

СТАТЬИ

УДК 621.039.51

ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ РБМК

Давыдова Г.Б., Захарова Л.Н., Федосов А.М. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Бассейн выдержки отработавшего топлива РБМК находится непосредственно в реакторном зале. Он состоит из двух отсеков, каждый из которых представляет собой облицованную коррозионно-стойкой сталью бетонную емкость длиной 10,3, шириной 4,2, глубиной 17,3 м, до 16,6 м заполненную водой и закрытую сверху крышками. Под крышками имеется щелевое перекрытие, которое образовано двутавровыми консольными балками длиной 2 м, расположенными параллельно короткой стенке отсека. Расстояние между центрами балок 0,25 м. В середине отсека между торцами балок имеется каньон для транспортировки под слоем воды ТВС на место их временного хранения.

По первоначальному проекту отработавшие ТВС помещали в стальные пеналы диаметром 102, толщиной 2 мм, расположенные по прямоугольной решетке с шагом 160×250 мм, который обеспечивался диаметром фланца крышки пенала и шагом между балками щелевого перекрытия. Однако ограниченная емкость стационарного хранилища отработавшего ядерного топлива потребовала перевода бассейнов выдержки на уплотненное беспенальное хранение ТВС, при котором их размещают по треугольной решетке на облегченных подвесках. Шаг решетки немного отличается на Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС, но эти отличия не имеют принципиального значения для нейтронно-физических расчетов. Теоретически уплотненное хранение позволяет увеличить емкость бассейна в 2,4 раза, но с учетом хранения части ТВС в пеналах емкость можно увеличить в 2,2 раза. В пеналах хранятся пригодные к повторному использованию, недавно выгруженные или негерметичные ТВС. Часть пеналов зарезервирована под аварийную выгрузку.

Согласно нормативному документу [1] ядерная безопасность при хранении и транспор-

тировании ядерного топлива обеспечивается, если коэффициент размножения нейтронов не превышает 0,95 при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии. Целью анализа ядерной безопасности является доказательство выполнения этого критерия с учетом погрешностей методов расчета, определения обогащения и нуклидного состава, допусков при изготовлении ядерного топлива. Для запроектных аварий ОПБ-88/97 [2] предусматривают проведение реалистического (неконсервативного) анализа, что снижает требования к учету погрешностей и допусков. Кроме того, для запроектных аварий не требуется обеспечения критерия $K_{эф} \leq 0,95$. Достаточно показать, что самоподдерживающаяся цепная реакция деления невозможна.

Бассейн выдержки РБМК является сильно «перезамедленной» системой как при штатном, так и уплотненном хранении ТВС, т.е. низкое уран-водное отношение обеспечивает выполнение критерия $K_{эф} \leq 0,95$ даже для свежего топлива. Нарушение этого условия возможно лишь при увеличении уран-водного отношения, вызванного уменьшением плотности воды (кипение), локальным увеличением количества урана (сближение ТВС). И то и другое может быть следствием проектных или запроектных аварийных ситуаций.

Методика расчета бассейна выдержки. Для анализа ядерной безопасности используется программа STEPAN-БВ, которая является модификацией известной аттестованной для расчетов РБМК программы STEPAN [3]. В программе STEPAN-БВ решается условно-критическая задача, т.е. определяется $K_{эф}$ трехмерной системы, представляющей собой один отсек бассейна. В отличие от активной зоны РБМК, в которой соседствуют технологические каналы и сильные поглотители, бассейн выдержки представляет

собой более однородную систему, позволяющую использовать конечно-разностные уравнения с крупной сеткой, хотя при необходимости шаг в направлении X и Y в программе STEPAN-БВ задается произвольным. Переменный шаг в горизонтальном направлении для разных высотных слоев позволяет моделировать отклонение осей ТВС от вертикали в аварийных ситуациях. В вертикальном направлении Z обычно принимается постоянный шаг. Поскольку поток нейтронов в воде быстро падает, нет необходимости рассматривать всю высоту бассейна. В расчетах используется верхний и нижний водяной отражатель толщиной 0,5 м.

Для трехмерных расчетов была подготовлена система двухгрупповых констант, зависящих от выгорания топлива, шага решетки, плотности воды, температуры. Константы рассчитывали для бесконечной решетки ТВС по программе WIMS в 35 энергетических группах S_n -методом [4]. Реальную геометрию решетки моделировали цилиндрической ячейкой, эффективный радиус которой корректировали в зависимости от формы ячейки.

Для учета погрешностей обогащения и допусков при изготовлении топлива консервативно предполагали, что обогащение топлива находится на верхнем пределе допуска $\pm 0,05\%$, содержание эрбия — на нижнем пределе допуска $\pm 0,04\%$, масса урана в ТВС — на верхнем пределе допуска $\pm 1,6$ кг. Очевидно, что такая комбинация отклонений в реальности невозможна. Расчеты показали, что $K_{эф}$ при этом завышается на 1—1,5%. В расчетах также консервативно не учитывали повышение концентрации ^{149}Sm в выгруженном из реактора топливе, что завышало $K_{эф}$ примерно на 0,5%.

Расчетную модель верифицировали путем сравнения с прецизионными расчетами методом Монте-Карло по программе MCNP, поскольку измерения подкритичности бассейна, например, импульсным методом зависят от локализации

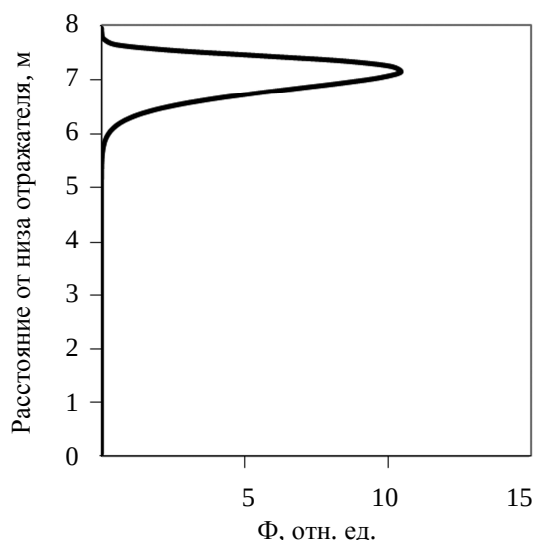
детектора [5]. Тестирование по ним расчетов требует детального моделирования эксперимента [6]. В таблице в качестве примера приводятся результаты расчета $K_{эф}$ для разных конфигураций решеток ТВС со свежим уран-эрбиевым топливом обогащением 2,6% в воде. Первый вариант соответствует сближению ТВС вплотную, второй — решетке уплотненного хранения на Курской АЭС, третий — той же решетке, в которой ТВС сблизились вплотную в направлении, параллельном консольным балкам. Отметим, что STEPAN-БВ немного завышает $K_{эф}$ по сравнению с MCNP.

Подкритичность бассейна выдержки в нормальных условиях. Бассейн выдержки РБМК представляет собой слабосвязанную систему, что объясняется ее большими размерами по сравнению с длиной миграции нейтронов 6—7 см. В результате поле нейтронов для условно-критической задачи очень неоднородно по объему бассейна выдержки. Даже небольшого слоя воды 20—30 см между отдельными зонами достаточно, чтобы они не влияли одна на другую. Поток нейтронов локализуется в зоне с максимальными размножающими свойствами. В остальных областях он близок к нулю.

Были проведены расчеты реальной загрузки одной из половин (разделенных каньоном) 2-го отсека бассейна выдержки 3-го энергоблока Смоленской АЭС, в которой сосредоточено наибольшее число ТВС уплотненного хранения. В основном это топливо обогащением 2,6% с содержанием эрбия 0,41%, средним выгоранием 26 МВт·сут/кг. Заметный поток нейтронов наблюдается лишь в области с 3-го по 11-й ряд. По высоте также видна значительная неоднородность распределения потока нейтронов (рис. 1). Весь поток локализуется в верхней части ТВС, поскольку выгорание топлива там наименьшее. Отметим, что в расчетах используется усредненный высотный профиль выгорания. Для консерватизма выгорание в верхней части уменьшено, в нижней увеличено на 7%.

Коэффициент размножения нейтронов в бассейне выдержки РБМК с разным видом решеток, рассчитанный с помощью разных программ

Тип решетки	MCNP	STEPAN-БВ	STEPAN—MCNP
Квадратная 8×8 см	$1,2069 \pm 0,0003$	1,2105	0,0036
Треугольная 12,5 см	$0,7974 \pm 0,0003$	0,8018	0,0044
Прямоугольная 8×12,5 см	$0,9954 \pm 0,0003$	1,0055	0,0101



Р и с. 1. Высотное распределение потока нейтронов

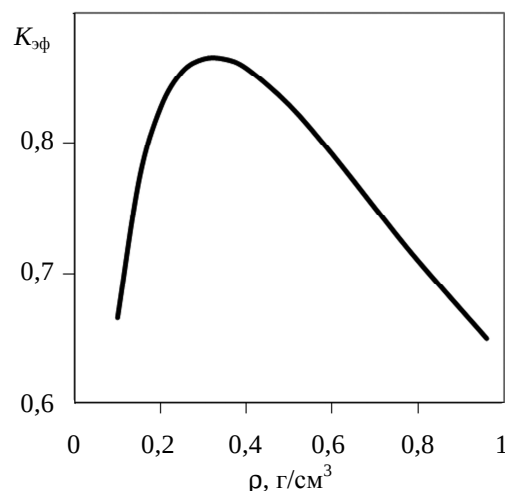
Рассмотренная система глубокоподкритична с $K_{эф} = 0,633$.

Для полностью загруженного свежим топливом обогащением 2,6% при уплотненном хранении $K_{эф} = 0,794$. Для топлива обогащением 2,8% $K_{эф} = 0,79$ из-за большего содержания эрбия (0,6%). При штатном пенальном хранении свежего топлива обогащением 2,6% $K_{эф} = 0,37$.

Ядерная безопасность пенального хранения при авариях. Расчеты полномасштабной загрузки бассейна свежим топливом обогащением 2,6% при вариациях плотности воды от 0 до 1 г/см³ в пеналах и межпенальном пространстве показали, что наибольший $K_{эф} = 0,924$ достигается при сохранении воды в пеналах в полностью осушенном бассейне. Осушение может быть следствием пробоя днища или других причин. Следовательно, ядерная безопасность гарантирована при любых авариях, приводящих к изменению плотности воды.

Был также рассмотрен гипотетический случай, при котором все 864 ТВС (24×36) в пеналах полностью загруженного отсека образовали тесную прямоугольную решетку. Для свежего топлива максимальный $K_{эф} = 0,979$ наблюдается при обезвоженном межпенальном пространстве и плотности воды в пеналах 0,8 г/см³.

Таким образом, при пенальном хранении даже при полной загрузке бассейна свежим топливом и невероятных вариантах уран-водного отношения система остается подкритичной, что гарантирует отсутствие самоподдерживающейся цепной реакции при любых запроектных авариях.



Р и с. 2. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от плотности воды для реальной загрузки бассейна выдержки 3-го энергоблока Смоленской АЭС

Изменение плотности воды при уплотненном хранении. При уплотненном беспенальном хранении по сравнению со штатным запас до достижения критического состояния значительно меньше, что требует тщательного анализа ядерной безопасности в аварийных ситуациях, в частности, с учетом выгорания топлива. Рассмотрим изменение плотности воды для реальной загрузки бассейна 3-го энергоблока Смоленской АЭС (рис. 2). Во всем диапазоне плотности воды имеется значительный запас до достижения $K_{эф} \leq 0,95$.

Согласно нормативному документу [1] выгорание топлива в качестве параметра ядерной безопасности можно использовать только в том случае, если проектом предусмотрены установки для его контроля. Выгорание контролируется (рассчитывается) в системе внутриреакторного контроля СКАЛА. Однако согласно нормативному требованию должна быть установка для определения выгорания выгруженного топлива. В противном случае формально топливо необходимо рассматривать как имеющее максимальный $K_{эф}$, т.е. свежее. Расчеты показывают, что для свежего топлива обогащением 2,6% при определенном уран-водном отношении $K_{эф}$ может быть около 1,2. Поэтому сверхконсервативная оценка по изменению уран-водного отношения во всем диапазоне, которая использовалась для пенального хранения, не годится. Необходимо рассматривать более реальные сценарии аварий.

Одной из проектных аварий является нарушение теплоотвода, приводящее к кипению воды. Из-за остаточного энерговыделения происходит медленный нагрев воды, затем ее кипение. В отсеке бассейна выдержки мощностью 1 МВт слой воды над ТВС выкипает примерно за 10 сут. Возникает естественная циркуляция воды, которую моделировали с помощью программы RELAP5/mod3.2 [7]. Расчеты показали, что при уменьшении слоя воды над ТВС до 0,5—0,6 м возникают пульсации расхода и наблюдается кипение в верхней части ТВС, однако толщина кипящего слоя невелика (~0,3 м), средняя плотность пароводяной смеси в нем составляет не менее 0,7 г/см³. По программе STEPAN-БВ были проведены расчеты для свежего топлива, в которых в верхнем полуметре ТВС плотность воды консервативно предполагалась равной 0,65 г/см³, ниже — 0,96 г/см³. $K_{эф}$ составил 0,913, т.е. ядерная безопасность обеспечивается.

Похожая задача возникает при заливе воды в осушенный бассейн. В нижней части бассейна плотность воды близка к единице, верхняя часть занята паром с низкой плотностью. Между ними находится узкий слой пароводяной смеси. В работе [8] показано, что при повторном заливе обезвоженного PWR область переменной плотности воды составляет слой толщиной не более 0,35 м, причем основное изменение плотности приходится на зону толщиной 0,15 м. В расчетах по программе STEPAN-БВ предполагалось, что плотность воды на участке 0,4 м линейно изменится от 1 до 0,0006 г/см³ (плотность пара). Для свежего топлива $K_{эф} = 0,86$, т.е. бассейн остается подкритичным.

Изменение шага размещения ТВС. Основной причиной перемещения сборок внутри бассейна может являться внешнее механическое воздействие. Падение отдельных предметов (исходное событие для проектных аварий), как правило, приводит к локальным нарушениям шага решетки. В случае экстремальных воздействий (запроектных аварий), таких, как, например, падение самолета, тяжелых конструкций и др., могут произойти существенные нарушения исходной конфигурации сборок с образованием более тесной решетки в большой области.

Принцип реалистического анализа запроектных аварий предусматривает необходимость

учета достигнутого выгорания топлива. Например, в гипотетическом случае объединения всех ТВС, находящихся в отсеке бассейна 3-го энергоблока Смоленской АЭС вплотную, $K_{эф} = 0,98$, т.е. самоподдерживающаяся цепная реакция невозможна.

Рассматривалось также объединение вплотную (квадратная решетка 8×8 см) полностью заполненного отсека (28×72 = 2016 ТВС). Предполагалось, что все ТВС имеют одинаковое выгорание 26 МВт·сут/кг и консервативный профиль выгорания по высоте. По программе STEPAN-БВ получен $K_{эф} = 0,998$, т.е. система близка к критической. Для этой гипотетической ситуации 26 МВт·сут/кг можно рассматривать в качестве минимального предела выгорания. Однако маловероятно, что все ТВС отсека соберутся в идеальную тесную решетку.

Более вероятным является отклонение ТВС от вертикали, поскольку они зафиксированы только на уровне крепления подвески к балкам щелевого перекрытия, а их нижняя часть не закреплена. В гипотетическом случае касания нижней частью около 800 ТВС критерий ядерной безопасности $K_{эф} \leq 0,95$ выполняется, если среднее выгорание не ниже 23 МВт·сут/кг с учетом 5%-ной погрешности ее определения. Для топлива обогащением 2,8% среднее выгорание должно быть не меньше 25 МВт·сут/кг. Реальное топливо бассейна выдержки превышает эти ограничения по выгоранию.

Ядерная безопасность бассейна выдержки при сейсмическом воздействии. Землетрясение относится к внешнему воздействию природного происхождения и должно рассматриваться как исходное событие проектной аварии [1]. Для проектной аварии, как уже отмечалось, все топливо формально предполагается свежим. Сейсмическое воздействие приводит в движение бассейн, включая щелевое перекрытие. Поскольку ТВС закреплены только на уровне щелевого перекрытия, они из-за инерции начинают колебаться как маятники относительно стен и дна бассейна.

При горизонтальных колебаниях нижняя часть воды на глубине более 3/4 ширины бассейна считается жестко связанной с его стенками, т.е. колеблется так же, как сам бассейн [9]. Выше происходит сложное движение воды, в том числе возможны волновые колебания сво-

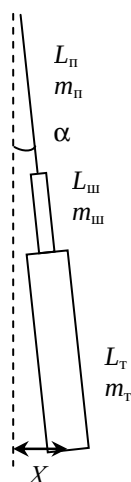
бодной поверхности жидкости. Вода, движущаяся вместе со стенками бассейна, оказывает сопротивление движению ТВС. Поскольку в верхней части бассейна находятся тонкие подвески, сопротивление их движению со стороны воды не играет существенной роли. Поведение ТВС при сейсмическом воздействии можно рассматривать как движение ансамбля маятников в воде в системе отсчета бассейна. Задача упрощается, если пренебречь изгибами ТВС и подвесок.

На рис. 3 приводится схема ТВС (индекс «т») с универсальной подвеской («п») и штангой («ш»), приваренной к несущей трубе ТВС. В результате сейсмического воздействия сборка отклоняется от вертикали на угол α , что приводит к смещению нижней части ТВС на расстояние X . Сила сопротивления воды на высоте z при движении элемента ТВС или подвески высотой dz определяется по формуле

$$F_c(z) = \frac{1}{2} C_x(z) \rho u^2(z) D dz + \frac{\mu}{L} a(z) dz,$$

где $C_x(z)$ — коэффициент сопротивления; ρ — плотность воды; μ — присоединенная масса воды; $u(z)$, $a(z)$ — скорость и ускорение на высоте z соответственно; D , L — диаметр и длина ТВС или подвески соответственно. Коэффициент сопротивления определяется по формуле $C_x = c \text{Re}^{-b} k$, где c — константа, зависящая от геометрии; Re — число Рейнольдса; b — показатель степени; k — поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность движения и взаимное влияние ТВС.

Записав уравнение динамики с учетом моментов всех действующих сил, можно после



Р и с. 3. Схема сборки ТВС с подвеской (L — длина, m — масса элемента)

преобразований получить уравнение, описывающее поведение гармонического осциллятора с нелинейным затуханием и внешней возмущающей силой f (силой инерции):

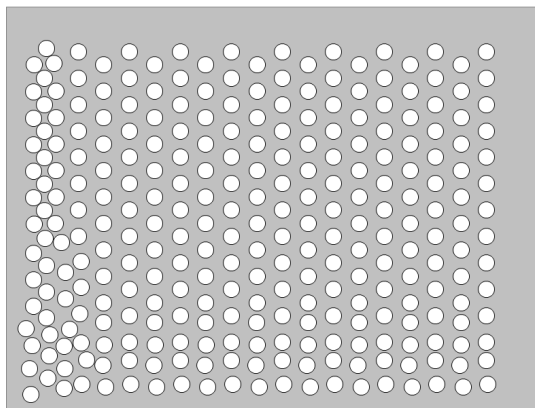
$$\ddot{X} + \beta \dot{X}^{2-b} + \omega_0^2 X = -f(t), \quad (1)$$

где β — коэффициент, определяемый геометрией сборки и вязкостью воды; ω_0 — собственная частота колебаний сборки с учетом присоединенной массы воды; X — отклонение нижней части ТВС от вертикальной оси.

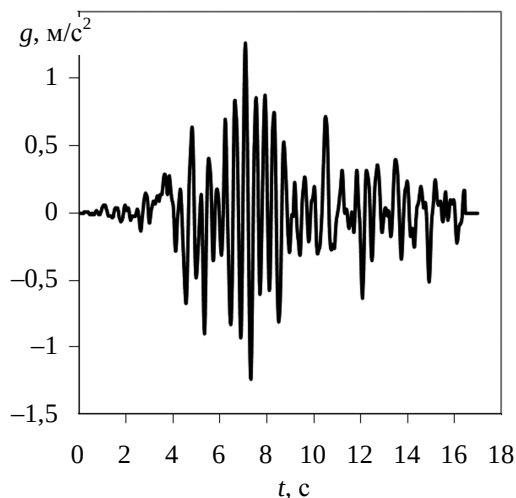
Движение нижней части каждой сборки складывается из колебаний в направлениях X и Y , описываемых уравнением (1). До столкновения со стенками или одна с другой ТВС движутся одинаковым образом, сохраняя исходный шаг решетки. При столкновении со стенкой нижняя часть ТВС отражается и, двигаясь навстречу соседней ТВС, сталкивается с ней, порождая цепную реакцию взаимных столкновений, которые в расчетной модели описываются как неупругое столкновение двух кругов. В результате правильная решетка нарушается. В некоторых местах нижние части ТВС образуют более компактные группы с уменьшенным шагом, что приводит к росту коэффициента размножения.

Рассматривалась динамика движения ТВС во фрагменте отсека бассейна 1-го энергоблока Курской АЭС, вызванного максимальным расчетным землетрясением 7 баллов по шкале MSK-64. Размер фрагмента уплотненного хранения 20×14 ТВС. Горизонтальное сечение фрагмента на уровне нижних концов сборок показано на рис. 4. Слева и внизу — стены бассейна, сверху — каньон. Был выбран момент наибольшего сближения нижних частей ТВС при сейсмическом воздействии, характерная акселерограмма (ускорение g) которого в одном из горизонтальных направлений показана на рис. 5.

Для конфигурации нижних частей ТВС, показанной на рис. 4, по программе STEPAN-БВ для свежего топлива обогащением 2,6% $K_{эф}$ составил 0,937. Поток нейтронов максимален в левом нижнем углу. Запас до критерия ядерной безопасности можно увеличить, если, например, оставить свободным от ТВС крайний левый ряд. В этом случае нижние части ТВС при колебаниях не достигнут левой стены и $K_{эф}$ не превысит 0,823.



Р и с. 4. Положение нижних частей ТВС через 5,2 с после начала землетрясения



Р и с. 5. Акселерограмма горизонтальных колебаний по направлению X (высотная отметка 20 м)

Заключение. Бассейн выдержки РБМК является физически большой слабосвязанной системой, ядерная безопасность которой в аварийных ситуациях определяется увеличением урановодного отношения в отдельных локальных областях или во всем отсеке. Данное отношение может измениться в результате кипения воды или при нарушении шага решетки.

При штатном хранении уран-эрбиевого топлива в пеналах самоподдерживающаяся цепная реакция невозможна при любом выгорании топлива, плотности воды и шаге решетки. При уплотненном беспенальном хранении для реальной загрузки ядерная безопасность обеспечивается во всем диапазоне плотности воды, самоподдерживающаяся цепная реакция невозможна даже при образовании тесной решетки всеми ТВС отсека.

При отсутствии специальной установки для контроля выгорания топлива, выгруженного из РБМК, правила требуют рассматривать его как

свежее при анализе проектных аварий. Расчеты показали, что в реальных сценариях изменения плотности воды, связанного с кипением при потере охлаждения или заливом ранее обезвоженного бассейна, ядерная безопасность обеспечивается даже для свежего топлива.

В запроектных авариях, требующих реалистического (неконсервативного) анализа, в гипотетических случаях нарушения шага решетки ТВС в большей части объема бассейна ядерная безопасность уплотненного хранения обеспечивается при ограничении на минимальное выгорание топлива, которое легко выполняется в реальной загрузке. Целесообразно ввести учет выгорания в практику расчетов при обосновании безопасности не только запроектных, но и проектных аварий.

При максимальном проектном землетрясении (исходном событии проектной аварии) ядерная безопасность при уплотненном хранении обеспечивается для любого выгорания топлива, включая свежее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии. НП-061-05. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005.
2. **Общие** положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-89/97. ПНАЭ Г-01-011-97. М.: Госатомнадзор, 1997.
3. **Babaytsev M.N., Fedosov A.M., Glembotsky A.V. et al.** The STEPAN Code for RBMK Reactor Calculation: Preprint IAE-5660/5, 1993.
4. **Halsal M.** A Summary of WIMS-D4 Input Options. Winfrith, AEEW-1337, 1980.
5. **MCNP** — a General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4B, LA-12625-M, 1997.
6. **Житарев В.Е., Гераскин И.Н., Качанов В.М. и др.** Способ контроля безопасности бассейнов выдержки хранилищ отработавшего ядерного топлива АЭС. Патент РФ RU(11) 2488181 (13) С1. — Бюл. Роспатента, 2013, № 20.
7. **Михайлов Д.А., Федосов А.М., Федоров В.Л.** Исследование запроектной аварии СЦР в приреакторном бассейне выдержки. — В сб.: Актуальные проблемы физики ядерных реакторов — эффективность, безопасность, нераспространение. XV семинар по проблемам физики реакторов. М., МИФИ, 2008, с. 99—102.
8. **Frepoli C., Mahaffy J., Hochreiter L.** A moving subgrid model for simulation of reflood heat transfer. — Nucl. Engng Design, 2003, v. 224, № 2, p. 131—148.
9. **Бирбраер А.Н.** Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб: Наука, 1998.

Поступила в Редакцию 22.05.15