

DOI: 10.12737/article\_59cd0c592c20d6.03870166

<sup>1</sup>Енговатов И.А., д-р техн. наук, проф.<sup>1,2</sup> Синюшин Д.К., зам. начальника отдела АО «ГСПИ»<sup>1</sup>Национальный исследовательский московский государственный строительный университет<sup>2</sup>Акционерное общество «Государственный специализированный проектный институт»

## МИНИМИЗАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ

dimsin@bk.ru

На сегодняшний день на международном рынке развивающимися странами сформировался спрос на большие энергетические мощности. Многие развитые страны и частные компании уже предлагают свои услуги по предоставлению энергии разных источников. В этой борьбе Росатом поставил цель – предложить миру чистую, безопасную и главное – дешевую энергию. В статье автор затрагивает темы сокращения издержек на всех стадиях жизненного цикла энергоблока, а также предлагает рассмотреть сокращение издержек в части обращения с радиоактивными отходами на стадии «вывод из эксплуатации» за счет применения «низкоактивируемого бетона». Основное внимание автор концентрирует на анализе расчетных исследований наведенной активности бетонов радиационной защиты, и на осознанном выборе «низкоактивируемого бетона» для устройства радиационной защиты реакторной установки.

**Ключевые слова:** энергоблоки АЭС, вывод из эксплуатации, наведенная активность, радиоактивные отходы, бетоны радиационной защиты.

Стратегический совет Росатома в 2014 году сформировал шесть ценностей Росатома. Одна из этих ценностей – На шаг впереди: мы стремимся быть лидером на глобальных рынках. Мы всегда на шаг впереди в технологиях, знаниях и качествах наших сотрудников. Мы предвидим, что будет завтра, и готовы к этому сегодня. Мы постоянно развиваемся и учимся. Каждый день мы стараемся работать лучше, чем вчера (из протокола Стратегического совета №1-СС/3-Пр от 03.07.2014).

Также Росатом поставил перед собой амбициозные цели – снижение себестоимости продукции и повышение доли на международном рынке. И такие цели необходимы. Рынок энергии уже сформирован, и игроков на этом рынке больше чем достаточно. А значит, Росатом должен предложить такие энергоблоки АЭС, которые смогут конкурировать по стоимости и срокам строительства с остальными игроками: Китай, США, Франция и др., а также предложить выгодные условия по эксплуатации энергоблока и выводу энергоблока из эксплуатации, и, как следствие, низкую стоимость энергии для развивающихся стран.

Конечно, не стоит забывать и о безопасности АЭС. Мир помнит об уроках Уиндскейла, Три-Майл-Айленда, Сен-Лоран-дез-О, Чернобыля, Фукусимы. Общественность зачастую скептически относится к чистой и безопасной атомной энергии. Поэтому очень важно предложить миру не только дешевую конкурентоспособную энер-

гию, но и энергию, отвечающую всем требованиям безопасности на всех этапах жизненного цикла.

Как известно, жизненный цикл любой электростанции, и не только электростанции, состоит из нескольких основных этапов: выбора площадки, проектирования (проектно-изыскательских работ), строительства, эксплуатации, вывода из эксплуатации и возврата площадки (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что проект окупается только за счет продажи энергии на этапе эксплуатации энергоблока. Остальные этапы жизненного цикла требуют вложений денежных средств.

Согласно рис. 1 можно посчитать минимальную цену одного кВт·ч, при которой проект будет безубыточным.

$$P_{min} = \frac{C_a + C_b + C_c + C_f + C_{dc}}{W \cdot T} \quad (1)$$

Пояснения к формуле 1:

$C_a$  – стоимость этапа «Выбор площадки» и этапа «Проектирование»

$C_b$  – стоимость этапа «Строительство»

$C_c$  – стоимость этапа «Эксплуатация»

$C_f$  – стоимость топлива

$C_{dc}$  – стоимость этапа «Вывод из эксплуатации» и этапа «Возврат площадки»

$W$  – мощность энергоблока

$T$  – время работы энергоблока

Эта цена и будет отправной точкой при конкурентной борьбе не только между корпорациями по атомной энергии разных стран, но и между различными видами энергетики.

На сегодняшний день цена за один кВт·ч зависит от эффективного применения различных инструментов на каждом этапе жизненного цикла. Разберем некоторые из них:

- при этапе «Проектирование» снижение затрат достигается за счет применения современных САПР, которые позволяют снизить время проектирования блока, а также исключить коллизии (ошибки при проектировании, всплывающие на стадии строительства и требующие зачастую большого количества времени и средств для их устранения);

- при этапе «Строительство» снижение затрат достигается за счет применения современных методов возведения зданий и сооружений, грамотного планирования строительства и поставки оборудования. Это касается крупногабаритного оборудования, требующего совместного монтажа со строительными конструкциями.

Вероятно, на этапе «Вывод из эксплуатации» также можно снизить затраты. Рассмотрим этот этап подробнее.

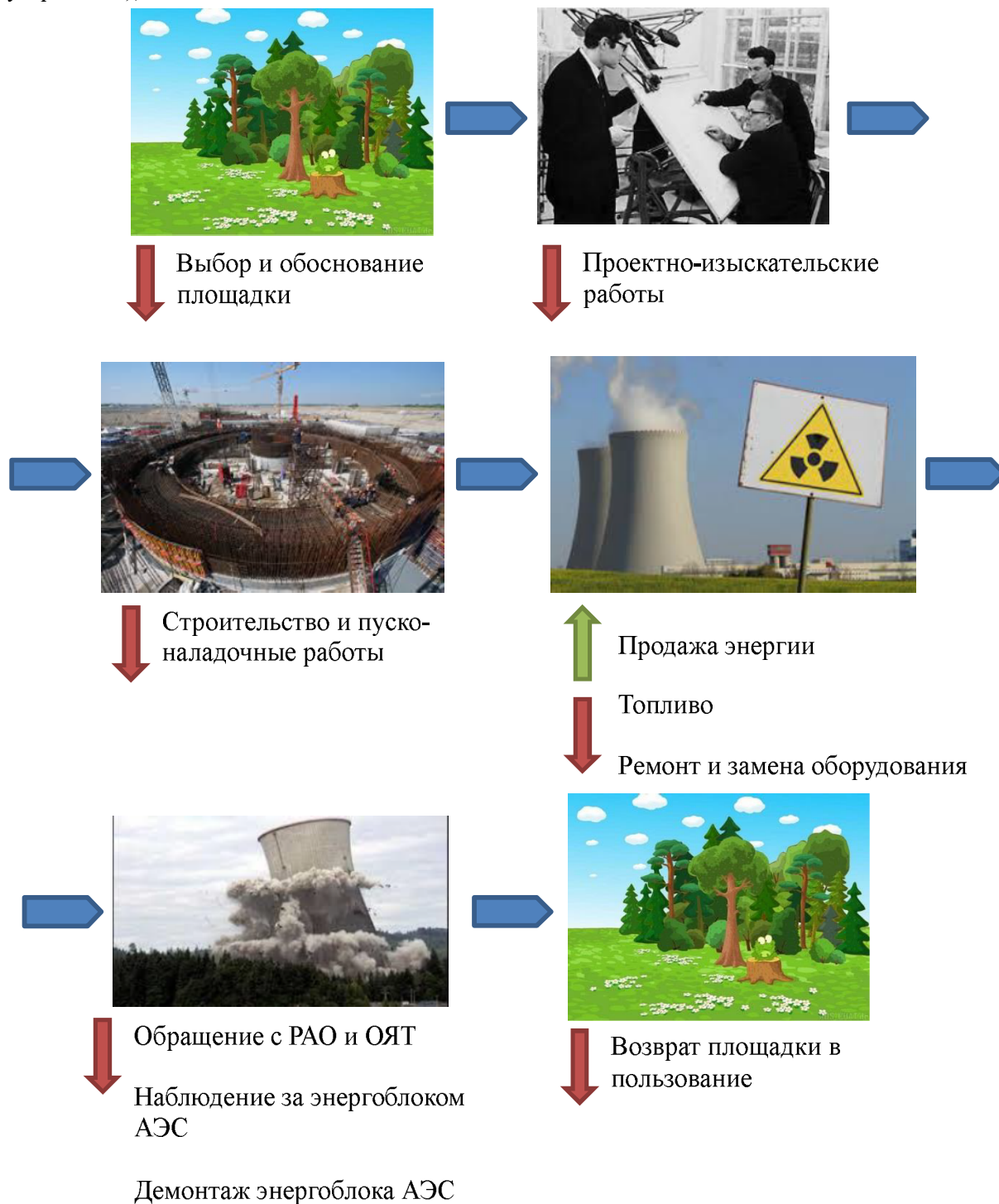


Рис. 1. Жизненный цикл АЭС. РАО – радиоактивные отходы; ОЯТ – отработанное ядерное топливо

Этап «Вывод из эксплуатации» (ВЭ) начинается тогда, когда энергоблок уже не вырабатывает энергию, из реактора выгружено топливо, а жидкости практически всех систем слиты. Но при этом энергоблок находится под наблюдением, является ядерно-радиационным опасным объектом (ЯРОО), и требует к себе все того же отношения в части физической защиты, снабжения электроэнергией и пр. Все активированные конструкции и оборудование являются уже радиоактивными отходами (РАО) разных категорий: от низкоактивных отходов до высокоактивных. Стоимость обращения с  $1 \text{ м}^3$  РАО различ-

ного вида варьируется от 1,2 млн. руб. для высокоактивных (ВАО) и до 130 тыс. руб. для низкоактивных (НАО) [1]. Поэтому очень важно найти золотую середину во времени, при которой можно переходить от пассивного сохранения энергоблока под наблюдением к активным действиям по демонтажу энергоблока, и при которой соотношение стоимости этапа ВЭ и безопасности персонала, населения и окружающей среды при проведении работ будет максимально выгодным. На рисунке 2 показано оптимальное время для активных действий по выводу из эксплуатации существующих энергоблоков АЭС. Сегодня оно составляет примерно 25–30 лет [2].

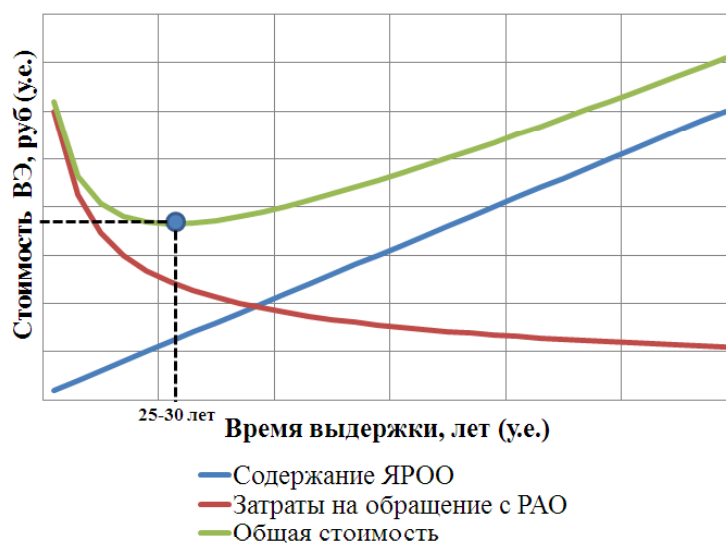


Рис. 2. оптимальное время при ВЭ энергоблока АЭС

Основным источником РАО является оборудование и радиационно-тепловая защита, выполненная из особого бетона. Исследования показали, что объем радиоактивных отходов, состоящих из активированного бетона, может составлять десятки тысяч кубических метров [3].

Результаты анализа расчетов, проведенных на кафедре СОТАЭ, НИУ МГСУ, показали, что осознанный выбор низкоактивируемых бетонов для устройства радиационной защиты на стадии «Проектирование» позволяет снизить количество и категорию РАО, и, как следствие, сократить время пассивного наблюдения за энергоблоком на стадии «Вывод из эксплуатации». Стоит отметить, что такой подход отвечает требованиям отечественных нормативных документов, а также документов МАГАТЭ [4, 5].

Разберемся с понятием «низкоактивируемый бетон».

Как известно, бетон является сложнейшим конгломератом. Основные компоненты бетона — вяжущее, вода, мелкий заполнитель — песок и крупный заполнитель — щебень горной породы. Каждый компонент представляет собой совокупность некоторых химических элементов. Детальное рассмотрение химического строения каждого

компонента бетонной смеси показало, что бетонная смесь содержит в себе практически всю таблицу Менделеева, причем концентрации химических элементов в бетоне варьируются в следующем порядке [2, 6-8]: более 1% по массе (основные элементы, например, кальций, железо), от 1 % до 0,01 % (примесные элементы, например, литий) и менее 0,01% по массе (следовые элементы, например европий, торий, уран).

Под воздействием нейтронного излучения, генерируемого активной зоной реактора, химические элементы подвергаются активации — переходом из стабильного состояния в возбужденное — нестабильное. Образующиеся нестабильные радиоактивные изотопы определяют наведенную радиоактивность бетона — источника РАО. Такого рода исследования проводились в России и за рубежом [2, 3, 6, 8, 9–10]. Исследования велись по нескольким направлениям:

1. исследование содержания элементов в составе конструкционных и защитных материалов, на изотопах которых образуются долгоживущие радионуклиды, так называемых активационно-опасных элементов;

2. расчетные исследования уровней активации защитных материалов и конструкций на остановленных ядерных установках;

3. расчетное прогнозирование объемов и классификации радиоактивных отходов при будущем выводе из эксплуатации действующих ядерных установок.

Исследования показали, что активационно-опасные элементы имеют разные концентрации в бетоне: от основных до следовых [6, 7]. Важнейшие активационно-опасные химические элементы и их характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Важнейшие активационно-опасные элементы и их характеристики

№	Радионуклид	Реакция образования	Определяющий вид излучения: α, β, γ-излучение, КХ-характеристическое излучение, электроны Ожэ	Период полураспада T <sub>1/2</sub>
1	<sup>3</sup> H	<sup>6</sup> Li(n,p) <sup>3</sup> H	β	12,35 года
2	<sup>41</sup> Ca	<sup>40</sup> Ca(n,γ) <sup>41</sup> Ca	электроны Ожэ	1,4·10 <sup>5</sup> лет
3	<sup>152</sup> Eu	<sup>151</sup> Eu(n,γ) <sup>152</sup> Eu	γ	13,542 лет
4	<sup>154</sup> Eu	<sup>153</sup> Eu(n,γ) <sup>154</sup> Eu	γ	8,592 лет
5	<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Fe(n,γ) <sup>55</sup> Fe	КХ	2,73 года
6	<sup>60</sup> Co	<sup>59</sup> Co(n,γ) <sup>60</sup> Co	γ	5,27 лет
7	<sup>63</sup> Ni	<sup>62</sup> Ni(n,γ) <sup>63</sup> Ni	β	101,1 лет
8	<sup>59</sup> Ni	<sup>58</sup> Ni(n,γ) <sup>59</sup> Ni	β, КХ	7,5·10 <sup>4</sup> лет
9	<sup>94</sup> Nb	<sup>93</sup> Nb(n,γ) <sup>94</sup> Nb	γ	2,03·10 <sup>4</sup> лет
10	<sup>232</sup> Th	<sup>232</sup> Th(n,γ) <sup>233</sup> U	α	1,58·10 <sup>5</sup> лет
11	<sup>238</sup> U	<sup>239</sup> U(n,γ) <sup>239</sup> Pu	α	2,4·10 <sup>4</sup> лет

В зависимости от периода полураспада каждого образованного радионуклида, мощности потоков нейтронов разных энергий и времени облучения материала можно составить график спада удельной активности с течением времени. При-

мер графика спада удельной активности основных радионуклидов и суммарной удельной активности, выполненный для бетона «сухой» защиты на серпентините в геометрии шахты реактора ВВЭР-ТОИ при времени облучения 60 лет приведен на рис. 3.

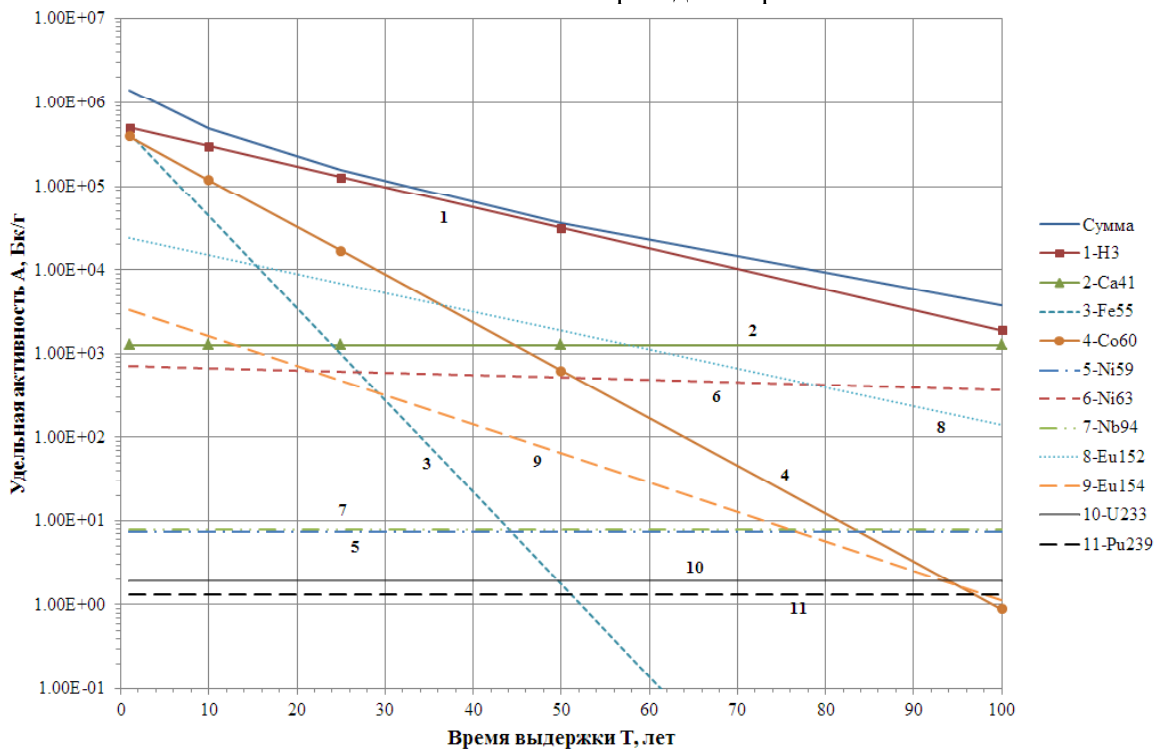


Рис. 3. График спада удельной активности основных радионуклидов и суммарной удельной активности с течением времени

Значит, низкоактивируемым бетоном будем называть такой бетон, в химическом составе которого концентрации активационно-опасных элементов будут минимальны. То есть содержание активационно-опасных элементов должно быть минимальным в каждом компоненте бетонной смеси.

Для расчета наведенной активности радиационной защиты были выбраны основные составы бетонов, охватывающие широкий диапазон выбора крупного и мелкого заполнителя, и

добавок. Исходными данными для задачи служили геометрия шахты реактора ВВЭР-ТОИ и соответствующие для этого реактора характеристики потоков нейтронов разных энергий. Методика расчета принималась в соответствии с [10-13].

Расчеты показали, что в зависимости от выбора заполнителя и добавок, активация и спад суммарной удельной активности будут различны. На рис. 4 приведены результаты расчетов активации и спада суммарной удельной активности для различных бетонов с течением времени.

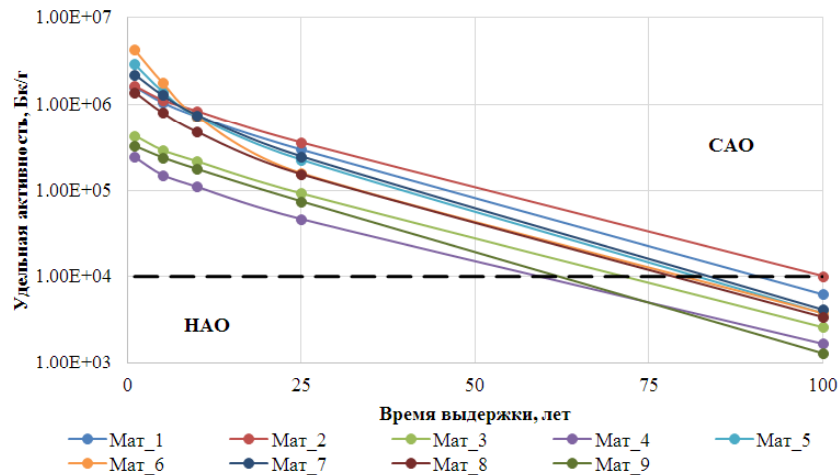


Рис. 4. Активация и спад суммарной удельной активности для различных составов бетонов с течением времени\*

\* отличием разных материалов является их технологический состав, а также вид заполнителей, вяжущих, добавок. В настоящий момент технологические составы бетонов готовятся к патентованию

Как видно из рисунка 4, осознанный выбор низкоактивируемого бетона для устройства радиационной защиты энергоблока АЭС на стадии «Проектирование» влечет за собой сдвиг кривой «Обращение с РАО» рисунка 2, и, как следствие, сдвиг кривой «Общая стоимость» при выводе энергоблока АЭС из эксплуатации (рис. 5). Так,

материал №2 на протяжении 100 лет будет относиться к среднеактивным отходам, когда материал №4 уже через 60 лет можно будет отнести к низкоактивным отходам. Следовательно, сохранение ЯРОО под наблюдением, при условии возможности демонтажа только низкоактивных отходов, можно сократить на 40 лет.

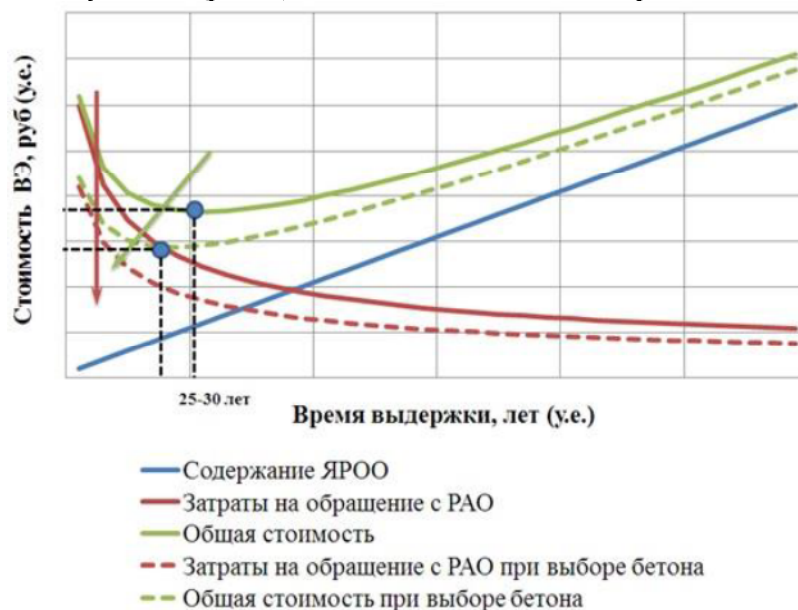


Рис. 5. Оптимальное время ВЭ при осознанном выборе бетона радиационной защиты

**Выводы:**

Осознанный выбор низкоактивируемых бетонов для устройства радиационной защиты реактора на стадии «Проектирование» позволяет:

1. сократить время сохранения ЯРОО под наблюдением на этапе «Вывод из эксплуатации»;
2. снизить объемы и категорию образующихся РАО, и сократить стоимость обращения с РАО на этапе «Вывод из эксплуатации»;
3. сместить точку перехода от пассивного наблюдения за ЯРОО к активным действиям по демонтажу строительных конструкций и оборудования за счет минимальной активности материала.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Иванов Е., Коротков А., Пырклов И. Радионуклидный вектор. М.: Росэнергоатом, 2015. №1. С. 42–45.
2. И.А. Енговатов, В.П. Машкович, Ю.В. Орлов, Б.Г. Пологих, Н.С. Хлопкин, С.Г. Цыпин. Радиационная безопасность при выводе из эксплуатации реакторных установок гражданского и военного назначения. Проект МНТЦ №465-97/ Под редакцией Н.С. Хлопкина. М.: Изд. «ПАИМС», 1999. 300 с.
3. Былкин Б.К., Давыдова Г.Б., Журбенко Е.А. Радиоактивные отходы при демонтаже реакторных установок // Атомная энергия. 2011. Т.110. №3. С. 171–172.
4. Decommissioning Strategies for Facilities Using Radioactive Material. Safety Reports Ser. № 50. Vienna: IAEA, 2007.
5. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока АС: НП-012 – 99. ГАН России, Москва 1999 г.
6. Evans J.C., Lepel E.A., Sundens R.W. et. al. Long-lived activation products in Light-water Reactor Construction Materials: Implication for Decommissioning // Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle. 1988. Vol. 11(1). P. 1–39.
7. Radiation Safety Assurance: Decommissioning Nuclear Reactors at Civil and Military Installations. Engovatov I.A., Mashkovich V.P., Orlov Y.V., Pologikh B.G., Khlopkin N.S., Tsy-pin. Monographia. Arlington, VA 22201 USA 2005. Ser. ISTC Science and Technology Series Том Volume 4.
8. Былкин Б.К., Енговатов И.А. Вывод из эксплуатации реакторных установок. Монография. М.: Изд. МГСУ, 2014. С. 228.
9. Nazarov V.M., Frontyasyeva M.V., Engovatov I.A. et al. N.I. Activation studies of concrete binding agent ingredients used for nuclear radiation shielding. Kernenergie. 1991. 34. S. 7–8.
10. Былкин Б.К., Енговатов И.А. Кожевников А.Н. Выбор бетона радиационной защиты для АЭС нового поколения // Атомная энергия. 2015. Т.118. Вып. 6. С.350–354.
11. Енговатов И.А., Былкин Б.К., Кожевников А.Н. Оптимизация составов бетонов радиационной защиты АЭС / Сборник докладов девятой международной научно-технич. конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2014) // Концерн Росэнергоатом (Москва, 21-23 мая 2014 г.), М.: Концерн Росэнергоатом, 2014. С. 311–316.
12. Былкин Б.К., Енговатов И.А., Кожевников А.Н., Синюшин Д.К. Радиоактивные отходы активированных конструкций бетонной защиты при демонтаже ядерных энергетических установок / Сборник докладов десятой юбилейной Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» // РАН –ГНЦ ФЭИ (Москва - Обнинск, 22-25 сен. 2015 г.), М.: ООО «САМ Полиграфист», 2015. С. 311–316.
13. Былкин Б.К., Кожевников А.Н., Енговатов И.А., Синюшин Д.К. Определение категории радиоактивности бетона радиационной защиты ядерных установок при выводе их из эксплуатации // Атомная энергия. 2016. Т.121. Вып.5. С. 298–300.

*Информация об авторах*

**Енговатов Игорь Анатольевич**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики.

E-mail: eng46@mail.ru.

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

**Синюшин Дмитрий Константинович**, старший преподаватель кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; зам. начальника архитектурно-строительного отдела

E-mail: dimsin@bk.ru.

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Акционерное общество «Государственный специализированный проектный институт»  
Россия, 115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

---

Поступила в сентябре 2017 г.

© Енговатов И.А., Сinyushин Д.К., 2017

---

**Engovatov I.A., Sinyushin D. K.**  
**MINIMIZATION OF RADIOACTIVE WASTES IN DECOMMISSIONING OF NEW  
GENERATION NUCLEAR POWER PLANTS**

*Today developing countries have created a demand for large energy capacities on the international markets. Lots of developed countries and private companies are already offering energy supplies from different sources. In this fight, Rosatom has set a goal - to offer the world a clean, safe and, most importantly, cheap energy. This article is dedicated to the topic of cost reduction at all stages of the life cycle of the power unit. The author suggests to consider cost reduction opportunities in radioactive waste management at the "decommissioning" stage behind the usage of "low activated concrete". The article contains data analysis on induced activity of the radiation protective concretes which supports a conscious choice of "low activated concrete" for radiation protection module of the reactor*

**Keywords:** *NPP blocks, decommissioning, neutron induced activity, radioactive waste, radiation shielding concrete.*

---

*Information about the authors*

**Engovatov Igor Anatolyevich.**, DSc., Professor.

E-mail: eng46@mail.ru.

National Research Moscow State University of Civil Engineering.

Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hw, 26.

**Sinyushin Dmitry Konstantinovich**, senior lecturer, deputy head of department

E-mail: dimsin@bk.ru.

National Research Moscow State University of Civil Engineering.

Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe hw, 26.

JSC "State Specialized Design Institute"

Russia, 115088, Moscow, Sharikopodshipnikovskaya st., 4.

---

*Received in September 2017*

© Engovatov I.A., Sinyushin D.K., 2017