

О ЗНАЧИМОСТИ ПРИНЦИПА РАДИАЦИОННОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ МЕЖДУ ДОБЫВАЕНЫМ УРАНОМ И ЗАХОРАНИВАЕМЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

А.Н. Шмелев

*Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), г. Москва*



Обсуждается вопрос важности учета принципа радиационной эквивалентности (РЭ) добываемого из недр урана и захораниваемыми радиоактивными отходами (РАО) в построении стратегии топливного цикла ядерной энергетики. Приводятся соображения, указывающие на то, что даже для крупномасштабной ядерной энергетики длительного функционирования роль этого принципа может оказаться незначительной.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в ряде публикаций, посвященных рассмотрению сценариев будущей крупномасштабной ядерной энергетики и ее топливного цикла [1-3], обсуждается принцип радиационной эквивалентности (а также его модификация - принцип радиационно-миграционной эквивалентности) между добываемым из недр ураном и захораниваемыми радиоактивными отходами. При этом утверждается, что организация топливного цикла, в котором реализуется этот принцип, обеспечит сохранение экологического равновесия, что важно как с точки зрения собственно баланса активности, так и притяжения ядерной энерготехнологии обществом. Рассматривается также применение этого принципа и к условиям ядерной энергетики России [3,4].

Вопрос об опасности долгоживущих РАО не нов. Еще в конце 80-х гг. в США была сформирована программа CURE (**C**lean **U**se of **R**eactor **E**nergy), где формулировалась задача об уменьшении радиотоксичности РАО, в частности путем их трансмутации в ядерных реакторах [5]. В этой программе в качестве **меры** их относительной опасности рассматривалась радиотоксичность извлекаемого из недр урана (при этом принималась во внимание также и миграционная способность захораниваемых радионуклидов), но в то же время еще не выдвигалось условие достаточности снижения опасности РАО до уровня добытого урана, как это теперь сформулировано в виде принципа радиационной эквивалентности [1-4].

Однако при внимательном рассмотрении как самого принципа, так и путей его реализации возникает ряд вопросов, на которые, к сожалению, в соответствующ-

щих публикациях не дается ответов. А это, в свою очередь, порождает сомнение в самой значимости принципа.

ТОЛКОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАДИАЦИОННОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Как подчеркивается в работе [1], безопасность захоронения большого количества радиоактивных отходов на десятки тысяч и миллионы лет вызывает справедливые сомнения, связанные со степенью надежности столь долговременных геологических и особенно «исторических» прогнозов. Авторы утверждают, что сомнения могут быть преодолены, если удастся обеспечить баланс между радиационной опасностью захораниваемых радиоактивных отходов и урана, извлекаемого из земли (радиационно-эквивалентное захоронение РАО), что и принимается в качестве требования к ядерной технологии. При этом в топливном цикле должны быть определенным образом сформированы потоки сжигаемых материалов с достаточно низкими технологическими потерями. Радиоактивным отходам после выдержки несколько сотен лет придают минералоподобную или другую физико-химическую форму, устойчивую к миграции в грунте. Затем захоранивают их в естественно-радиоактивных геологических формациях, остающихся после добычи урана, в количествах, эквивалентных по радиационной и биологической опасности извлеченному урану.

Таким образом, если в основу подхода к построению сценариев будущей крупномасштабной ядерной энергетики и ее топливного цикла будет положен принцип радиационной эквивалентности, то это означает, что постулируется его достаточность для решения проблемы долгоживущих РАО. Иными словами, речь идет о могильниках РАО в местах, из которых извлечен уран и которые определяют топливную базу ядерной энергетики.

О ТОПЛИВНОЙ БАЗЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Крупномасштабная ядерная энергетика (ЯЭ) нашей планеты мыслится на уровне ~ 5000 ГВт (эл) (что более, чем на порядок превышает мировую ядерную энергетику конца XX в.), и по мысли авторов принципа РЭ она должна базироваться на быстрых реакторах, сжигающих уран практически полностью (конечно, с учетом потерь в топливном цикле). Это значит, что ЯЭ будет расходовать $(7-10) \times 10^3$ т природного урана ежегодно. Как известно, в богатых природных месторождениях нашей планеты содержится около 10^7 т урана. Из сопоставления запасов дешевого урана богатых месторождений и его ежегодного расхода можно заключить, что этого урана хватит более, чем на тысячу лет для такой крупномасштабной ЯЭ. Этот вывод представляется принципиально важным для реализации в будущем принципа РЭ. Ведь даже такая крупномасштабная ЯЭ, по-существу, очень долгое время может базироваться на уране (включая и отвальный уран) из крупных богатых месторождений, которых на планете не так уж и много. Поэтому при реализации принципа РЭ придется поместить именно в районы этих месторождений столько же эквивалентной радиоактивности, сколько было изъято.

ГЛОБАЛЬНЫЙ И ЛОКАЛЬНЫЙ АСПЕКТЫ ПРИНЦИПА РЭ

Глобальный аспект. Принцип РЭ требует сохранения равновесия по эквивалентной радиоактивности. Если рассматривать глобальный аспект, то такое требование выглядит по меньшей мере странным. Даже, если будет сожжен весь уран из богатых месторождений нашей планеты (на что потребовалось бы около тысячи лет), то это составит около 5×10^6 т продуктов деления. После их выдержки в

течение нескольких сотен лет [1] их эквивалентная радиоактивность сравнивается с таковой изъятых урана. Если учесть, что урана в морской воде около 4×10^9 т, а в земной коре $\sim 10^{14}$ т, то окажется, что эквивалентная радиоактивность 5×10^6 т продуктов деления (а с учетом соответствующей выдержки это то же самое, что радиоактивность такого же количества урана) составит исчезающе малую величину по отношению к общепланетарной активности [6]. Если же учесть, что общепланетарная активность не исчерпывается ураном (есть еще торий, калий и др.), то значимость такого требования выглядит сомнительной.

Локальный аспект. Принцип РЭ требует вернуть эквивалентную радиоактивность в то же место и приблизительно столько же, сколько было ее изъято при добыче урана. Однако поскольку богатых месторождений природного урана, из которых он изымался, не так уж много, то реализация этого принципа выглядит весьма туманной. Поясним это на простом примере.

Япония сжигает уран, добытый в Австралии, Африке и, возможно, в Канаде. В соответствии с этим принципом продукты деления в виде РАО (после выдержки) Япония должна будет возвращать обратно. При этом возникают, по меньшей мере, два вопроса: а) испытывают ли страны-экспортеры какие-либо неудобства из-за того, что радиоактивности, связанной с проданным ураном, им не хватает; б) готовы ли они принимать японские РАО (пусть даже и после нескольких сотен лет выдержки) обратно для их окончательного захоронения в разработанные месторождения. Имеются большие сомнения в том, что удастся получить положительные ответы на эти вопросы.

Правда, можно возразить, что это - вопрос взаимоотношений Японии со странами-экспортерами урана, в то время как нас больше интересует ситуация применительно к России. Что же касается ситуации в России, то, на наш взгляд, она довольно похожа на ситуацию с Японией. Действительно, исторически так сложилось, что уран, которым в настоящее время располагает Россия, - это уран, добытый в значительной мере в Узбекистане, Киргизии, Казахстане, Украине, Чехии, Германии и др. странах. Иными словами, это тоже зарубежный уран, которого крупномасштабной ЯЭ России с быстрыми реакторами может хватить, по-видимому, на пять-десять столетий. Видим, что и в этом случае правомерно формулировать те же вопросы, которые относились к предыдущему примеру с Японией и также можно прийти к выводу о том, что значимость выдвинутого принципа и в этом случае выглядит весьма сомнительной.

Таким образом, роль принципа РЭ может оказаться несущественной и тогда стратегии развития ЯЭ и ее топливного цикла, которые опираются на этот принцип, также окажутся нуждающимися в коррекции.

НЕОБХОДИМОСТЬ ИМЕТЬ МОГИЛЬНИКИ РАО - НЕ МОЖЕТ ЛИ ЭТО БЫТЬ ОШИБКОЙ ЯДЕРНЫХ СТРАТЕГОВ?

Считается, что одним из «родимых пятен» ядерной энерготехнологии является необходимость иметь могильники для практически вечного надежного захоронения долгоживущих РАО (здесь речь, конечно, идет об основной массе высокоактивных РАО). Неотъемлемой частью рассматриваемых стратегий с использованием принципа РЭ также являются могильники РАО. Но, вообще говоря, так ли уж неотвратимо наличие могильников для ядерной энерготехнологии, основанной на делении? Каковы те неотвратимые факторы, которые заставляют мириться с таким техническим решением? Их, по-видимому, несколько, однако из наиболее принципиальных, по нашему мнению, выделим следующие. Это высокая радиотоксичность и длительный период полураспада радионуклидов (сотни тысяч и миллионы

лет), определяющие временной масштаб надежной изоляции их от окружающей среды. В том случае, если эти радионуклиды будут подвергаться обезвреживанию (трансмутации) тем или иным способом, то в технологическом процессе опять же возникнут радиоактивные отходы, извлечение нуклидов из которых будет не под силу достигнутому уровню развития технологии. Что же делать? По-видимому, необходимо будет подождать следующего дальнейшего развития технологии, а когда она будет разработана, то извлечь оставшуюся часть и ее обезвредить. И так поступать до тех пор, пока эти отходы перестанут представлять опасность для окружающей среды и для человека.

Тогда при рассмотрении вариантов стратегий развития крупномасштабной ЯЭ имело бы смысл ставить вопрос не о могильниках, а о временных хранилищах РАО и развивать технологию обезвреживания (трансмутации) радионуклидов. Как показывают исследования [7,8], тепловые и быстрые реакторы с современными параметрами не могут быть использованы для эффективной трансмутации большинства долгоживущих продуктов деления. Необходимо разработать специализированные ядерные установки с повышенной плотностью потока нейтронов (но отнюдь не чрезмерно высокой) для того, чтобы трансмутация происходила сравнительно быстро даже для радионуклидов с пониженными сечениями взаимодействия с нейтронами. И кроме того необходимо наличие достаточного избытка нейтронов в системе для использования их на нужды трансмутации. В этом именно и состоят два главных условия для эффективности трансмутации (соответствующий уровень технологии рециклирования трансмутируемых материалов, конечно, тоже подразумевается).

Существуют ли принципиальные запреты на то, чтобы удовлетворить указанным требованиям? Думается, что у физика-ядерщика ответ будет отрицательным: нет, не существует таких запретов. Что касается генерации избыточных нейтронов для нужд трансмутации, то хорошо известно, что термоядерный синтез весьма богат такими нейтронами (при этом речь совсем не идет о термоядерном синтезе для производства коммерческой энергии). Здесь можно также упомянуть и об электроядерном методе генерации нейтронов, хотя его и нельзя признать богатым источником.

Для обеспечения достаточно быстрой трансмутации необходима разработка бланкетов, в которых в зоне трансмутации была бы сформирована повышенная плотность потока нейтронов. Как известно, это зависит не только от наличия интенсивного источника нейтронов, но также и от формирования соответствующей структуры бланкета и использования материалов с низким сечением захвата нейтронов. Пример такого решения задачи описан в работе [9], где рассмотрена трансмутация осколочного цезия (без предварительного выделения долгоживущего изотопа - ^{135}Cs) в бланкете термоядерной установки типа ITER.

Если исследования покажут, что удастся удовлетворить указанным требованиям, тогда на смену философии, где ядерная энерготехнология ассоциируется с необходимостью иметь могильники РАО, может придти новая философия, в которой накапливающиеся долгоживущие радионуклиды обезвреживаются, а возникающие безвозвратные потери материалов содержатся во временных хранилищах до следующего этапа развития технологии экономически приемлемого извлечения и последующего обезвреживания. И так до тех пор пока они по самым строгим меркам уже перестанут представлять опасность для человека и окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены доводы в пользу того, что при формировании стратегии развития крупномасштабной ЯЭ и ее топливного цикла роль принципа радиационной эквивалентности может оказаться незначительной как в глобальном, так и в локальном аспектах. Высказывается соображение о том, что альтернативой могильникам РАО может быть трансмутация с временным хранением безвозвратных потерь радиоактивных материалов до следующего уровня развития технологии экономически приемлемого обращения с ними.

Литература

1. Белая книга ядерной энергетики/Под ред. Е.О. Адамова. - М.: ГУП НИКИЭТ, 1998.
2. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В., Муратов В.Г., Орлов В.В. Трансмутационный топливный цикл в крупномасштабной ядерной энергетике России. - М.: ГУП НИКИЭТ, 1999.
3. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. и др. Степень приближения к радиоактивной эквивалентности высокоактивных отходов и природного урана в топливном цикле ядерной энергетики России//Атомная энергия. - 1996. - Т.81. - Вып.6. - С. 403-415.
4. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. и др. Модели развития крупномасштабной ядерной энергетики России с трансмутационным ЯТЦ и достижением радиационной эквивалентности высокоактивных отходов и природного урана // Атомная энергия. - 1997. - Т.82. - Вып.1. - С. 21-35.
5. CURE: "Clean Use of Reactor Energy", WHP-EP-0268, Westinghouse Hanford Company, USA, May 1990.
6. Adamov E.O., Ganev I. Kh. and Orlov V.V. Attainment of Radiation Equivalency in Nuclear Power Radioactive Product Management// Nuclear Technology. - 1993 (November). - V.104. - P. 233-240.
7. Salvatores M., Slessarev I. and Tchistiakov A. The Transmutation of Long-Lived Fission Products by Neutron Irradiation // Nuclear Science & Engineering. - 1998. - V. 130. - P.309-319.
8. Kobayashi K., Kawashima K., Ohasi M. et al. Applicability Evaluation to a MOX Fueled Fast Breeder Reactor for a SCNES // Progress in Nuclear Energy. - 1998. - V. 32. - № 3/4. - P. 681-688.
9. Saito M., Apse V., Artisyuk V., Shmelev A. Transmutation of Elemental Cesium: Proc. Intern. Conf. «Future Nuclear Systems - "GLOBAL'99"» (Snow King resort, Wyoming, USA, August 30 - September 2, 1999).

Поступила в редакцию 21.08.2000

Neutron multiplication coefficients for transuranics in various neutron spectra are calculated. Corresponding neutron cross-section data are taken from the new Russian group data set ABBN-93 in comparison with the national evaluated nuclear data libraries BROND-2, ENDF/B-VI, JEF-2 and Jendl-3. It is shown that in a fission neutron spectrum without any moderation, the most of transuranics have high coefficients of neutron multiplication $K \geq 1$. In the standard fast reactor spectrum with a lead coolant some plutonium isotopes keep their high fissile features while minor actinides, Np-237, Am-241, Am-243 and plutonium isotope Pu-242 are characterized by very low coefficients of neutron multiplication, $K \ll 1$. The ways for incineration of minor actinides in hard neutron spectra are also discussed.

УДК 621.039.7

On Significance of Principle of Radiation Equivalence between Mined Uranium and Radiowastes Buried \A.N. Shmelev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages. – References, 9 titles.

Significance of principle of radiation equivalence between uranium mined and radiowastes buried in study of future large scale nuclear power fuel cycle is analyzed. It is concluded that the role of this principle could be negligible in appropriate fuel cycle.

УДК 621.643.536.24

Efficiency of Heat-Exchange of Transversally Streamlined Pipe Bundles with Different Schemes of Surface Element Location \V.T. Buglaev, A.K. Anisin, A.A. Anisin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 6 titles.

Results of experimental research of heat-aerodynamic characteristics of convective surfaces as pipe bundles of different diameters under change of their orientation angle relatively to coolant flow are given. On the basis of the analysis of the obtained data methods to increase the efficiency of pipe heat-exchange devices are offered.

УДК 51-74:621.039.534

Simulation of Parametric Oscillations in a Cooling System of Nuclear Reactors \K.N. Proskuryakov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages. – References, 3 titles.

The mathematical model of parametric oscillations in the two-phase coolant appearing at periodic elasticity change is developed. The relations for calculation of critical value of modulation of an acoustical compressibility of the two-phase medium when undamped oscillations of pressure and coolant consumption appear.

УДК 621.039.517.5

Experimental Research of Temperature Fields on Inner Surface of Technological Channel of the RBMK-Reactor by Thermoscanning Method \A.I. Trofimov, I.A. Chusov, M.A. Trofimov, I.A. Shevtsov, S.P. Pashkov, V.V. Maksimovskiy, A.Ja. Ustujanin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 12 pages, 14 illustrations, 2 tables. – References, 6 titles.

Results of experimental research of allocation of temperature on inner wall of the technological channel are given. It is shown, that the thermoscanning method allows to define change of clearance between the technological channel and graphite on change of temperature fields on the inner surface of the technological channel. The results of experiments with water and air as the coolant and different types of scanners are given.