

УДК 621.039.537

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ШАРОВОЙ ЗАСЫПКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА

<sup>2</sup>Бирин Д.С., <sup>2</sup>Аношкин Ю.И., <sup>1,2</sup>Головко В.Ф., <sup>2</sup>Токарев М.С., <sup>2</sup>Ярахтин М.С.

<sup>1</sup>АО «ОКБМ Африкантов», Москва;

<sup>2</sup>НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, e-mail: birin.dim@yandex.ru

Основной целью исследования, обозреваемого в данной статье, является определение оптимального угла наклона днища емкости шаровой засыпки активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора. При движении шаровой засыпки возникает неоднородность в полях скоростей – периферийная область затормаживается, при сильном её замедлении происходит ухудшение физики активной зоны. Таким образом, в качестве основного результата исследования получен угол наклона днища, при котором движение шаровой засыпки наиболее равномерно. В качестве инструмента исследования использовалась программа LS-DYNA расчетного кода ANSYS. После проведения расчетов был получен результат – оптимальный угол составляет 40°. Существуют также и другие способы увеличения равномерности движения – использование на боковых стенках турбулизаторов. Кроме того, как описывается в литературе, использование турбулизаторов также позволяет бороться с «кристаллическими телами», которые образуются при многократной перегрузке шаровой засыпки активной зоны и могут сильно ее замедлить. Однако проведенные расчеты и анализ технических проектов высокотемпературных реакторов других стран дают основание полагать, что применение турбулизаторов нерационально, поскольку они лишь более замедляют периферийный слой и не помогают в разрушении «кристаллических тел».

**Ключевые слова:** шаровая засыпка активной зоны, оптимизация, шаровой твэл, турбулизатор, расчетный код

## OPTIMIZATION OF MOVEMENT PEBBLE BED HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR CORE

<sup>2</sup>Birin D.S., <sup>2</sup>Anoshkin Yu.I., <sup>1,2</sup>Golovko V.F., <sup>2</sup>Tokarev M.S., <sup>2</sup>Yarakhtin M.S.

<sup>1</sup>JSC «Afrikantov OKBM», Moscow;

<sup>2</sup>NSTU name R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: birin.dim@yandex.ru

The main goal of the research surveyed in this article is to determine the optimal angle of inclination of the bottom capacity of pebble bed of active core of high temperature gas cooled reactor. When pebble bed of active core is moving occurring heterogeneity in the fields of speed – peripheral region slows down, with strong deceleration occurs deterioration in the physics of the core. Thus, as the main result of the study, the obtained angle of inclination of the bottom in which the movement of the pebble bed of active core with the most evenly. As a tool the study used LS-DYNA with cfd code ANSYS. After calculations the result was obtained – the optimal angle is 40°. There are also other ways of increasing the uniformity of movement – use turbulence on the wall. However, the calculations and analysis of technical projects of high temperature reactors in other countries give reason to believe that the use of turbulence is irrational.

**Keywords:** pebble bed active core, optimization, spherical fuel element, turbulence, cfd-code

Потенциал развития высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) высок: прогнозируется, что уже с 2040 г. в России реакторный парк станет преимущественно трехкомпонентным (ВВЭР, БН, ВТГР), причем доля газовых реакторов будет постоянно возрастать [1]. Также, благодаря возможности ВТГР производить высокопотенциальное тепло, кроме внедрения данной технологии реакторов в производство электроэнергии, существует большой потенциал её внедрения в энергоёмкие производства. К примеру, потенциальный объем внедрения в нефтедобычу – 70%, в нефтехимию и нефтепереработку – 40%, в химическую промышленность – 15% и т.д. Общий потенциальный объем внедрения ВТГР в энергоёмкие производства составляет около 25% [2].

На данный момент газоохлаждаемые реакторы находятся на третьем этапе своего

развития. Первый этап был представлен английскими реакторами типа Magnox (Магнокс), второй этап представлен реакторами типа AGR – advanced gas-cooled reactor (улучшенный газоохлаждаемый реактор). Во времена второго этапа в технологии газовых реакторов совершился настоящий технический прорыв, ознаменовавший начало третьего этапа, который длится до сих пор. Прорыв заключался в том, что в качестве материалов твэл предложили использовать карбиды с диспергированными в нем микротвэлами урана, а также предложили заменить теплоноситель с CO<sub>2</sub> на гелий. Данное решение позволило увеличить выходную температуру до 1000 °С и получить высокопотенциальное тепло.

Кроме увеличения параметров теплоносителя, данный прорыв заложил основу для развития двух принципиально разных типов активных зон: призматической и шаро-

вой. В призматической активной зоне твэлы представляют собой графитовые блоки высотой около 800 мм с расположенными в них по всей длине компактами с микротвэлами, а так же с отверстиями для прохода теплоносителя и для стержней СУЗ. По принципу работы призматическая активная зона аналогична активным зонам водо-водяных реакторов, имеет схожие достоинства и недостатки и рассматриваться в данной статье не будет.

Шаровая активная зона является более инновационной, обладает принципиально другими преимуществами и недостатками. Твэл в шаровой активной зоне представляет собой шар диаметром 60 мм с покрытием типа TRISO (Tristructural Isotropic Coated Particle) и диспергированными в нем микротвэлами. Десятки тысяч таких шаров находятся в активной зоне работающего на мощности реактора и перегружаются в процессе работы, без останова или снижения мощности. Некоторые преимущества шаровой засыпки активной зоны:

- способность перегружать топливо непосредственно во время работы реактора увеличивает КИУМ ядерных установок с ВТГР вплоть до 98%, что положительно сказывается на экономическом аспекте эксплуатации установки;

- используя цикл МПАЗ (многократная перегрузка активной зоны), можно контролировать уровень выгорания перегруженных твэл и отправлять обратно в активную зону те твэлы, чей уровень выгорания не соответствует норме, тем самым значительно увеличить среднее выгорание топлива;

- при использовании шаровой засыпки активной зоны при относительно меньших скоростях газового теплоносителя, чем в реакторах с призматическими твэлами, обеспечивается хорошая турбулизация потока теплоносителя, которая обеспечивает хорошую теплоотдачу. При этом практически отсутствует зависимость теплопередачи к газу от выгорания твэл, т.е. нагрев теплоносителя будет постоянен при различном уровне выгорания топлива [3].

Учитывая эти преимущества, можно спроектировать установку, которая бы отлично удовлетворяла различным условиям – будь то установка для производства электроэнергии или для получения высокопотенциального тепла для применения его на производстве без останова на перегрузку.

К основным недостаткам шаровой активной зоны можно отнести:

- реакторы с шаровой засыпкой активной зоны модульной концепции могут обеспечивать лишь 250 МВт тепловой мощно-

сти, что автоматически относит установки с такой активной зоной в разряд малой мощности;

- движение шаровых твэл в активной зоне можно сравнить с циркуляцией жидкости в сосуде: подаются шары через верхнее отверстие, а через нижнее выгружаются. Сама активная зона никак не зафиксирована и постоянно находится в движении. Вследствие этого могут меняться и нейтронно-физические характеристики активной зоны.

Основной целью анализа, представленного в данной статье, является определение оптимальных геометрических параметров кладки активной зоны, чтобы при «циркуляции» активной зоны сохранялись её нейтронно-физические и теплофизические характеристики. Для этого необходимо, чтобы при движении шаровой засыпки выполнялись следующие условия:

- обеспечивалась необходимая средняя скорость прохождения шаровых твэл через полость в графитовой кладке (это выполняется с помощью разгрузочно-загрузочного комплекса);

- радиальное распределение скоростей должно быть как можно более равномерным (обеспечивается в основном геометрией днища полости в графитовой кладке);

- должны отсутствовать «застойные зоны», т.е. такие области в шаровой засыпке, в которых аксиальная скорость равняется нулю или очень низка по сравнению со средней скоростью циркуляции (обеспечивается также геометрией днища).

Геометрических параметров, которые можно исследовать с целью оптимизации движения шаровой засыпки, большое количество (диаметр выгрузного отверстия, отношение высоты активной зоны к её диаметру, различного рода скругления и т.д.). Поэтому для расчетного исследования движения шаров от всех этих параметров, требуется очень большое количество машинного времени и большое количество времени на обработку результатов. Исходя из этого, были выбраны наиболее важные геометрические характеристики, которые нужно исследовать, при постоянных остальных параметрах: угол наклона днища и наличие турбулизаторов на боковых стенках полости шаровой засыпки.

Для исследований применялась программа LS-DYNA расчетного кода ANSYS. Для исследования зависимости характера движения шаровой засыпки от угла наклона днища была построена расчетная модель (рис. 1). Она состоит из трех частей: раздаточной емкости, исследуемой емкости активной зоны и приемной емкости. Первая и третья части добавлены в расчетную

модель с целью максимального приближения режима гравитационной загрузки-выгрузки (осуществить любой другой режим загрузки-выгрузки при такой же скорости расчета невозможно). В качестве шаровых твэлов использовались dem-модели с диаметром равным 60 мм и со всеми характеристиками графита. Материал боковых стенок модели отражателя моделирует характеристики графита. Угол наклона дна к горизонту составляет  $30^\circ$ . Для других моделей углы равны соответственно  $20^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ .

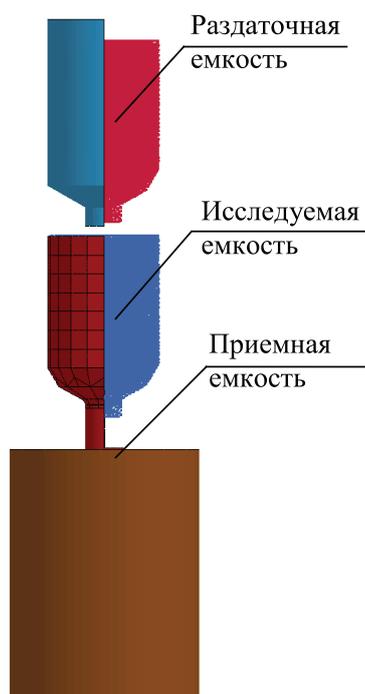


Рис. 1. Расчетная модель

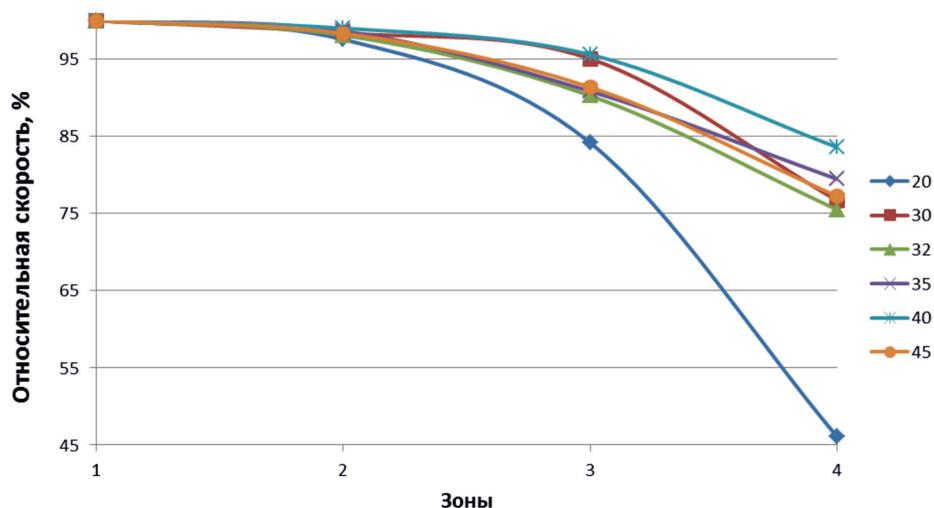


Рис. 2. Распределение относительных скоростей по зонам для расчетных моделей

Методика обработки результатов следующая: выбирались четыре набора из четырех шаровых твэлов. Каждый из четырех твэлов в каждом наборе был взят из различных зон: из центра и периферии крайние твэлы, остальные были взяты из зон, равномерно распределенных между центром и периферией: «около центра», «около периферии». Далее для каждого твэла определялась проекция скорости на ось, параллельную направлению выгрузки, и результаты усреднялись для каждой зоны. После этого определялись относительные величины скоростей, где за 100% была взята скорость в центральной зоне.

В качестве результатов наиболее важны следующие данные:

- графики распределения относительных скоростей по зонам при движении в исследуемой части модели (100% – у центральной зоны) (рис. 2);

- относительное время выхода шара из полости активной зоны, т.е. отношение времени выхода шара из любой зоны к минимальному времени выхода шара из центральной зоны (рис. 3).

Проанализировав данные результаты, отметим следующие факты:

- «застойные зоны» образуются при угле  $20^\circ$ , на что указывается относительное время выхода шара из периферийной зоны – 3,05, это значит, что шар на периферии будет проходить активную зону в три раза дольше, чем шар в центральной зоне;

- наиболее равномерное распределение скоростей движения шаровых элементов достигается при угле  $40^\circ$ ;

- наименьшее относительное время выхода шара из модели активной зоны достигается при угле  $45^\circ$  – 1,53.

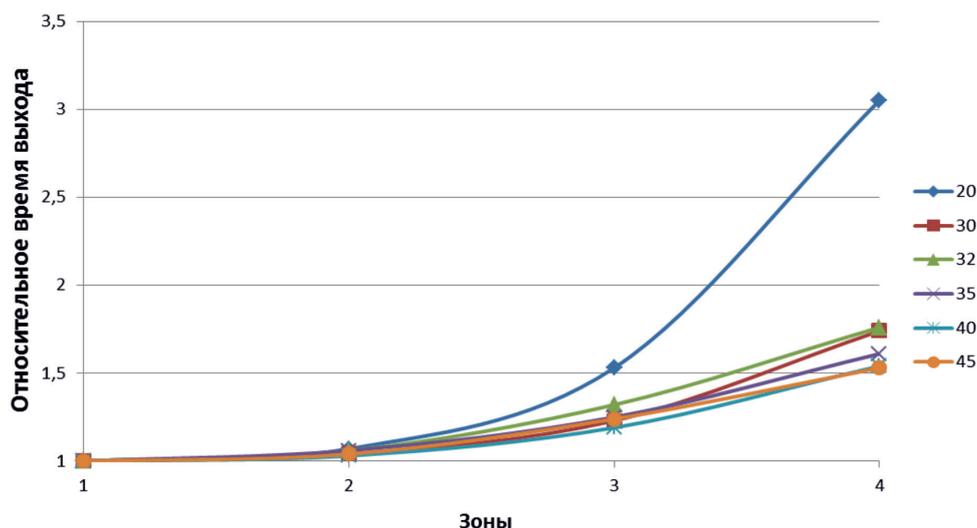


Рис. 3. Распределение относительного времени выхода шара из моделей активной зоны

Исходя из этого, оптимальным углом для активной зоны реактора ВТГР является  $40^\circ$ .

Другим аспектом исследования было изучение актуальности турбулизаторов. Турбулизаторы – видоизмененная геометрия боковых стенок полости шаровой засыпки активной зоны. Они могут быть в виде углублений, в виде выпуклостей, продольных или поперечных вырезов и т.п.



Рис. 4. Исследуемая емкость активной зоны расчетной модели с турбулизаторами

Расчетная модель для расчетного анализа влияния турбулизаторов похожа на модели для определения оптимальных углов и отличается лишь тем, что в исследуемой части (рис. 4) применены турбулизаторы, аналогичные турбулизаторам в китайском проекте НТР-10 [4]. Они расположены в шахматном порядке по 10 шт. на каждом ряду, кроме первого, графитовых блоков цилиндрической части графитовой кладки.

Представляют собой усеченный конус с диаметром основания 233 мм, высотой 20 мм и углом раствора  $139^\circ$ .

Сравнение результатов расчета моделей с оптимальным углом наклона днища ( $40^\circ$ ) с турбулизаторами и без них представлено на рис. 5 и 6.

Сравнивая результаты расчета профилей скоростей при одинаковых углах наклона днища с турбулизаторами и без них, можно увидеть, что наличие турбулизаторов не только не выравнивает профили скоростей шаров, но и наоборот делает их более неравномерными, существенно замедляя периферийный слой. Таким образом, идея об их использовании для увеличения равномерности движения шаровой засыпки оказалась несущественной.

Дополнительным обоснованием такого вывода является рассмотрение действительной роли турбулизаторов, в некоторых построенных или спроектированных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах различных стран:

- из немецких установок AVR и THTR-300 турбулизаторы использовались лишь на AVR. Это опытная установка с впервые примененной концепцией шаровой активной зоны;
- из китайских установок НТР-10 и НТР-PM турбулизаторы использованы только на НТР-10. НТР-PM промышленная установка и турбулизаторов не имеет [5]. Различие активных зон этих установок заключается в отношениях высоты активной зоны к её диаметру. У НТР-10  $H/D \approx 1$ , а у НТР-PM зона намного более вытянута и  $H/D \approx 3$ ;

- в американских и японских установках турбулизаторы не применялись вообще;
- в концепции высокотемпературного реактора – RBMR (Pebble Bed Modular Reactor) (ЮАР) турбулизаторы не использованы [6];
- в российском проекте ВГМ исследовалась возможность применения турбулизаторов различной формы, однако их применение признано нерациональным.

Исходя из вышеизложенной информации, турбулизаторы применялись лишь в опытных и экспериментальных установках, видимо с целью изучения их влияния на характер движения шаровой засыпки, однако в промышленных установках применены не были. Это наводит на мысль, что польза, приносимая турбулизаторами, либо отсутствует, либо очень мала.

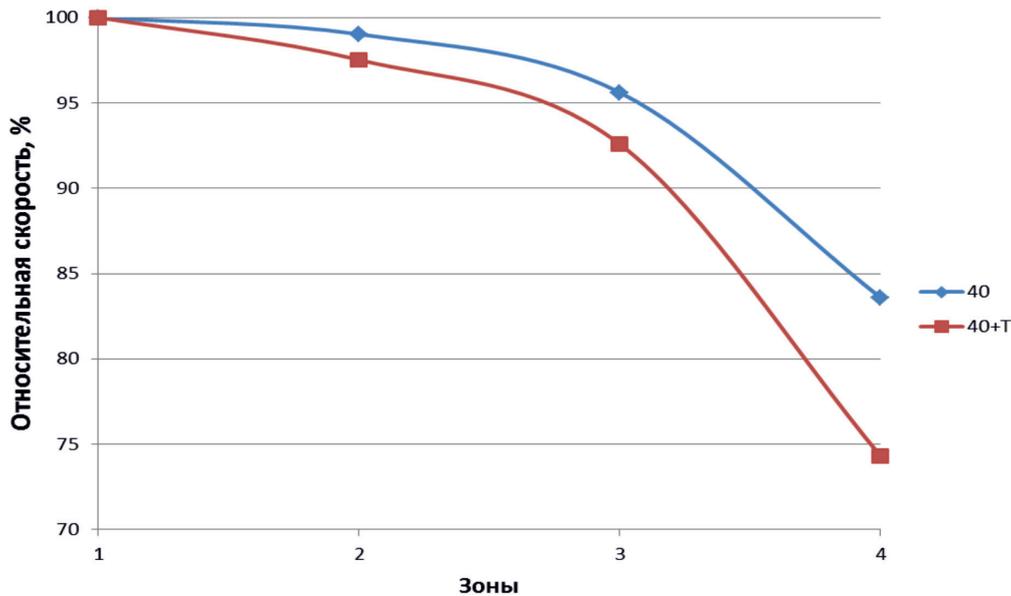


Рис. 5. Сравнение распределения относительных скоростей в расчетных моделях с турбулизаторами и без них

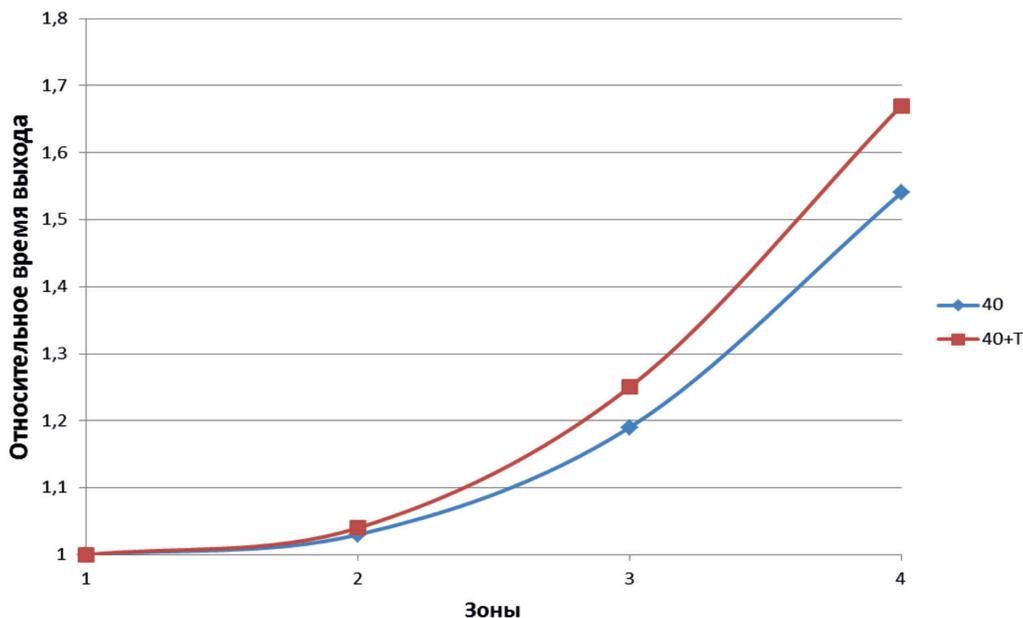


Рис. 6. Сравнение распределения времени выхода шара из расчетных моделей с турбулизаторами и без них

В литературе [7] приводилась лишь одна причина для использования турбулизаторов – для разрушения «кристаллического тела». «Кристаллическое тело» возникает в процессе многократной перегрузки активной зоны и представляет собой область шаровой засыпки, где шары выстроились в кристаллическую структуру. Эта структура образуется на периферии и может распространяться на несколько слоев вглубь засыпки. Особенностью «кристаллического тела» является то, что оно движется с единственной минимальной скоростью – со скоростью периферийного слоя. Применяя турбулизаторы, «кристаллические тела» теоретически можно разрушать, перемешивая периферийный слой шаровой засыпки (отсюда и название – турбулизаторы). Но возникает вопрос: действительно ли «кристаллические тела» кардинально меняют характеристики движения шаровой засыпки, так что активная зона теряет свою теплотехническую надежность? Судя по опыту внедрения турбулизаторов в промышленные установки и по результатам расчетов с турбулизаторами и без, ответ отрицательный. «Кристаллические тела» почти не влияют на движение шаровой засыпки и поэтому опасности не представляют.

Из чего можно заключить, что использование турбулизаторов, примененных в китайском проекте HTR-10, в концептуальном проекте экспериментального ВТГР не целесообразно по следующим причинам:

- турбулизаторы не только не ускоряют периферийный слой, но и наоборот замедляют его («паразитное замедление»), что показали расчеты;

- «кристаллические тела», с которыми должны «бороться» турбулизаторы, не при-

носят столько вреда, чтобы с ними нужно было бороться.

Таким образом, полученные в работе результаты дают возможность оптимизировать движение шаровой засыпки в реакторе типа ВТГР за счет изменения конкретных геометрических параметров полости (в данном случае угла наклона днища). Также они позволяют однозначно ответить на вопрос о целесообразности применения турбулизаторов в конкретном варианте их исполнения, что, безусловно, может быть использовано как при совершенствовании существующих, так и при разработке перспективных активных зон.

### Список литературы

1. Пономарев-Степной Н.Н. Атомно-водородная энергетика / Н.Н. Пономарев-Степной, А.Я. Столяревский, В.П. Пахомов. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 108 с.
2. Гребенник В.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики / В.Н. Гребенник, Н.У. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 136 с.
3. Дмитриев С.М. Атомные газотурбинные установки: учебное пособие / С.М. Дмитриев, С.А. Замятин. – Нижний Новгород: изд. НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2012. – 149 с.
4. IAEA: Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance, Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10. – 2003. – № 1382 [Электронный ресурс]. URL: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6821/Evaluation-of-High-Temperature-Gas-Cooled-Reactor-Performance-Benchmark-Analysis-Related-to-Initial-Testing-of-the-HTTR-and-HTR-10> (дата обращения: 23.01.18).
5. Zhang Z., Wu Z., Wang D., Xu Y., Sun Y., Li F., Dong Y. Current status and technical description of Chinese 2×250MWth HTR-PM demonstration plant // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – vol. 239. – P. 1212–1219.
6. Technical description of the PBMR demonstration power plant. – 2006 [Электронный ресурс]. – URL: [www.nrc.gov/docs/ML0609/ML060940293.pdf](http://www.nrc.gov/docs/ML0609/ML060940293.pdf) (дата обращения: 23.01.18).
7. Бедениг Д. Газоохлаждаемые высокотемпературные реакторы / Д. Бедениг; пер. с нем. (ФРГ, 1972); ред. Ю.И. Митяева. – М.: Атомиздат, 1975. – 224 с.