

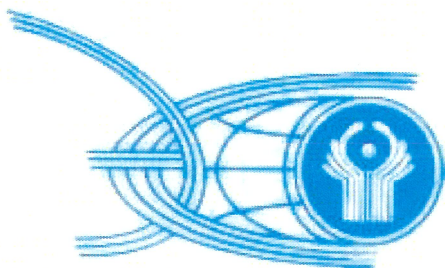


Некоммерческое партнерство
**«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»**



Основана в 1724 году

Российская Академия Наук
Секция 1. «Энергетические системы и
объекты энергетики»
Научного совета РАН «Энергетические
системы и комплексы»



Исполнительный комитет
Электроэнергетического совета СНГ

УТВЕРЖДАЮ

Президент НП «НТС ЕЭС»,
д.т.н., профессор

Н. Д. Роголёв

ПРОТОКОЛ

совместного заседания Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС»
и Секции 1. «Энергетические системы и объекты энергетики»
Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы»
на тему:

**«Радиологические преимущества ЗЯТЦ на базе РБН с учётом
действующих стандартов МАГАТЭ по радиационной безопасности и
практической реализации эффекта выравнивания онкотоксичности РАО и
природного уранового сырья»**

04 апреля 2024 г.

№ 2/24

г. Москва

Присутствовали очно: члены Научно-технической коллегии НП «НТС ЕЭС», члены Секции 1. «Энергетические системы и объекты энергетики» Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы», представители НИУ «МЭИ», ИНЭИ РАН, НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, АО «Прорыв», АО «ВНИИАЭС», НП «КОНЦ ЕЭС», ГК «Росатом», АО «Техническая инспекция ЕЭС», всего 16 человек.

Приняли участие онлайн: Минэнерго России, Госкорпорация «Росатом», Институт систем энергетики СО РАН, ПАО «Россети», АО «Концерн Росэнергоатом», ООО «ИнЭнерджи», ПАО «Россети», ИНЭИ РАН, Научный совет

РАН «Энергетические системы и комплексы», АО «Россети Тюмень», ПАО «Россети Центр», ПАО «Россети Ленэнерго», ООО «Газпром энергохолдинг», НИУ «МЭИ», АО «Техснабэкспорт», ООО «СитиЭнерго» и др.

Приняли участие онлайн: Институт энергетики НАН Беларуси, ГГТУ им. П.О. Сухого (Беларусь), Бухарский инженерно-технологический институт (Республика Узбекистан).

Всего 31 участник.

Со вступительным словом выступил первый заместитель Председателя Научно-технической коллегии НА «НТС ЕЭС» заместитель Председателя Секции 1. «Энергетические системы и объекты энергетики» Научного совета РАН «Энергетические системы и комплексы» д.т.н., профессор **В. В. Молодюк**.

Во вступительном слове В. В. Молодюк отметил следующее

Ядерная энергетика является системным элементом устойчивого развития экономики России. Атомная генерация в России составляет 20 % выработки электроэнергии, и она будет расти до 25 %. Ключевые задачи дальнейшего развития — создание новой технологической платформы ядерной энергетики с замкнутым ядерным топливным циклом (ЗЯТЦ) и дальнейшее увеличение доли атомной генерации.

Практически всё оборудование для АЭС изготавливается в РФ по отечественным технологиям, поэтому сооружение энергоблоков АЭС развитие ядерной энергетике обеспечивает значительный мультипликативный эффект для российской экономики.

Только за последние три года мы провели 5 заседаний по атомной тематике:

- Роль ядерной энергетике в последовательном обеспечении декарбонизации энергетике:
- Стратегия развития ядерной энергетике до 2050 года и перспективы на период до 2100 года (Стратегия-2021);
- Экономические аспекты конкурентоспособности АЭС и ЗЯТЦ;
- Энергоблок с реакторной установкой БН 1200М;
- Малая атомная электростанция с реакторной установкой РИТМ.

Всё это говорит о том, что в энергетике России ядерная энергетика выходит на выдающуюся позицию.

Отличительной и важной особенностью атомной генерации является то, что электроэнергия на АЭС производится без выбросов CO₂, а ядерные реакторы функционируют и запроектированы целиком на отечественном оборудовании.

ГК «Росатом» остается лидером мирового атомного рынка. В портфеле зарубежных заказов на разной стадии реализации АЭС — 33 проекта в 10 странах, 22 из них находятся в стадии сооружения. В связи с этим чрезвычайно важно довести до населения и потенциальных заказчиков понятие, что ядерная энергетика является безопасной.

С докладом «Радиологические преимущества ЗЯТЦ на базе РБН с учетом действующих стандартов МАГАТЭ по радиационной безопасности и практической реализации эффекта выравнивания онкотоксичности РАО и природного уранового сырья»

выступил **В. М. Соломатин**, начальник отдела главного радиоэколога АО «Прорыв».

Основные положения доклада приведены ниже.

Электроэнергия, производящаяся на атомных станциях, в настоящее время составляет небольшую часть её общемирового производства. Несмотря на то, что ядерное топливо характеризуется наиболее высокой удельной энергией на единицу массы, проблемы обращения с облученным ядерным топливом (ОЯТ) современных реакторов на тепловых нейтронах (тепловых реакторов) в настоящее время тормозят дальнейшее развитие ядерной энергетики (ЯЭ). Неизбежное долговременное контролируемое хранение ОЯТ тепловых реакторов и захоронение долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО) приводят к накоплению ОЯТ и ДВАО в мировом масштабе, т. е. к росту глобальной экологической опасности ЯЭ.

Развитие двухкомпонентной ядерной энергетики в виде тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов), работающих в замкнутом ядерном топливном цикле (ЗЯТЦ), может существенно снизить опасность ЯЭ.

Большое внимание изучению радиоактивных отходов (РАО), которые могут образовываться в ЗЯТЦ, оказывается Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в рамках Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), а международный форум «Поколение IV» отметил перспективность разработки быстрых реакторов (в частности, быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем) и соответствующих технологий ЗЯТЦ на ближайшие 15–25 лет.

При реализации ЗЯТЦ значительно сокращаются объёмы ОЯТ и ДВАО, однако полностью безотходного процесса добиться не удаётся, и геологическое захоронение РАО по-прежнему является необходимым.

В настоящее время в России создается крупномасштабная ЯЭ на основе ЗЯТЦ, в которых проблема РАО решается на основе достижения такого состава и количества РАО (и их захоронения), для которых их потенциальная опасность для здоровья человека будет эквивалентна или менее опасности потребляемых ЯЭ природных радиоактивных изотопов урана. Эта опасность рассчитывается на основе специальных баз данных и методических рекомендаций с учётом специфики рассматриваемого региона.

Выравнивание пожизненных радиационно-обусловленных рисков возможной индукции онкозаболеваний от РАО и от природного сырья

Потенциальную опасность для здоровья человека можно оценивать по ожидаемым эффективным дозам (в случае реализации принципа радиационной эквивалентности) или, более корректно, вычисляя пожизненный атрибутивный риск (LAR — от англ. lifetime attributable risk)) индукции онкологических заболеваний человека в результате поступления в организм радионуклидов на основе современных моделей радиационных рисков, рекомендованных

Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) (в случае реализации радиологической эквивалентности).

Согласно расчётному моделированию сценария развития в XXI веке ядерной энергетики России на основе АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах, реакторы на тепловых нейтронах развиваются и работают на базе топлива из обогащённого урана до тех пор, пока не исчерпан принятый в модели ресурс природного урана в РФ 540 тыс. т. Все облучённое топливо из тепловых реакторов перерабатывается, из него извлекается плутоний, минорные актиниды и некоторые долгоживущие продукты деления. На базе извлечённого плутония развивается система реакторов на быстрых нейтронах.

Принято, что конечная отсечка в сценарии развития ЯЭ России, приведённым в актуализированной в 2021 г. «Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года» (Стратегия-2021) — это 2130 г., примерный год окончания работы системы ВВЭР и переработки последней партии ОЯТ ВВЭР.

В 2038 г. энергосистема с ТР достигает максимальной мощности 32,28 ГВт и затем постепенно снижается. Работа АЭС с ТР к 2030 г. осуществляется в основном на ВВЭР электрической мощностью 1150 и 1200 МВт с увеличенным сроком службы до 80 лет.

По референтному сценарию система ТР действует до 2127 г., при этом до 2100 г. общая выработка электроэнергии оценивается в 2,82 ТВт·лет, в последующие 27 лет — 0.194 ТВт·лет до окончания службы последнего реактора ВВЭР-С мощностью 655 МВт (вводятся пять таких ТР с 2034 по 2048 гг.). Реакторы РБМК выводятся.

ПБО отходов ядерной энергетики (РАО) и потребляемого ядерной энергетикой природного сырья (урана) различна. Для обоснования безопасности развития ЯЭ в соответствии со стратегией лежит задача по определению времени, через которое наступит равенство ПБО РАО и ПБО исходного природного сырья. В решении этой задачи существует два подхода: определение времени достижения равенства ожидаемых эффективных доз (радиационная эквивалентность) и определение времени достижения равенства пожизненных радиационных рисков (радиологическая эквивалентность).

Понятие эффективной дозы было разработано МКРЗ с целью управления радиационной защитой. В терминах «эффективной дозы» выражаются пределы, ограничения и контрольные уровни системы норм и правил радиационной защиты.

Эффективная доза определяется как взвешенное среднее эквивалентных доз в органах и тканях. В Публикации 103 МКРЗ отмечается: «(157) ... Дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облученных индивидуумов».

Для оценки радиологической эквивалентности в качестве меры ПБО принимается LAR заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО), который представляет ожидаемое пожизненное число радиационно-индуцированных ЗНО в облученной группе лиц, нормированное на ее численность.

Отношение LAR от двух разных радионуклидов, вычисленное по исходным моделям годового риска для конкретной популяции, отличается от отношения соответствующих ОЭД.

Применительно к проблеме радиационной и радиологической эквивалентности это означает, что расчётный период выдержки РАО перед их захоронением, рассчитанный по отношению пожизненных рисков, может отличаться от того, который рассчитан по отношению ОЭД.

Исходными данными для определения радиационной и радиологической эквивалентности являются ПБО в виде ОЭД от основных радионуклидов РАО для различных периодов их выдержки и ОЭД от изотопов природного урана. Эти данные получены при моделировании сценария развития ЯЭ на тепловых реакторах и быстрых реакторах до 2130 г., из расчета, что к 2130 г. на развитие крупномасштабной ЯЭ, согласно рассмотренному сценарию, затрачивается 541,7 тыс. т природного урана и накапливается 7,523 тыс. т РАО в виде долгоживущих радионуклидов.

В случае применения критерия радиационной эквивалентности определяется период выдержки РАО, за который ОЭД от РАО (за счёт радиоактивного распада) сравнивается с ОЭД от природного урана.

В случае применения критерия радиологической эквивалентности определяется период выдержки РАО, за который LAR от РАО (за счёт радиоактивного распада) сравнивается с LAR от природного урана. Вычисление LAR производится следующим образом:

- для различных периодов выдержки РАО, для каждого из основных радионуклидов, входящих в состав РАО в этом периоде, по базе данных дозовых коэффициентов МКРЗ определяется динамика годовых эквивалентных доз в органах и тканях человека;

- с применением моделей радиационных рисков МКРЗ, российских показателей заболеваемости ЗНО по локализациям и российских показателей смертности, для каждого органа и ткани вычисляется LAR от каждого радионуклида;

- величины LAR от основных радионуклидов, входящих в состав РАО в конкретном временном периоде, складываются для получения общего LAR от РАО для этого периода выдержки.

Постоянный уровень LAR от природного урана, полагая неизменность его радионуклидного состава во времени, вычисляется таким же образом.

Вычисление пожизненного атрибутивного риска производится по эквивалентным дозам, полученным из ОЭД. Прямой расчёт по ОЭД недопустим, так как эффективная доза не позволяет делать различий между отдельными органами. При сравнении риска, полученного по эффективной дозе, и риска, полученного по соответствующей эквивалентной дозе, различие может быть более чем в 5,5 раз.

Расчет рисков только по эффективной дозе подразумевает, что произошло облучение всего тела в целом. Также нужно учитывать, что при внутреннем облучении ОЭД не учитывает распределение эквивалентных доз во времени, что может существенно влиять на итоговое значение пожизненного атрибутивного

риска. Отношение пожизненного атрибутивного риска, полученного по эффективной дозе (ОЭД), равной 1 мЗв, к пожизненным атрибутивным рискам от поступления в организм различных радионуклидов с ОЭД, равной 1 мЗв., может превышать 4 раза.

Для решения проблемы использования ОЭД применяется база данных МКРЗ, где дана динамика накопления эквивалентных доз во времени для различных органов и типов радионуклидов.

Оценка достижения радиационной и радиологической эквивалентности

Расчёты производились на программном модуле (ПМ) РОЗА-РАО версии 2.0, реализующем оценку динамики достижения радиологической эквивалентности, с учётом факторов неопределённости, рекомендованных НКДАР ООН при расчётах радиационных рисков.

Для решения этой задачи в коде ПМ РОЗА-РАО версии 2.0 реализовано вычисление случайных реализаций усреднённых по полу и возрасту (на момент поступления) пожизненных атрибутивных рисков (LAR) возникновения злокачественных новообразований (ЗНО) после однократного поступления в организм человека радионуклидного состава РАО и исходного природного уранового сырья в зависимости от времени выдержки. На основе полученных случайных реализаций LAR определяются доверительные границы времени наступления эквивалентности.

Для расчёта LAR используется эффективная доза, полученная путём приведения потенциальной биологической опасности (ПБО) РАО к 1 мЗв ПБО исходного природного уранового сырья. Под ПБО понимается суммарная для всего РАО ожидаемая за жизнь эффективная доза (ОЭД) от поступления радионуклидов в организм.

ПМ РОЗА-РАО версии 2.0 позволяет определять как время наступления радиационной эквивалентности (по ПБО), так и время наступления радиологической эквивалентности (по LAR).

Оценка времени достижения радиационной эквивалентности РАО и природного уранового сырья (технология ОЭД) по сценарию развития ЯЭ с полным замещением тепловых реакторов быстрыми реакторами в 2130 году, показала, что срок выравнивание ПБО наступает через 237 лет после окончания описанного сценария.

Оценка времени достижения радиологической эквивалентности РАО и природного уранового сырья (технология LAR) по сценарию развития ЯЭ с полным замещением тепловых реакторов быстрыми реакторами в 2130 году, показала, что срок выравнивания по показателю LAR наступает через 78 лет, после окончания описанного сценария.

Заключение

Для базового сценария развития ЯЭ радиационная эквивалентность долгоживущих РАО, накопленных к 2130 г., и природного уранового сырья достигается через 237 лет выдержки при степени потерь в РАО актинидов и высокоактивной части ПД, равной 0.1 % от их содержания в перерабатываемом ОЯТ.

Радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья (технология LAR), при этих же исходных условиях, наступает уже через 78 лет.

Полученные сроки радиационной и радиологической эквивалентности в масштабах ЯЭ России возможны только на базе развития парка РБН. Масштаб возможного образования минорных актинидов (МА) от переработки ОЯТ РТН, который может привести к значительному увеличению полученных сроков, подтверждают необходимость внедрения технологий фракционирования МА на всех планируемых к вводу предприятиях переработки ОЯТ для их последующей трансмутации в РБН.

Новые данные, свидетельствующие о сокращении радиационных и радиологических рисков РАО, получаемых в случае реализации замкнутого ЯТЦ с РБН в сравнении с ЯТЦ РТН, могут служить основанием для снижения финансовой нагрузки отрасли в части создания инфраструктуры по захоронению отходов атомной промышленности.

В обсуждении доклада и прениях выступили

Е. О. Адамов, научный руководитель АО «НИКИЭТ им. Н. А. Доллежала», доктор техн. наук, профессор; **В. А. Стенников**, академик РАН, директор ИСЭМ СО РАН; **В. В. Таратунин**, руководитель отдела Системного анализа надежности АЭС АО «ВНИИАЭС»; **Р. М. Хазиахметов**, АО «Техническая инспекция ЕЭС».

Совместное заседание отмечает

В настоящее время в России создается крупномасштабная ядерная энергетика на основе замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), в котором проблема радиоактивных отходов (РАО) решается на основе достижения такого состава и количества РАО (и их захоронения), для которых их потенциальная опасность для здоровья человека будет эквивалентна или меньше, чем опасность природного уранового сырья. Для обоснования безопасности используется критерий времени, через которое наступает такое равенство.

Развитие двухкомпонентной ядерной энергетике в виде тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах, работающих в замкнутом ядерном топливном цикле, может существенно повысить безопасность ядерной энергетике.

Вычисление случайных реализаций пожизненных атрибутивных рисков (LAR) возникновения злокачественных новообразований после однократного поступления в организм человека радионуклидного состава РАО и исходного природного уранового сырья показали, что радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья при равных исходных условиях наступает уже через 78 лет. Полученные сроки радиационной и радиологической эквивалентности в масштабах ядерной энергетике России возможны только на базе развития парка РБН.

Полученные данные свидетельствуют о сокращении радиационных и радиологических рисков РАО в случае реализации замкнутого ЯТЦ с РБН и могут служить основанием для снижения финансовой нагрузки отрасли в части создания инфраструктуры по захоронению отходов атомной промышленности.


Совместное заседание решило

1. Рекомендовать Минэнерго России, Минэкономразвития России, Минобрнауки России и другим заинтересованным министерствам и организациям учитывать при формировании соответствующих национальных проектов представленные результаты научно-исследовательских работ по радиологическим преимуществам ЗЯТЦ на базе РБН,

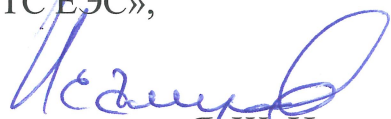
2. Рекомендовать РАН и ГК «Росатом» продолжить работы по исследованию радиологических преимуществ ЗЯТЦ на базе РБН и практической реализации эффекта выравнивания онкотоксичности РАО и природного уранового сырья.

3. Рекомендовать Минобрнауки России рассмотреть целесообразность включения концептуальных подходов к реализации ЗЯТЦ и радиэквивалентному обращению с РАО в соответствующие учебные программы.

Первый заместитель Председателя
Научно-технического совета
НП «НТС ЕЭС»,
д.т.н., профессор

 В. В. Молодюк

Ученый секретарь
Научно-технического совета
НП «НТС ЕЭС»,
к.т.н.


Я. Ш. Исамухамедов