначно интерпретируемых экспериментальных результатов и сложности расчетов. Тем не менее, переход к наноструктурным материалам способствует снижению энергии формирования дефектов, повышению диффузионной подвижности компонент, регулированию физикомеханических свойств, управлению структурно-фазовыми превращениями при образовании неравновесных фаз и сегрегаций. Все это позволяет широко использовать наноматериалы в ядерной энергетике и технике.

НАНОМАТЕРИАЛЫ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Области применения нанотехнологий в атомной энергетике весьма многообразны и охватывают практически весь круг проблем ядерного топливного цикла и создаваемого термоядерного цикла [1 -13]:

- создание нового высокоплотного ядерного топлива с нанодобавками, топливных композиций для тепловыделяющих сборок активной зоны АЭС;

- исследование и разработка материалов для быстрых реакторов и будущих реакторов 4-го поколения;

- исследование радиационно-индуцированной микроструктуры;

- микроструктурные предсказания возможности продления срока эксплуатации реакторов: корпуса (охрупчивание);

- внутрикорпусные стали (распухание), наномембраны и нанофильтры для технологий обращения с ОЯТ и РАО,
- керамические материалы для дожигания радиолитического водорода,
- разработка метрологического обеспечения использования конструкционных и функциональных устройств на основе наноматериалов для ядерных установок.
- мультимасштабное моделирование наноструктур, материалов и процессов.
- исследование и разработка материалов будущих термоядерных реакторов. Наноструктурированные материалы blankets и первой стенки ТЯР;

- наноструктурные сверхпроводники (низко- и высокотемпературные сверхпроводники) для магнитов ИТЭР.

При реализации указанных проблем разрабатываются опытно-промышленные технологии получения функциональных веществ и изделий с использованием нанотехнологий и наноматериалов для ядерной, термоядерной, водородной и обычной энергетики, медицинских препаратов. Рассмотрим некоторые результаты исследования и разработок наноструктурных материалов в ядерной энергетике

ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО С НАНОМЕТРИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

Энергетическая стратегия предусматривает постепенный ввод новых ядерных энерготехнологий на быстрых нейтронах с замыканием ядерного топливного цикла с МОКС (уран-плутониевый оксидного топлива). Дальнейшее развитие атомной энергетики требует включения в структуру мощностей АЭС быстрых реакторов. Из всех типов быстрых реакторов промышленно освоенными на сегодня являются реакторы с натриевым теплоносителем (БН). Одним из условий повышения эффективности работы АЭС является увеличение глубины выгорания ядерного топлива. Для обеспечения глубоких выгораний топлива необходимо создание крупнокристаллических структур ядерного топлива с контролируемой пористостью. Крупнокристаллические структуры ядерного топлива удерживают газообразные и летучие продукты деления, препятствуют транспорту осколков деления по границам зерен к оболочке тепловыделяющего элемента, в результате чего существенно снижается повреждаемость оболочки тепловыделяющего элемента.

Исходное гомогенное состояние превратилось в упорядоченную структуру из новых фаз с периодом несколько нанометров. Образование в твердом растворе наноструктурной подрешетки кластеров ближнего упорядочения –

ловушек вакансий и интерстиций с периодом 5-10 нм, соизмеримой с длиной свободного пробега радиационных точечных дефектов является наиболее эффективным способом обеспечения радиационной стойкости. Этот интересный эффект, обеспечивающий высокие свойства реакторных материалов, обнаружен в некоторых сплавах. В отличие от обычной деградации свойств реакторных материалов, связанной с появлением хрупкости при радиационном воздействии, облучение этих сплавов приводит к увеличению характеристик прочности при сохранении вязкости при высокодозном облучении. Сплавы подобного класса уже используются для особо ответственных элементов ядерных реакторов: систем управления реакторов АЭС, конструкционных материалов активных зон транспортных реакторов нового поколения. Обнаруженный эффект исследуется применительно к другим системам, и похоже, что это явление может явиться началом развития нового направления радиационного материаловедения.

Диоксид циркония (ZrO_2) является одним из материалов, которые находят широкое применение в науке и технике. ZrO_2 используется при изготовлении топливных ячеек атомных реакторов, которые преобразуют химическую энергию в электрическую. Топливные ячейки

работают при достаточно высоких температурах. Применение диоксида циркония для топливных элементов вызвано его высокой ионной проводимостью, которая обусловлена переносом анионной кислородной вакансии. Для того чтобы обеспечить их высокие качества используют порошки диоксида циркония наноразмерных частиц. Наноразмерные системы во многом отличаются от обычных монокристаллических систем. Поэтому

изучение их свойств под влиянием γ – излучения представляет практический и научный интерес.

В [14-16] с целью выявления влияния диоксида циркония на радиолитическое разложение воды исследована кинетика накопления молекулярного водорода при радиолитическом разложении воды в системе $ZrO_2 + H_2O$ при $T=300K$, $\rho_{H_2O}=5\text{мг/см}^3$ и $D=0.33\text{Гр/с}$.

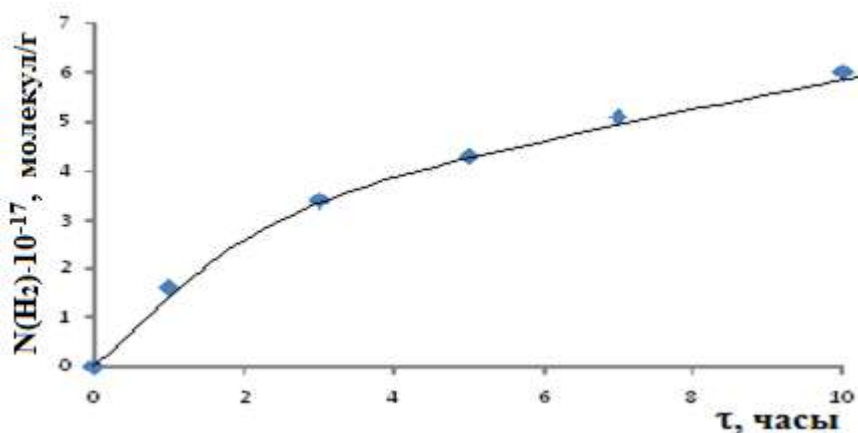


Рис. 1. Кинетическая кривая накопления молекулярного водорода при радиолитическом разложении воды в присутствии нано- ZrO_2 при $T=300K$, $\rho_{H_2O} = 5 \text{ мг/см}^3$, $D=0.33\text{Гр/сек}$.

На основе кинетической кривой определены значения скорости процесса и радиационно-химического выхода молекулярного водорода $G(H_2)$, (рис.1), рассчитанные на энергию поглощенную водой. При этом выявлено, что радиационно-химический выход молекулярного водорода $G(H_2)$ при $T=300K$ равен 2.14 молекул/ 100эВ , т.е. больше чем для чистой воды, для которой $G(H_2) = 0.45$ молекул/ 100эВ . Наблюдаемый прирост значений $G(H_2)$ при радиолитическом разложении воды в присутствии ZrO_2 по сравнению с выходом радиолитической чистой воды может быть объяснен вкладом эмитированных из ZrO_2 при воздействии γ – квантов δ -электронов и образованием на поверхности оксида металла активных центров разложения воды. В условиях работы ядерных реакторов конструкционные материалы (ZrO_2) подвергаются одновременному воздействию температуры и радиации в контакте с теплоносителем. Поэтому с целью выявления законо-

мерностей радиационных, радиационно-термических процессов в контакте теплоносителя с нанопорошком ZrO_2 , который является материалом ядерных реакторов с водяным охлаждением, исследована кинетика накопления молекулярного водорода под действием γ -излучения при различных температурах. С целью выявления вклада радиационно-гетерогенных процессов в радиационно-термические гетерогенные процессы в идентичных условиях проведены радиационно-термические и термические процессы разложения воды при $T=373K$, $\rho_{H_2O}=5\text{мг/см}^3$ и $D=0.33\text{Гр/с}$ (рис.2). На основе начальных линейных участков экспериментальных кинетических кривых определены значения скоростей $W_{\text{рт}}(H_2)$ и $W_{\text{т}}(H_2)$. Скорость радиационной составляющей $W_{\text{р}}(H_2)$ радиационно-термического процесса накопления водорода определена из разницы скоростей радиационно-термических процессов

$$W_p(\text{H}_2) = W_{\text{пр}}(\text{H}_2) - W_{\text{т}}(\text{H}_2).$$

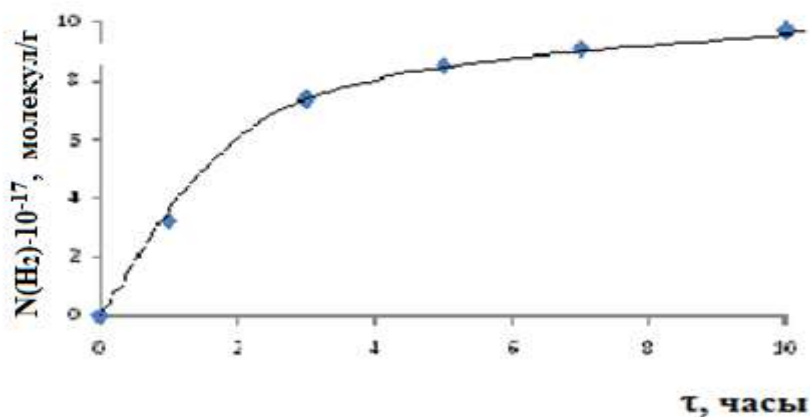


Рис. 2. Кинетическая кривая накопления молекулярного водорода при радиолизе воды в присутствии нано- ZrO_2 при $T=373\text{K}$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 5 \text{ мг/см}^3$, $D=0,33\text{Гр/сек}$.

Полученные результаты показывают, что повышение температуры от 300 до 373K обуславливает увеличение радиационно-химического выхода молекулярного водорода от 2.14 до 4.58 молекул/100эВ.

Наблюдаемый прирост радиационно-химического выхода молекулярного водорода с температурой свидетельствует о влиянии температуры на процесс переноса энергии в системе $\text{ZrO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

ВЫВОДЫ

Из приведенных результатов видно, что наноструктурные материалы приобретают важную роль в атомной энергетике как конструкционные и функциональные материалы практически на всех стадиях ядерного топливного цикла. Чрезвычайно важным является образование в наноструктурных материалах после облучения упорядоченной наноструктуры из новых фаз с периодом в несколько нанометров, способствующей сохранению свойств материалов при высокодозном облучении. Обнаруженное явление может явиться началом развития нового направления радиационного материаловедения – создание конструкционных материалов, «положительно» реагирующих на фактор радиационного воздействия.

Перспективы применения нанотехнологий в ядерной энергетике связаны с созданием наноструктурных материалов и покрытий конструкционных элементов АЭС и будущих ТЯР с целью повышения твердости, коррозионной и радиационной стойкости. Этот путь лежит в глобальном

направлении создания конструкционных материалов, упрочненных высодисперсными неметаллическими частицами (наночастицами) и предназначенными для элементов активных зон перспективных ядерных реакторов.

Другие применения нанотехнологий в энергетике: солнечные батареи, химические преобразователи энергии, новые источники хранения энергии, реакторы по переработке углеводородного сырья в водородное топливо, накопители водорода (нанотрубки). Переход к наноструктурным материалам позволит создавать для ядерной энергетике материалы с качественно новыми свойствами и создавать новые направления разработок энергетического оборудования. Поэтому актуальной задачей является ускоренное развитие работ в области нанотехнологий и наноматериалов, призванное обеспечить реализацию экономической стабильности и инновационные преобразования промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.:ИЦ «Академия». 2005. 192с.
2. Elias D. C., Nair R. R., Mohiuddin T. M. G. et al. Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane. // Science. 2009. Vol. 323. P. 610–613.
3. Рисованный В.Д., Святкин М.Н., Бычков А.В. Исследовательские реакторы для материаловедческого комплекса ОАО ГНЦНИИАР для реализации инновационных проектов атомной энергетики России и Украины. /Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества: материалы совместного совещания семинара РАН и НАНУ: 21-23 октября 2008 г., ЛОК «Колонтаево» (г. Электросталь). М.: Наука. 2009. С.311-323. 23.
4. Kirichenko V.G, Kuklin V.M. The Formation of the Multiscale Structures on the Crystal Surfaces and Conversion of Crystals under Phase Transformations. // Электронная микроскопия и многомасштабное моделирование материалов (EMMM2007). Москва, 3-7 сентября. 2007. Институт кристаллографии РАН. Москва. 2007.
5. Кириченко В.Г., Мельникова Е.С. Особенности структуры нанометрических поверхностных слоев графита. // Вісник Харківського національного університету. № 878. - Сер. фізична "Ядра, частинки, поля". 2009. Вип. 4/44/. С. 79 –85.
6. Путилов А.В. Разработки ФГУП ВНИИНМ в области нанотехнологий и наноматериалов для атомной отрасли. // Российские нанотехнологии. 2007. Т.2. № 9-10. С. 6-11.
7. Сугробов Д.Н., Яковлев Р.М., Мясоедов Б.Ф. Торий-урановый топливный цикл для тепло- и электроэнергетики. // Радиохимия. 2007. Т.49. №5. С.385-392.
8. Леонтьева-Смирнова М.В., Агеев В.С., Буданов Ю.П. и др. Конструкционные материалы активных зон российских быстрых реакторов. Состояние и перспективы. // Тр. 18-й Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 8-13 сентября 2008, Алушта, Харьков, «Талант-Трейдінг». 2008. С. 6.
9. Dewilde L., Gedopt J., Delbrassine A. et al. // Proc.of the Inter. Conf. of Materials for Nuclear Reactor Core Application, Bristol. 1987. P.271-276.
10. Tian Yun, Shan Binguang, Liu Guangzu et al. An overview of several iron base oxide dispersion strengthened alloys for nuclear application. // Mater. for Advanced Energy Systems & Fission and Fusion Engineering / A.Kohuama et al. (Eds). Japan. Soc. Mater. Advanced Energy Systems, 1994. - P. 307-312.
11. Asano K., Kohno Y., Kohyama A. Microstructural evolution of an oxide dispersion strengthened steel under charged particles irradiation // J.Nucl.Mat. 1988. Vol.155-157. P. 928-934.
12. Carre F., Yvon P., Chair P. Innovative Reactor Systems and Requirements for Structural Materials. Workshop on SMINS, Karlsruhe, Germany, June 4-6, 2007.
13. Калинин Б.А., Якушин В.Л., Федотов В.Т. и др. Разработка и применение наноструктурных материалов и наноструктурных состояний в конструкционных материалах, обеспечивающих повышение работоспособности изделий атомной техники. //Второй Совместный российско-украинский научно-технический совещание – семинар «Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого международного сотрудничества». Энергодар. Украина. 20-22 октября 2009 г.
14. Agayev T.N., Imanova G.T., Alesgerov A.M., Rzayev A.A. «Radiation heterogeneous processes in the system nano-ZrO₂+H₂O». The V International Conference «PERSPECTIVES OF PEACEFUL USE OF NUCLEAR ENERGY ». Baku. November 21-23. 2012. p. 136.
15. Агаев Т.Н., Иманова Г.Т. Гетерогенный гамма-радиолиз воды в присутствии наночастиц диоксида циркония. Между-

народная конференция молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии». 6-8 июня 2012. Алматы, Республика Казахстан. С. 20-21.

16. Агаев Т.Н., Иманова Г.Т. «Радиационно-гетерогенные процессы в системе нано-ZrO₂+H₂O». V Всероссийская конференция «Актуальные проблемы химии высоких энергий», 23-24 октября 2012. Москва. С. 182-183.

NANOQURULUŞLU MATERIALLARIN NÜVƏ ENERGETİKASINDA TƏTBİQİ

T.N.Ağayev, G.T.İmanova

Xülasədə nanomaterialların nüvə energetikası və texnikasında tədqiqi, hazırlanması və istifadəsinə aid tədqiqatların nəticələri verilmişdir. Nanoquruluşlu materialların əsas xassələri göstərilmişdir. Nanomaterialların nüvə energetikasında tətbiqinin möhkəmlik və sərtlik göstəricilərinin yüksəldilməsi, korroziyaya və radiasiyaya qarşı davamlılığının artırılması üçün AES və gələcək İNR-lərin konstruksiya elementlərinin nanoquruluşlu materiallarının və örtüklərinin hazırlanması ilə əlaqədar perspektivləri nəzərdən keçirilmişdir.

Açar sözlər: nanomateriallar, nanotexnologiya, nüvə istilik tsikli, radiasiya və korroziya davamlılığı.

APPLICATION OF NANOSTRUCTURED MATERIALS IN NUCLEAR POWER

T.N.Agaev, G.T.Imanova

A review of the results of research, development and use of nanomaterials in the nuclear energy and technology has been presented. Main properties of nanostructured materials offered. Prospects of the use of nanomaterials in the nuclear energy arising from the creation of nanostructured materials and coatings for structural components of AES and future TNR to strengthen hardness and strength indices and increase corrosion and radiation resistance considered.

Keywords: nanomaterials, nanotechnology, nuclear fuel cycle, radiation and corrosion resistance.

Поступила в редакцию 23.02.2013.