

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СФЕРИЧЕСКОГО ХРАНИЛИЩА ЯОП-УСТАНОВКИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЯДЕРНЫХ ОТХОДОВ

А.В. Карелин  
(ФГУП ЦНИИмаш)  
И.Н. Хиблин  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)  
Л.А. Амелин  
(ОАО «НИИЭМ»)

Рассмотрены существенные особенности конструкции и эксплуатации ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов. Приведён прочностной расчёт сферического хранилища радиусом 15 м для 216 бочек с высокоактивными ядерными отходами, содержащими цезий-137 с активностью  $4,6 \cdot 10^5$  Ки. ЯОП-установка обеспечивает объёмное тепловыделение в газе 87 МВт и полную электрическую мощность установки 1 МВт при температуре воды на входе в контур охлаждения  $20^\circ\text{C}$ , давлении газа 10 атм и скорости прокачки 3 м/с.

**Ключевые слова:** ядерно-оптический преобразователь, цезий-137, радиоактивные отходы, утилизация, теплоноситель, газовая смесь, аргон – азот, активная зона (хранилище), сфера.

### Введение

Отработанное ядерное топливо (ОЯТ) содержит после облучения высокорadioактивные продукты деления и активации, причём рост глубины выгорания приводит к росту интенсивности генерации вторичных нейтронов, что усложняет обращение с ОЯТ. В частности, возможно охрупчивание конструкционных материалов. Самыми проблемными являются изотопы, период полураспада которых сравним с продолжительностью человеческой жизни. В значительных количествах в ОЯТ присутствуют два таких изотопа – стронций-90 и цезий-137. Их содержание составляет примерно 3 – 4 килограмма на тонну ОЯТ.

Радиация является жёстким излучением, которое можно использовать как источник энергии в ядерно-оптических преобразователях (ЯОП) с дальнейшей конверсией оптического излучения в электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей. Электричество может вырабатываться в постоянном режиме в течение многих лет практически без смены источника излучения, если уровень остаточной радиоактивности и период полураспада достаточно высоки [1 – 3]. В качестве активной среды предлагается смесь  $\text{Ar} - \text{N}_2$ , излучающая преимущественно в диапазонах длин волн 350 – 410 и 750 – 1050 нм на переходах  $\text{C} \rightarrow \text{B}$  и  $\text{B} \rightarrow \text{A}$  молекулы азота  $\text{N}_2$  соответственно; плазмохимические процессы идут под действием  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$  (период полураспада 30 лет) с энергией  $E_\gamma = 662$  кэВ.

В работах [4, 5] проведены теплофизические расчёты ЯОП, в частности, для следующих параметров:

- внутренний диаметр хранилища  $D = 80$  м;
- высота хранилища  $H = 3$  м;
- температура аргона на входе в хранилища  $t_{in} = 30^\circ\text{C}$ ;
- теплопроводность радиоактивных отходов  $\lambda_{от} = 20$  Вт/(м·К) [6];

- давление аргона в хранилище  $p = 10$  атм;
- количество бочек  $N = 207$ ;
- удельное тепловыделение в бочке  $q = 0,1$  Вт/см<sup>3</sup>;
- толщина стенки бочки  $\delta = 0,5$  см;
- высота бочки  $h = 1$  м;
- диаметр бочки  $d = 0,5$  м;
- материал стенки бочки сталь 12X18H9T, предел текучести  $\sigma_T = 137 \cdot 10^6$  Па;
- бочки складированы в три этажа в центре хранилища (снаружи цилиндра высотой 3 м при диаметре 6 м), а насосные установки и теплообменники располагаются вне хранилища (рис.1).

Полагалось, что бочки заполнены отработанным

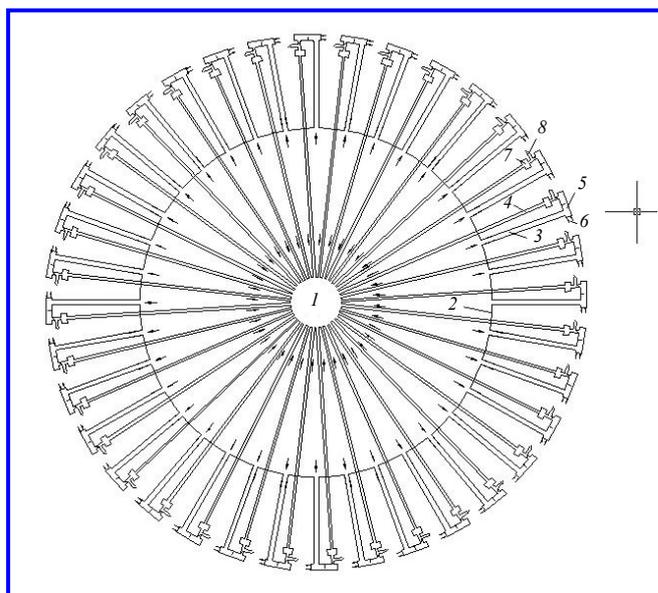


Рис. 1. Схема хранилища: 1 – склад контейнеров; 2 – оболочка хранилища; 3, 4 – трубы для аргона; 5 – теплообменник; 6 – подвод воды; 7 – насос; 8 – патрубков для воздуха с люком и задвижной трубы 4

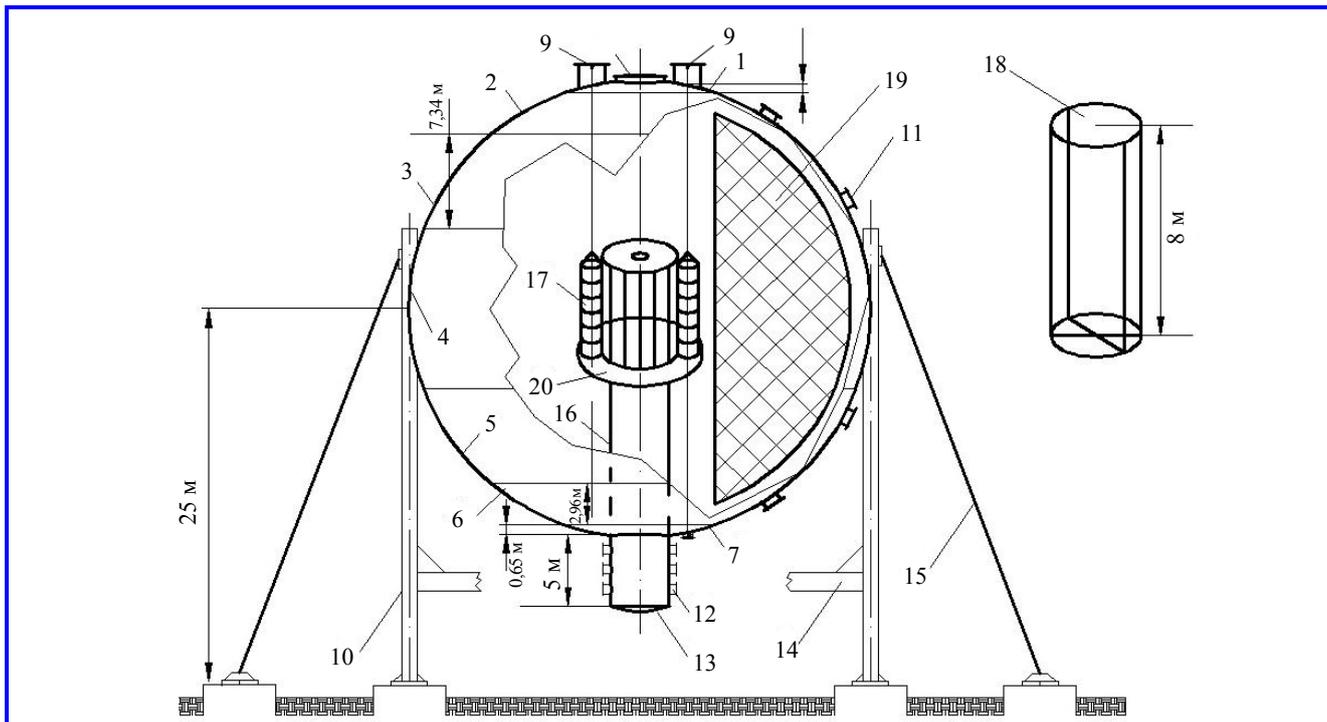


Рис. 2. Оболочка хранилища состоит: 1 – 7 – пояса; 9 – люки (Ø 1,75 м, 12 шт.) для подъёма и опускания корзины с бочками; люки – 8 (Ø 3,2 м) и 13 (Ø 5 м); патрубki 12 (Ø 0,64 м, 36 шт.) для подвода газа и патрубki 11 для отвода газа (Ø 1,1 м, 36 шт.); 10 – опоры хранилища (12 шт.); 14 – кольцевая рама; 15 – растяжки (12 шт.); 16 – газораспределитель; 17 – корзины (12 шт.) с бочками; 18 – конструкция корзины; 19 – модуль ФЭП (12 шт.); 20 – основание контейнера корзины

оксидным топливом из зоны большого обогащения с высокой глубиной выгорания (до 28%) реакторов на быстрых нейтронах после переработки, обладающим гамма-активностью со скоростью  $f = 8,6 \cdot 10^{16}$  распадов/(м<sup>3</sup>·с).

В результате проведённых исследований установлено:

1. При прокачке газа через центральную зону хранилища с начальной температурой 30°C при давлении 10 атм и скорости течения газа 3 м/с нагрев газа

на выходе из хранилища 133°C.

2. Для работы ЯОП-установки в стационарном режиме необходимо отводить тепло мощностью ≈87МВт. Части электрической мощности ЯОП-установки (≈0,5 МВт) достаточно для прокачки аргон-азотной смеси по замкнутому контуру, включающему активную зону и межтрубное пространство кожухотрубчатых теплообменников с оребрёнными трубами.

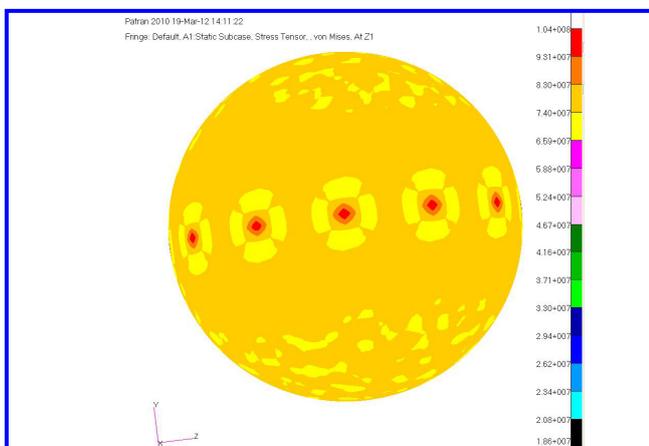


Рис. 3. Напряжения на внешних поверхностях конструкции, Па

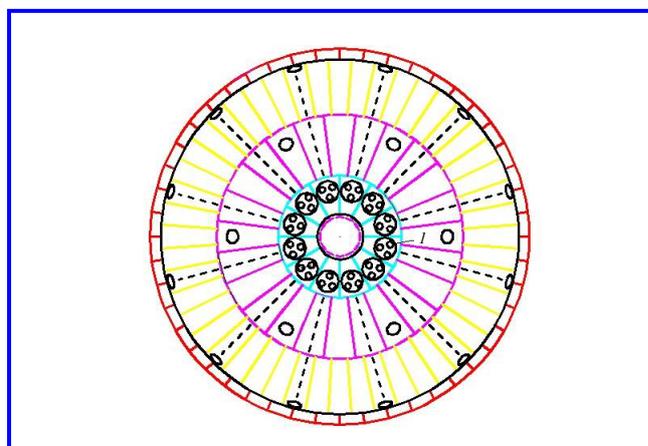


Рис. 4. Оболочка хранилища (вид сверху); 1 – люки (12 шт. показаны без крышек) для подъёма и опускания корзин

Однако хранилище дискообразной формы (радиус 40 м, высота центральной части 10 м, высота торцевой стенки 3 м) при внутреннем давлении 10 атм должно иметь внешние стенки толщиной 16 – 40 см и внутренние продольные перегородки для повышения жёсткости; для выполнения условий прочности необходимо использование высокопрочных сталей с вязким характером разрушения (с пределом прочности не менее 800 МПа). Масса несущей конструкции дискообразного хранилища – 21 000 т.

По технолого-экономическим соображениям представляется, что хранилище объёмом  $V = 15\,000\text{ м}^3$  целесообразно выполнить в виде сферического газгольдера (рис. 2) с радиусом оболочки  $R = 15\text{ м}$ . В материале оболочки толщиной  $d = 50\text{ мм}$  для оценки эквивалентного напряжения  $\sigma$  от внутреннего давления хранилища  $p = 1\text{ МПа}$  можно использовать безмоментное решение (рис. 3):

$$\sigma = pR/(2d) = 150\text{ МПа}. \quad (1)$$

Существует значительный выбор радиационно-стойких сталей с  $\sigma_{0,2} > 150\text{ МПа}$ . Масса рассматриваемой сферической оболочки хранилища – 1100 т.

Для использования в ядерно-оптических преобразователях высокоактивные ядерные отходы следует предварительно подвергать специальной обработке в целях минимизации потока вторичных нейтронов. Известно, что цезий и стронций необходимо выделять при любом сценарии переработки. Технической проблемы это не представляет [7], и поэтому заполнение бочек остеклованной солью CsCl или другим соединением цезия, иммобилизованным в матричные материалы, вполне осуществимо [7].

### Конструкция и эксплуатации ЯОП-установки со сферической оболочкой хранилища

Сферическую оболочку (рис. 2, 4, 5) собирают из отдельных поставляемых с завода сферических заготовок (рис. 6), размер которых определяется габаритом железнодорожного подвижного состава (длина 13,3 м; ширина 2,77 м; высота 1,81 м); сферическую поверхность заготовкам на заводе придают горячей штамповкой. Раскрой сферической оболочки приведён в таблице. Монтаж осуществляют методом укрупнительной сборки лепестков заводского изготовления в блоки на монтажной площадке и автоматической их сварки под слоем флюса или в среде защитного газа. Все сварочные работы при изготовлении проводятся при положительных температурах в закрытых отапливаемых монтажных технологических укрытиях. Монтаж блоков в проектное положение ведётся по-

следовательным наращиванием, начиная с экваториального пояса. Швы между блоками выполняют в основном ручной сваркой или автоматами для сварки во всех пространственных положениях. Для обеспечения удобной и безопасной эксплуатации устанавливаются серповидная внутренняя полноповоротная и наружная шахтная лестницы. Все крупногабаритные элементы конструкции (в том числе фотоэлектрические преобразователи в сборе с решетками) устанавливаются в хранилище до замыкания верхней части оболочки.

С целью обеспечения доступа к нижней части сферы при загрузке и выгрузке бочек и для уменьшения температурных напряжений опоры сферического хранилища выполняются в виде стоек-колонн (12 шт.), прикреплённых к шару по экваториальной линии и подкреплённых растяжками [9, 10]; высота стоек принята 25 м, внутренний диаметр стойки 1 м, толщина стенки стойки – 10 мм. К оболочке хранилища стойку присоединяют при помощи стальной накладки, отвальцованной по форме шаровой поверхности.

Нагрузка через колонны передаётся на железобетонный кольцевой фундамент с отдельными тумбами под каждую стойку. На тумбы, в месте установки колонн, укладывают опорную стальную плиту и анкерными болтами закрепляют башмаки стойки.

Предполагается, что бочки (216 шт.) устанавливаются в центральной части сферического хранилища, занимая по высоте 8 м снаружи боковой поверхности цилиндра диаметром около 5 м. Подъём и опускание бочек, заранее уложенных по 18 шт. в корзины, выполняется кранами через быстрооткрываемые люки типа «Локаут» (в нижней части сферы) диаметром 1,75 м (снабжённые герметично закрывающимися крышками). При этом поперечный зазор между бочками около 0,7 м. Поперечные смещения

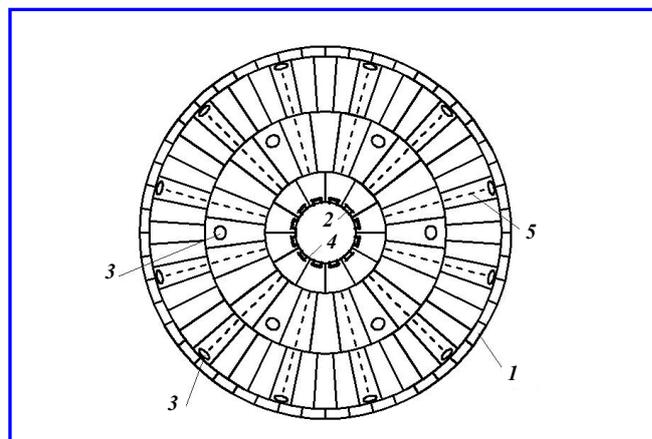


Рис. 5. Оболочка хранилища (вид снизу): 1 – лепесток из экваториального пояса; 2 – патрубки для подвода газа (над поясом 1); 3 – патрубки для отвода газа – в поясах 2 и 3; 4 – люк в центре; 5 – модуль ФЭП; опоры хранилища и растяжки не показаны

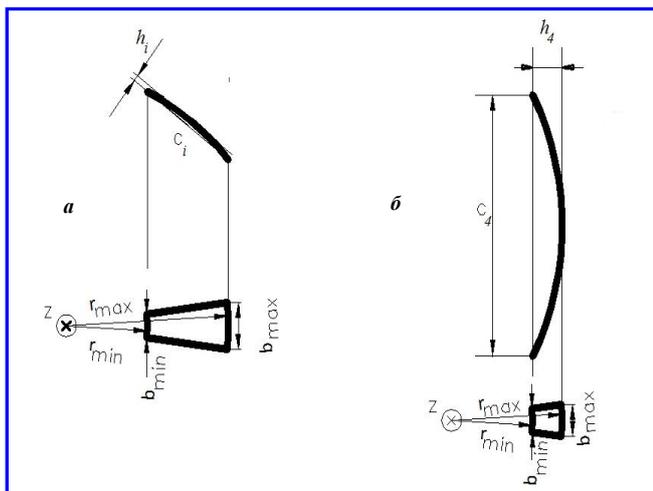


Рис. 6. Габаритные размеры лепестка:  
 а – из поясов 1 – 3 и 5 – 7; б – из пояса 4

корзин при подъёме и опускании ограничиваются (нижними) тросами, проходящими сквозь основание контейнера для корзин; предполагается, что нижние тросы всегда натянуты.

При транспортировке бочек важно обеспечить надёжное и непрерывное охлаждение. Учитывая высокий уровень гамма-излучения, бочки можно перевозить в модифицированных стандартных контейнерах для перевозок отработавшего топлива. Монтаж корзин с бочками в хранилище производится после выхода на рабочий режим разомкнутой воздушной системы охлаждения.

По окончании монтажа бочек и герметизации контуры системы охлаждения замыкают через охлаждаемые водой теплообменники, обеспечивая надёжное и непрерывное охлаждение бочек, далее

повышают давление до 10 атм закачкой углекислого газа в хранилище и пропускают газовую смесь через поглотители кислорода, встроенные в часть отводящих (из хранилища) газ труб. После 1 – 2 ч работы в таком режиме снижают давление до 1 атм выпуском смеси из хранилища. Повторив несколько раз закачку углекислого газа с последующим выпуском смеси из хранилища, вымораживают углекислый газ, поддерживая давление 10 атм закачкой аргона.

В стационарном рабочем режиме давление аргон-азотной смеси должно быть равным 10 атм, а соотношение концентраций  $[Ar] : [N_2] = 45 : 1$ . Газ (смесь Ar – N<sub>2</sub>), охлаждённый в теплообменниках, закачивается в центральную зону хранилища через 36 труб (внутренний диаметр 0,64 м) в верхней части; насосные установки и теплообменники располагаются вне хранилища. Отвод нагретого газа в теплообменники организован по 36 трубам (внутренний диаметр 1,1 м).

Учитывая, что фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе халькопиритов наименее подвержены воздействию радиации и принимая во внимание возможность создания лёгких и гибких элементов на основе металлических фольг и связанную с этим высокую удельную мощность по весу 2,5 кВт/кг [8], предлагается установка ФЭП Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS) общей площадью 4000 м<sup>2</sup>. Элементы на основе металлической фольги устанавливаются на 12 решётках (с двух сторон каждой решётки), контурная рама решётки закрепляется на оболочке хранилища, решётки стянуты между собой для уменьшения

№ пояса	Размеры пояса, м				Габаритные размеры лепестка, м			
	Радиусы оснований (расстояние от вертикальной оси сферы)		Толщина $H_i$	Количество лепестков	Длина меридиональная $c_i$	Ширина оснований		Стрела выпуклости $h_i$
	$r_{min}$	$r_{max}$				$b_{min}$	$b_{max}$	
1	1,6	5	0,77	12	3,5	0,83	2,59	0,10
2	5	10	2,96	24	5,8	1,31	2,61	0,33
3	10	14,5	7,34	48	8,6	1,31	1,90	0,66
4	14,5	15*	7,68	48	7,7	1,90	1,96**	0,53
5	10	14,5	7,34	48	8,6	1,31	1,90	0,66
6	5	10	2,96	24	5,8	1,31	2,61	0,33
7	2,5	5	0,65	12	2,7	1,29	2,59	0,10

\* – радиус середины лепестка.

\*\* – ширина середины лепестка.

низкочастотной вибрации. Каждый полностью собранный модуль ФЭП представляет собой сегмент (радиус 14 м, от хорды до центра дуги – 9 м), закреплённый в меридиональной плоскости. Модуль ФЭП собирают из отдельных поставляемых с завода заготовок, размер которых определяется габаритом железнодорожного подвижного состава.

### Заключение

В результате проведённых исследований установлено:

1. Хранилище объёмом  $V = 15\,000\text{ м}^3$  для ЯОП-установки, использующей 216 бочек с высокоактивными ядерными отходами, содержащими  $^{137}\text{Cs}$  с активностью  $4,6 \cdot 10^5$  Ки, и активную газовую среду (смесь  $\text{Ar} - \text{N}_2$ , давление 10 атм), целесообразно выполнить в виде сферического газгольдера с радиусом оболочки  $R = 15\text{ м}$ .

2. При существенно меньшей металлоёмкости по сравнению с хранилищем дискообразной формы, тех же теплофизических характеристиках (объёмное тепловыделение в газе 87 МВт) и электрической мощности (1 МВт) сферическое хранилище способно выдерживать эксплуатационные нагрузки (в том числе ветровые).

3. Дальнейшее системное уточнение конструкции и режимов эксплуатации ЯОП-установки с целью улучшения её характеристик целесообразно выполнить по экономическим соображениям.

### Литература

1. Карелин А. В., Широков Р. В. Радиоактивные отходы как источник дешёвой электроэнергии / А. В. Карелин, Р. В. Широков // Альтернативная энергетика и экология. –

Саров : ООО «Научно-технический центр «ТАТА», 2006. – № 9 (41). – С. 90 – 92.

2. Карелин А. В. Физические основы реактора-лазера / А. В. Карелин. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2007. – 260 с.

3. Пат. 2388087 Российской Федерации, МПК G21H001/12 Способ преобразования излучения радиоактивных отходов в электрическую энергию / Сейф Османович Чолах, Александр Витальевич Карелин, Юрий Николаевич Новоселов; заявл. 14.04.2008; опубл. 27.04.2010, бюлл. № 12.

4. Карелин А. В. Теплофизические ограничения ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 43 – 51.

5. Карелин А. В. Расчёт активной зоны и теплообменника ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов с учётом теплофизических ограничений / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 122. – № 3. – С. 41 – 53.

6. Котельников Р. Б. Высокотемпературное ядерное топливо / Р. Б. Котельников, С. Н. Башлыков, А. И. Каштанов [и др.]. – М. : Атомиздат, 1978. – 432 с.

7. Концепция по обращению с отработавшим ядерным топливом. – М. : Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Минатом России, 2003.

8. Международный проект по халькогенидным тонкопленочным солнечным батареям / П. П. Гладышев, С. В. Филин, В. Ф. Гременок [и др.]. – Дубна, 2010.

9. СНиП 2.01.07-85 Нагрузки и воздействия // Система нормативных документов в строительстве. Строительные нормы и правила. – М. : Министерство строительства Российской Федерации, 1996.

10. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г. А. Савицкий. – М. : Издательство литературы по строительству, 1972. – 110 с.

Поступила в редакцию 20.03.2012

*Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела,  
т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.*

*Иван Николаевич Хиблин, начальник лаборатории, т. (495) 366-14-11,  
e-mail: nilbix@mail.ru.*

*Леонид Алексеевич Амелин, канд. физ.-мат. наук, старший научн. сотрудник,  
т. (495) 994-54-88, e-mail: am-leonid@mail.ru.*