

УДК 621.039

О РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ ЗАМЫКАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

И.И. Линге

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

В дискуссионном ключе представлено обсуждение вопросов радиационной нагрузки на окружающую среду от переработки отработавшего ядерного топлива различных топливных циклов и возможных преимуществ использования гибридного термо-ядерного реактора. Показана необходимость учёта широкого диапазона реализуемых альтернатив в выборе технологий ядерного топливного цикла. Указано на важность следования признанным подходам к радиационной защите человека и биоты, представленным в публикациях МКРЗ. Отмечается необходимость соответствия требованиям к регулированию безопасности, зафиксированным в международных документах. Подчёркивается, что при доминировании экономических характеристик решающими в оценках эффективности энерготехнологии станут новые экологические критерии, в том числе критерии безуглеродности.

Ключевые слова: ядерная энергетика, отработавшее ядерное топливо, ядерный топливный цикл, выбросы и сбросы, радиоактивные отходы.

ON THE RADIOECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE CLOSURE OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE

I.I. Linge

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Discussion of radiation burden on the environment from spent fuel reprocessing in different nuclear fuel cycles and possible advantages of using a hybrid thermonuclear reactor is presented in a disputable way. The necessity of considering a wide range of alternatives in nuclear fuel cycle is indicated. The importance of following the recognized approaches to the radiation protection of humans and biota, presented in ICRP publications, is pointed out. The need to comply with safety regulation requirements, fixed in the international documents, is noted. It is emphasized that with the dominance of economic characteristics new environmental criteria, including carbon-free criteria, will become decisive in accessing the efficiency of energy technologies.

Key words: nuclear energy, spent fuel, nuclear fuel cycle, discharges, radioactive waste.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-13-17

Целью данной статьи является критический анализ некоторых доводов, сформулированных в статье [1]. Основное внимание в рассматриваемой статье уделено вопросам радиационной нагрузки на окружающую среду от переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) различных топливных циклов. Очевидные достоинства статьи: простой язык, не замыкающийся на специальной терминологии, принципиальность и простота аргументов относительно бесперспективности в долгосрочном плане переработки ОЯТ реакторов деления. Основной причиной названо обрамление нарабатываемых ядерных материалов продуктами деления. Эта причина, по мнению авторов, во многом устраняется, если в качестве источника нейтронов для наработки сырьевых изотопов использовать реакцию не деления, а синтеза в формате гибридного термоядерного реактора с урановым или ториевым бланкетом. Вывод не новый, частью авторского коллектива обоснованный много ранее. В числе последних публикаций можно указать работу [2], но в целом настороженность относительно переработки ОЯТ представляется актуальной, в том числе в условиях распространённой и бездоказательно постулируемой в нашей стране необходимости переработки ОЯТ всех типов или, что также широко распространено, соображений об обязательности выжигания минорных актиноидов.

Одновременно содержание статьи даёт поводы для полемики, включая ряд серьёзных замечаний, из которых наиболее значимыми представляются следующие.

1. Статья не содержит даже краткого раскрытия всего спектра мнений о проблеме, который очень широк. Он включает в себя как доводы об отсутствии объективных причин для выбора технологий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), основываясь на учёте радиационного фактора (разница в радиационном воздействии на работников и население в открытом и замкнутом цикле очень мала) [3, 4], так и по-

зицию полного неприятия ядерной энергетики на государственном уровне вследствие сопровождающих её радиационных рисков, включая и предлагаемую схему с гибридными термоядерными реакторами. Причём последнее позиционирование никак не связано с реальными количественными оценками рисков. Поэтому можно утверждать, что обоснование одного из вариантов ЯТЦ через недостатки другого играет роль мощного ускорителя интенсивности необъективных суждений о ядерной энергетике. В этом смысле обоснование выводов, сделанных в работе [3], более фундаментально. Во-первых, оно выполнено международной организацией, в состав которой входят страны, осуществлявшие переработку ОЯТ (Великобритания, Франция), отказавшиеся от переработки ОЯТ (США) или от атомной энергетики вообще (Италия). Во-вторых, доклад [3] подготовлен по заявке и под контролем организации стран, осуществляющих рыболовство в районах сбросов перерабатывающих предприятий Франции и Великобритании.

2. Материалы статьи полностью игнорируют существующие международно признанные подходы к радиационной защите человека и биоты, представленные в публикациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ), в том числе в Публикации 103 [5], которые составляют сердцевину радиационной защиты, и данные Научного комитета по атомной радиации ООН, который регулярно систематизирует информацию по поступлению радиоактивных веществ в окружающую среду, дозам облучения и наблюдаемым эффектам. Авторами статьи без применения должных процедур (оценка выбросов и сбросов, доз облучения, их прогноз) делаются выводы относительно приемлемости энерготехнологий. Между тем в системе радиационной защиты важную роль играют положения, касающиеся ограниченной применимости радиологических критериев при принятии решений. Об этом очень ясно говорит преамбула раздела 5.7 Публикации 103 [5]. Прокомментируем лишь одно предложение из этого фрагмента: «Иногда оказывается, что радиационный вред будет лишь малой частью суммарного ущерба». По мере возрастания технической сложности источника и увеличения количества индивидуумов, им затрагиваемых, наречие «иногда», по нашему убеждению, должно трансформироваться в наречие «всегда». Если уточнять, в какую сторону должны развиваться оценки эффективности энерготехнологий, то также позволим себе утверждать, что при доминировании экономических характеристик решающими будут новые экологические критерии, в том числе критерии безуглеродности [6].

3. Также полностью игнорируются международно признанные подходы и требования к регулированию безопасности, в том числе зафиксированные в «Объединённой конвенции о безопасности обращения с отработавшим ядерным топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами» (далее — Объединённая конвенция). Объединённой конвенцией, ратифицированной Российской Федерацией в 2005 г., предусмотрены обязательства стран по недопущению существования радиоактивных материалов и веществ в иных формах, нежели в составе: 1) ядерных установок (объекта использования атомной энергии); 2) радиоактивных отходов; 3) сбросов в окружающую среду. Объединённой конвенцией установлено, что «сбросы означают планируемые и контролируемые выбросы в окружающую среду в качестве законной практики в пределах, санкционированных регулирующим органом, жидких или газообразных радиоактивных материалов, которые образовались на регулируемых ядерных установках в ходе нормальной эксплуатации». В рамках российского права последняя категория подразумевает сбросы и выбросы, которые в полном соответствии с Объединённой конвенцией специальным образом регулируются. Иные материалы, упоминаемые в тексте статьи как безвозвратные, такими не являются. Безвозвратные потери не могут образоваться, как излагается в статье, в результате «попадания радиоактивных изотопов на полы и стены рабочих помещений, наружные поверхности оборудования, технологических каналов, печи, тигель, формы и т.д.» [1]. В этом случае у радиоактивных изотопов возможны только два пути (канала): попадание в категорию радиоактивных отходов (при дезактивации в ходе эксплуатации и вывода из эксплуатации) или поступление в окружающую среду (в рамках регламентируемых и контролируемых сбросов и выбросов). В целом представляется полностью несостоятельным и обращение к ряду цитируемых первоисточников (ссылка на сайт в тексте статьи и ссылка на учебное пособие Марийского университета), и использование в качестве доказательных формул утверждений типа: «Авторам этой статьи при обсуждении результатов в частных беседах пришлось столкнуться с такой позицией, что безвозвратные потери, хотя они и существуют, но они никогда не попадут в окружающую среду. Причём какого-либо обоснования такого утверждения не приводится. По мнению тех, кто придер-

живается такой позиции, её следует принимать без обсуждения». За рамками подобной доказательной формулы остаются и регулярные усилия эксплуатирующих организаций по обоснованию допустимых выбросов и сбросов, и такие же регулярные усилия органов государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии, которые эти нормативы согласовывают и контролируют. Регулярная деятельность иных контролирующих ведомств, в том числе ФМБА России и Росгидромета, также как бы несостоятельна — они не видят поступления безвозвратных потерь и угроз, с ними связанных. Отметим, что не видят пока их поступления и авторы статьи, которые фиксируют: «Нет экспериментальных подтверждений, позволяющих утверждать, что безвозвратные потери рано или поздно попадут в окружающую среду». Казалось бы, на этом утверждении эту тему можно было бы и закрыть.

4. В качестве меры радиационной безопасности используется сравнение с радиоактивностью использованного для генерации природного урана. Подобный подход, называемый радиационно-эквивалентным, известен, но также известны его критические оценки [7] и его несоответствие международно признанным подходам к критериям обеспечения радиационной безопасности, предусматривающим оценку доз и рисков для условий планируемого и существующего облучения.

5. Радионуклиды, для которых проведены оценки, в том числе стронций (^{90}Sr) и цезий (^{137}Cs), отнесены авторами к наиболее проблемным. В этой связи необходимо отметить, что ни в одной из систем ценностей (классической, представленной в документах МАГАТЭ, и радиационно-эквивалентной, где основной опасностью рассматриваются минорные актиноиды) они не относятся к радионуклидам, несущим основные риски в долгосрочной перспективе. Короткий период полураспада, хорошие показания сорбции и высокие показатели очистки от них, лёгкость контроля и изученность свойств позволяют охарактеризовать их условно безобидными в сравнении с малосорбируемыми долгоживущими радионуклидами.

6. Неожиданно применение понятий «безвозвратные» и «потери» в контексте обсуждаемой темы. Понятие «безвозвратные» применительно к потерям ядерных материалов давно не используется специалистами. Более того, сам термин «потери» трактуется шире, так как характеристики ядерных материалов (ЯМ) и радиоактивных веществ (РВ) эквивалентны с точки зрения технологического процесса. При переработке ОЯТ ядерным материалам как целевым продуктам исторически уделялось большее внимание. Поэтому понятие «безвозвратные потери» можно найти в старых (ранних) статьях. Объёмный материал по оценке содержания и наличных количеств ядерных материалов в оборотах и отходах ядерного топливного цикла приведён в работе [8]. Сейчас ситуация ещё более разнообразная. Целевыми продуктами по различным технологиям рассматриваются и продукты деления (Cs—Sr в рамках сбалансированного топливного цикла), и фракция Am—Cm и др. Современные требования «Основных правил учёта и контроля ядерных материалов» (НП-030-19) дают следующее определение: потери ядерных материалов — уменьшение количества ЯМ в зоне баланса материалов, обусловленное сбросами и выбросами содержащих ЯМ продуктов, потерями таких продуктов в результате аварий, утрат и радиоактивного распада. Потери в соответствии с НП-030-19 рассматриваются на промежутке времени, равном межбалансовому периоду. Максимум — 1 год. Нормативный документ указывает, что анализ должен проводиться по аттестованным методикам либо расчётными способами. При этом величина этого отклонения не должна превышать величину, утверждённую для конкретной установки. Исходя из данного определения, каждое направление «потерь» подлежит соответствующему контролю и нормируется. Например, на сбросы, выбросы устанавливаются свои разрешения. Величина остаточных «закладок» в технологическом оборудовании нормируется через ядерную и радиационную безопасность и должна учитываться при выводе из эксплуатации. Например, при переработке ОЯТ и перераспределении потоков радиоактивных отходов (РАО) на заводе РТ-1 ФГУП «ПО «Маяк» реализуются следующие этапы. На первом топливо рубится и растворяется. Для большинства оксидного топлива энергетических реакторов коэффициент извлечения ЯМ составляет более 99%. Далее нерастворённые остатки либо подаются в специальное здание-хранилище, либо упаковываются как РАО класса 2—3, предназначенные для захоронения в пункте захоронения РАО. В процессе переработки выделяются целевые компоненты и образуются РАО различных классов — низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО), высокоактивные (ВАО). ВАО остекловываются. САО в текущей схеме завода РТ-1 объединяются с ВАО и также остекловываются. НАО проходят цикл очистки. Часть ЯМ и РВ расходуется на «загрязнение технологического оборудования». Данное загрязнение может носить «неснимаемый характер». Далее при выводе из эксплуатации это всё

становится РАО соответствующего класса, которые должны будут соответствующим образом кондиционироваться. Таким образом, современные заводы по переработке ОЯТ или любая другая ядерная установка являются замкнутыми системами по обращению с РВ и ЯМ на всём жизненном цикле установки. Размыкание происходит только через выбросы РВ, которые составляют обычно не более единиц процентов от разрешённых ПДК, сбросы РВ и образование целевых продуктов, например, урана, плутония. При этом существующие системы нормативной документации и соответствующего контроля обеспечивают выполнение этих требований.

7. Обоснование природы формирования «третьего канала», приведённое в статье [1], не содержит никаких специфических черт, позволяющих исключить их появление на всех иных переделах ЯТЦ, в том числе в иных его конфигурациях, в том числе с гибридными термоядерными реакторами. Процессы «попадания радиоактивных изотопов на полы и стены рабочих помещений, наружные поверхности оборудования, технологических каналов, печи, тигель, формы и т.д.» неизбежны, но урегулированы и обременены комплексом нормативных требований, которые в большинстве случаев должным образом исполняются.

8. Удивляет адресация к таким источникам, как сайт и учебное пособие Йошкар-Олинского университета. Саровское происхождение сайта не есть признак надёжности и обоснованности информации, а у автора учебного пособия, являющегося, по-видимому, отличным специалистом в области сельского хозяйства (более 100 публикаций), нет ни одной научной публикации в реферируемых журналах по вопросам радиэкологии и радиобиологии.

9. Для статьи в целом характерно частое упоминание «неприемлемо большой радиационной нагрузки на окружающую среду». Между тем самое кропотливое применение подходов к оценке вреда объектам живой природы, нормативно закреплённое в критериях отнесения РАО к особым, т.е. подлежащим захоронению на месте, показало, что он имеет ненулевые значения всего в нескольких уникальных ситуациях (объект Карачай на ФГУП «ПО «Маяк» и ряд иных приповерхностных хранилищ РАО) [9]. Вопреки представлениям авторов именно в районе расположения этих объектов наиболее детально изучены пути миграции радиоактивных изотопов, в том числе с участием живых организмов. Достаточно много интересных публикаций по этому вопросу представлено в научном журнале «Вопросы радиационной безопасности». В отношении техногенного облучения человека ситуация также своеобразна. Уже длительное время и со всё большим ускорением облучение в связи с функционированием атомной энергетики, включая все переделы ЯТЦ, становится пренебрежимо малым в сравнении с облучением от природных источников и медицинских процедур [10].

10. Утверждение о том, что «для ОЯТ реакторов деления следует предусмотреть меры надёжного контролируемого хранения. Использовать его можно будет после того, как естественные природные процессы переведут нестабильные изотопы в стабильные и обеспечат приемлемый уровень радиоактивности этих изотопных композиций», также представляется не вполне мотивированным, поскольку подобное контролируемое хранение не ограничено во времени. Выдержка имеет смысл только на относительно короткие сроки (десятки, сотни лет) с целью снижения тепловыделения до значений, которые не препятствуют захоронению РАО в геологической среде.

Изложенное позволяет предположить, что одна из причин появления этой статьи — это длительное существование термоядерных исследований вне контекста нормативно-правового поля, регулирующего все основные виды деятельности в области использования атомной энергии. Положения и мероприятия, заложенные в содержание Федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» Комплексной программой «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергетики в Российской Федерации на период до 2024 года», эту ситуацию в ближайшие годы исправят.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Велихов Е.П., Гольцев А.О., Давиденко В.Д., Ельшин А.В., Ковалишин А.А., Родионова Е.В., Цибульский В.Ф. Приемлемость замыкания топливного цикла ядерной энергетики. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 1, с. 5—12.
2. Велихов Е.П., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Заметки о будущем ядерной энергетики. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 5—14.

3. **Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: a Comparative Study**, Radiation Protection, OECD Publishing, Paris, 2000. 128 p. <https://doi.org/10.1787/9789264182028-en>.
4. **Линге И.И., Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Осипьянц И.А.** Воздействие на окружающую среду и здоровье населения при обращении с ОЯТ. — В сб.: Сборник докладов Второй научно-технической экологической конференции Минатома России «Экология ядерной отрасли». Москва, 2001, с. 106—115.
5. **Recommendations of the international commission on radiological protection.** — ICRP Publication 103. AnnICRP, 2007, vol. 37(2—4), p. 1—332. doi: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
6. **Большов Л.А., Линге И.И.** Стратегия развития ядерной энергетики России и вопросы экологии. — Атомная энергия, 2019, т. 127, вып. 6, с. 303—309.
7. **Kessler J. et al.** Radiotoxicity index: an inappropriate discriminator for advanced fuel cycle technology selection. — In: WM2012 Conference Proceedings. Phoenix, Arizona, USA, 2012, p. 12276.
8. **Оценка содержания и наличных количеств ядерных материалов в оборотах и отходах: трехсторонний семинар.** 14—18 окт. 2002 г. Под ред. Б.Г. Рязанова. — Обнинск, ФЭИ, 2003. 265 с.
9. **Абрамов А.А. и др.** Особые радиоактивные отходы. — М.: ООО «Сам Полиграфист», 2015. — 240 с.
10. **Линге И.И.** Обеспечение радиационной безопасности при обращении с РАО: дозы облучения и перспективы развития регулирующих основ. — Радиоактивные отходы, 2020, № 2(11), с. 6—16. doi: 10.25283/2587-9707-2020-2-6-16.



Игорь Иннокентьевич Линге,
д. техн. н., заместитель ди-
ректора; Институт проблем
безопасного развития атом-
ной энергетики РАН, 115191
Москва, Большая Тульская
ул. 52, Россия
linge@ibrae.ac.ru

Статья поступила в редакцию 3 января 2021 г.

После доработки 13 января 2021 г.

Принята к публикации 14 января 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 1, с. 13—17.