

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Ульянин Юрий Александрович

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВОВЛЕЧЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ
В ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ
ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ**

Шифр и наименование научной специальности
5.2.3. Региональная и отраслевая экономика
(специализация «Экономика промышленности»)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Москва 2022

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

**Научный
руководитель**

Харитонов Владимир Витальевич,
д.ф.-м.н., профессор кафедры управления бизнес-проектами НИЯУ МИФИ, Заслуженный работник высшей школы

**Официальные
оппоненты:**

Логинов Евгений Леонидович
д.э.н., профессор РАН, начальник экспертно-аналитической службы ФГБУ «Ситуационно-аналитический центр Минэнерго России», дважды лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники

Петров Иван Васильевич
д.э.н., профессор департамента отраслевых рынков, первый заместитель декана факультета экономики и бизнеса Финансового университета при Правительстве РФ

Веселов Федор Вадимович
к.э.н., заместитель директора ИНЭИ РАН,
Почетный энергетик Российской Федерации

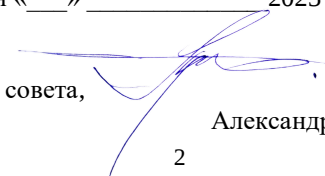
Защита диссертации состоится «31» мая 2023 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета «МИФИ.5.01» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ods.mephi.ru/dissertations> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного
д.т.н., профессор

совета,



Александр Валентинович Путилов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Перед отечественной ядерно-энергетической отраслью стоят три долгосрочные стратегические цели:

- повышение доли на международных рынках, увеличение долгосрочного портфеля зарубежных заказов и соответствующей выручки, обеспечение лидерства на мировом рынке ядерной энергетики и наращивание присутствия более чем в 50 странах мира;
- снижение себестоимости продукции и сроков протекания процессов, снижение сроков сооружения АЭС и себестоимости электроэнергетики;
- продвижение новых продуктов на российский и международный рынки.

В годовых публичных отчетах ГК «Росатом» и АО «Атомэнергпром» отмечается, что вклад продукции ядерного топливного цикла (ЯТЦ) в зарубежной выручке за последние годы сокращается. В этой связи актуальными являются задачи экономического обоснования диверсификации продукции ЯТЦ и расширения бизнеса сбытовых компаний с учетом сценариев развития мировой ядерной энергетики. Сценарии развития ядерной энергетики задают как масштабы потребности в топливе и, следовательно, в сырье и услугах по обогащению природного урана изотопом ^{235}U , так и масштабы накопления отвалов обогатительных производств («урановых хвостов» в форме обедненного гексафторида урана – ОГФУ), отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), а также услуг по переработке ОЯТ и вовлечения регенераторов урана и плутония в производство инновационных видов топлива (например, РЕМИКС-топлива)¹. Существующие неопределенности в стратегии развития мировой ядерной энергетики вынуждают сбытовые компании, участвующие в мировом рынке

¹ Перечень часто употребляемых сокращений приведен в конце автореферата.

продукции ЯТЦ, рассматривать все возможные сценарии ее развития. Поэтому требуются экономически и экологически эффективные решения по долгосрочному сырьевому обеспечению развивающейся ядерной энергетики как за счет ископаемого природного урана – первичного сырья, ресурсы которого ограничены (около 8 Мт при себестоимости добычи до 260 дол./кгU), так и за счет вторичных ресурсов – ОЯТ и ОГФУ, масса которых непрерывно возрастает, требуя увеличения затрат на обеспечение их безопасности. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе методов экономической эффективности вовлечения вторичных ресурсов в ЯТЦ действующих реакторов повышается вследствие необходимости внедрения технологий циркулярной экономики (экономики замкнутого цикла) и перехода к устойчивому развитию в контексте экологизации мировой экономики.

Кардинальным решением проблем ОЯТ, РАО и устойчивого ресурсного обеспечения ядерной энергетики на длительную перспективу считается сооружение реакторов-бридеров (размножителей) на быстрых нейтронах (быстрых реакторов). Однако, из 440 действующих энергетических реакторов в мире (на начало 2022 г.) только два относятся к прототипам будущих коммерческих быстрых реакторов: это реакторы типа БН-600, БН-800 (в России) с натриевым теплоносителем. Аналогичные и другие конструкции коммерческих быстрых реакторов рассматриваются в отечественном проекте «Прорыв» и в международном проекте GIV-IV. Широкое внедрение быстрых реакторов, нуждающихся в глубоком инженерно-экономическом обосновании и политической воли лиц, принимающих решение, возможно во второй половине текущего века. То есть в течение ближайших нескольких десятилетий в мировой ядерной энергетике будут преобладать тепловые реакторы.

Настоящая работа посвящена разработке методов обоснования экономической эффективности вовлечения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и отходов разделительного производства (обедненного гексафторида урана – ОГФУ) в качестве вторичного сырья для ядерного топлива действующих реакторов в условиях ограниченности традиционных ресурсов природного урана и с учетом различных сценариев развития мировой ядерной энергетики, что важно для прогнозирования и диверсификации бизнеса производственно-сбытовой компании атомной отрасли на мировом рынке.

Сделан акцент на определении возможностей повышения конкурентоспособности российской продукции ЯТЦ за счет диверсификации сырьевых источников и видов топлива для реакторов на тепловых нейтронах, что имеет существенное значение для развития отрасли и подтверждает актуальность исследования.

Степень научной проработки проблематики. Разработке методов и инструментов функционирования экономики ЯТЦ уделялось большое внимание с первых лет развития ядерной энергетики. Различные аспекты этой проблематики отражены в работах отечественных специалистов: Е.О. Адамова, П.Н. Алексеева, Е.А. Андрияновой, Б.Б. Батурова, Е.А. Боброва, А.В. Бойцова, Б.К. Гордеева, В.М. Декусара, А.Н. Кархова, А.В. Клименко, Ю.И. Корякина, А.В. Лопаткина, В.В. Орлова, М.М. Осецкой (Волос), Н.Н. Пономарева-Степного, В.И. Рачкова, М.Н. Синева, В.Ф. Украинцева, В.И. Усанова, Е.В. Федоровой, Ю.С. Федорова, В.В. Харитонов, А.Н. Чебескова, А.И. Черкасенко, Я.В. Шевелева, М.В. Шумилина и др., а также многих зарубежных авторов: Matthew Bunn, Steve Fetter, John P. Holdren, Bob van der Zwaan, Guillaume De Rooa, John E. Parsons, Kent Williams, Geoffrey Rothwell, Evelyn Bertel, King Hubbert, Thomas L. Neff, Kenneth B. Medlock III, Peter Hartley и др.

Вопросам экологизации экономики, устойчивого развития и циркулярной экономики (экономики замкнутого цикла) посвящены исследования отечественных и зарубежных авторов: Бобылева С.Н., Брыкалова С. М., Данилова-Данильяна В.И., Колесника Г.В., Меркулиной И.А., Петрова И.В., Порфирьева Б. Н., Pearce D.W., Turner R.K., D'Amato D., Korhonen J., Kirchherr J., Sverdrup H.U. и др. Задачи выбора эффективных решений в экономике в условиях неопределенности внешней среды рассматриваются в работах Ампилова Ю.П., Логинова Е.Л., Крянева А.В., Юрлова Ф. Ф. и др.

Основное внимание в опубликованных за последние два десятилетия работах, посвященных ЯТЦ, уделяется оценкам изменения изотопного состава в процессах технологических переделов, обоснованию концепции радиационной эквивалентности, совершенствованию технологий обращения с ОЯТ, переработки ОЯТ и производства уран-плутониевого МОКС-топлива, сравнению стоимости открытого и замкнутого ЯТЦ, проблемам нераспространения ядерных материалов, безопасности транспортировки и хранения ОЯТ, струк-

туры рынка ядерных технологий, роли ЯТЦ в декарбонизации мировой энергетики, перспективам двухкомпонентной ядерной энергетики.

Однако комплексного анализа экономической эффективности вовлечения так называемых «отходов» ЯТЦ в виде ОЯТ и ОГФУ в качестве вторичного сырья для топлива тепловых реакторов в условиях ограниченности традиционных ресурсов природного урана и с учетом различных сценариев развития мировой ядерной энергетики, включая экономическое обоснование недавно появившейся отечественной концепции «сбалансированного ядерного топливного цикла», не проводилось. Поэтому в существующих рыночных условиях развития мировой ядерной энергетики ряд задач, влияющих на бизнес-активность предприятий ЯТЦ, в том числе участвующих в сокращении отходов и реализации сбалансированного ЯТЦ на мировом рынке, остается недостаточно проработанным.

Цель и задачи исследования.

Цель диссертации – разработка методов экономического обоснования целесообразности вовлечения вторичных источников (ОГФУ и ОЯТ) в ядерный топливный цикл тепловых реакторов и диверсификации бизнеса производственно-сбытовых компаний в области ядерного топливного цикла в условиях ограниченности традиционных ресурсов природного урана и с учетом различных сценариев развития ядерной энергетики.

Для достижения цели исследования были поставлены **следующие задачи.**

1. Разработать методику долгосрочного прогнозирования динамики и себестоимости добычи природного урана и влияния этой динамики на потребности во вторичных источниках ядерного топлива тепловых реакторов для разных сценариев развития мировой ядерной энергетики.

2. Определить ценность ОГФУ в качестве вторичного сырья для производства ядерного топлива тепловых реакторов и усовершенствовать методику оценки экономической эффективности вовлечения ОГФУ в производство эквивалента натурального урана и обогащенного уранового продукта.

3. Разработать новые методы оценки экономической эффективности вовлечения уран-плутониевой смеси, регенерированной из

ОЯТ, в качестве сырья для производства конкурентоспособного инновационного РЕМИКС-топлива тепловых реакторов в зависимости от состава топлива и стоимости ключевых технологических переделов.

4. Разработать методический подход к формированию набора бизнес-проектов и продуктового портфеля для поставщика продукции ЯТЦ при разных сценариях развития ядерной энергетики в условиях заданной неопределенности исходных технико-экономических параметров.

5. Апробировать предложенные методы оценки эффективности сырьевого обеспечения ядерной энергетики в компании АО «Техснабэкспорт» Госкорпорации «Росатом», как одного из ведущих мировых экспортеров продукции ЯТЦ, и в учебном процессе НИЯУ МИФИ.

Область исследования соответствует Паспорту научной специальности ВАК при Минобрнауки России 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (2. Экономика промышленности. 2.2. Вопросы оценки и повышения эффективности хозяйственной деятельности на предприятиях и в отраслях промышленности. 2.3. Ресурсная база промышленного развития).

Объектом исследования являются промышленные предприятия и компании, участвующие в производстве, потреблении и поставках продукции ЯТЦ.

Предметом исследования являются экономические отношения, возникающие в сфере производства и сбыта продукции ЯТЦ, а также экономическая целесообразность бизнес-решений в области сырьевого обеспечения ЯТЦ.

Теоретической базой исследования являются научные труды в области экономики ядерного топливного цикла, а также работы российских и зарубежных авторов, связанные с циркулярной экономикой и технологией промышленного производства и сбыта продукции ЯТЦ.

Методологической базой исследования является системный подход с использованием методов аналитического, экономико-математического, финансового, управленческого, стратегического и сценарного анализа.

Информационную базу исследования составили официальные базы данных, нормативно-справочные и статистические материа-

лы, опубликованные МАГАТЭ, WNA, IEA, EIA, UxC; данные управленческого учета и годовые отчеты компаний Госкорпорации «Росатом», материалы отраслевых и международных конференций в области ЯТЦ, публикации зарубежных и отечественных научных журналов; публичные аналитические обзоры.

Научная новизна исследования состоит в разработке комплекса методов экономического обоснования целесообразности вовлечения вторичных ресурсов (ОГФУ и ОЯТ) в производство ядерного топлива АЭС и диверсификации бизнеса производственно-сбытовых компаний в области ядерного топливного цикла в зависимости от сценариев развития мировой ядерной энергетики и с учетом ограниченности традиционных ресурсов природного урана в соответствии с основными принципами устойчивого развития ядерной отрасли.

Результаты исследования, обладающие научной новизной и полученные лично соискателем:

1. Разработана новая модель динамического процесса истощения ископаемых ресурсов, включая природный уран, на основе существенного усовершенствования предложенных ранее моделей (К. Хабберта и др.), позволяющая развивать новые возможности прогнозирования, в частности, учитывать сценарии развития ядерной энергетики. С помощью новой модели истощения традиционных ресурсов урана разработана методика долгосрочного прогнозирования динамики и себестоимости добычи природного урана и влияния этой динамики на потребность предприятий ЯТЦ во вторичных источниках топлива (ОГФУ и ОЯТ) в зависимости от ресурсов ископаемого природного урана и сценариев развития мировой ядерной энергетики на тепловых реакторах.

2. Впервые предложена методика определения ценности накопленного ОГФУ как вторичного сырья для ядерного топлива тепловых реакторов, характеризующей максимальную рыночную цену, ниже которой ОГФУ экономически выгодно вовлекать в производство эквивалента натурального урана или обогащенного уранового продукта для производства топлива. Впервые полученные аналитические выражения для расчета ценности ОГФУ позволили усовершенствовать методику оценки экономической эффективности вовлечения ОГФУ в ЯТЦ для повышения прибыльности раздельного производства в зависимости от концентрации делящегося

нуклида ^{235}U в ОГФУ и во вторичных отвалах при различных рыночных условиях и режимах работы разделительного каскада.

3. Разработаны новые методики оценки экономической эффективности вовлечения регенерированной из ОЯТ уран-плутониевой смеси в качестве вторичного сырья в производстве инновационного топлива (РЕМИКС-топлива) для тепловых реакторов. Впервые определены условия конкурентоспособности РЕМИКС-топлива в зависимости от его изотопного состава, способов достижения необходимой концентрации делящихся нуклидов и стоимости ключевых технологических переделов с учетом исчерпания ресурсов и роста рыночных цен на природный уран и работу разделения в долгосрочной перспективе. Предложено решение обратной задачи определения конкурентоспособности РЕМИКС-топлива по отношению к топливу из природного урана: определены требования к стоимости ключевых технологических переделов в зависимости от рыночных котировок на работу разделения и природный уран.

4. Применительно к экспортируемой товарной продукции ЯТЦ впервые использована разработанная ранее в НИЯУ МИФИ оригинальная методика формирования оптимального инвестиционного портфеля (А.В. Крянев и др.). Показана возможность формирования и прогнозирования портфелей с продукцией ЯТЦ (природный уран, обогащенный урановый продукт, РЕМИКС-топливо и др.) для производственно-сбытовой компании в условиях заданной неопределенности исходных инженерно-экономических параметров (цен, объемов, экспортных и импортных ограничений и др.). Предлагаемая методика, в отличие от схемы Марковица и VaR-схемы, основана на так называемых «вероятностях приоритета продукта», что позволяет максимизировать доходность или прибыльность портфеля и снизить экономические риски.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии теоретических положений оценки эффективности организационно-экономических отношений в процессе добычи и потребления природного урана на глобальном и региональных рынках, усовершенствовании известных и создании новых методов экономического обоснования целесообразности вовлечения накопленных и непрерывно образующихся объемов ОГФУ и ОЯТ в производство ядерного топлива, выработке рекомендаций для диверсификации бизнеса производственно-сбытовых компаний в области ядерного топ-

ливного цикла в условиях ограниченности традиционных ресурсов природного урана и с учетом различных сценариев развития мировой атомной энергетики. Ряд разработанных моделей и методик может найти применение в других отраслях народного хозяйства.

Практическая значимость исследования состоит в обосновании методов оценки эффективности вовлечения вторичных ресурсов в ядерный топливный цикл. Практическая значимость определяется результатами прогнозирования динамики исчерпания и себестоимости добычи природного урана, влияния этой динамики на потребность ядерной энергетики во вторичных ресурсах в виде ОГФУ и ОЯТ; полученными данными о ценности ОГФУ как вторичного сырьевого источника ядерного топлива и о прибыльности разделительного производства при вовлечении ОГФУ в производство эквивалента натурального урана и обогащенного уранового продукта; определением условий конкурентоспособности инновационного РЕМИКС-топлива; предложенным подходом к формированию и прогнозированию эффективного портфеля экспортной продукции ЯТЦ.

Автор использовал подходы и методики, развитые в диссертационной работе, при проработке бизнес-идеи вовлечения ОГФУ в производство обогащенного уранового продукта и заключении в 2012–2019 гг. соответствующей серии контрактов между АО «Техснабэкспорт» и международным концерном Urenco. В диссертационную работу вошли материалы и методики, использованные автором для экономического обоснования стратегических планов развития АО «Техснабэкспорт» и при формировании портфеля заказов Общества в концепции сбалансированного ЯТЦ. Разработанные в диссертации экономико-математические модели используются в учебных дисциплинах НИЯУ МИФИ «Экономика ядерной энергетики», «Управление инновационными проектами», «Теория отраслевых рынков», а также в научно-исследовательских и выпускных квалификационных работах магистров, в том числе по магистерской программе «Управление в атомной отрасли», реализуемой в НИЯУ МИФИ по согласованию с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ). Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждено соответствующими документами.

Достоверность полученных результатов. Научные положения и выводы, полученные в диссертационной работе, являются достоверными и обоснованными, что подтверждается полученными практическими результатами, проведенными в работе численными экспериментами, сравнительным анализом полученных результатов с опубликованными данными других авторов, сопоставлением с другими моделями, представлением основных результатов диссертации на всероссийских, отраслевых и международных конференциях.

Апробация результатов исследования. Результаты работы были изложены на IV Российском экономическом конгрессе (Москва, МГУ, 21–25 декабря 2020 г.), XI конференции по реакторному материаловедению (г. Димитровград, 27–31 мая 2019); XVII International Scientific Conference and School of Young Scholars «Physical and Chemical Processes in Atomic Systems» (28–30 October, 2019, Moscow), VII Международной конференции «Проблемы математической физики и математическое моделирование» (25–27 июня 2018 г., Москва); Международной конференции молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга-2018» (3–7 сентября 2018 г., Москва). Ряд результатов используется на предприятии АО «Техснабэкспорт».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований по экономическим наукам. Из 17 опубликованных работ 8 содержатся в изданиях, входящих в базы данных Scopus или Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем работы составляет 157 с. Текст диссертации содержит 57 рисунков и 16 таблиц, а также 6 приложений. Библиографический список включает 156 источников.

II. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработана новая модель динамического процесса истощения ископаемых ресурсов, включая природный уран, на основе существенного усовершенствования предложенных ранее моделей (К. Хабберта и др.), позволяющая развивать новые возможности прогнозирования. С помощью новой модели истощения традиционных ресурсов урана разработана методика долгосрочного прогнозирования динамики и себестоимости добычи природного урана и влияния этой динамики на потребность предприятий ЯТЦ во вторичных источниках топлива (ОГФУ и ОЯТ) в зависимости от величины традиционных ресурсов урана и сценариев развития мировой ядерной энергетики на тепловых реакторах.

По данным МАГАТЭ и ряда других организаций среднегодовые темпы роста производства электроэнергии в мире до 2050 г. будут около 2 %/г. Если ядерная энергетика будет развиваться с темпами меньше 2 %/г., то ее вклад в производство электроэнергии будет постоянно снижаться с нынешних 10,4 %. Чтобы сохранить или увеличить долю производства электроэнергии на АЭС темп развития ядерной энергетики должен превышать 2 %/г. Сценарий развития ядерной энергетики задает потребность в топливе и сырье для его изготовления, а также скорость истощения ресурсов. В классификации МАГАТЭ ресурсов природного урана используются четыре ценовые категории себестоимости его добычи: < 40 \$/кгU, < 80 \$/кгU, < 130 \$/кгU и < 260 \$/кгU. Суммарное количество оцененных таким образом ресурсов урана составляет $M \approx 8$ Мт, причем ресурсы урана по минимальной себестоимости добычи (до 40 \$/кгU) составляют около 1 Мт, т. е. в 8 раз меньше суммарных ресурсов. Более половины ресурсов урана сосредоточены в месторождениях с себестоимостью добычи 80–130 \$/кгU.

Разработанная в настоящей работе новая математическая модель динамического процесса истощения ископаемых ресурсов являет-

ся обобщением (существенной модификацией) предложенных ранее моделей и базируется на трех известных параметрах начального периода прогнозирования: разведанной остаточной массе ископаемого ресурса (извлекаемого традиционными методами) M (т), годовом объеме добычи G_0 (т/г.) и заданном темпе роста k_0 (1/г.) добычи ресурса. Темп роста добычи урана k_0 задается стратегией развития ядерной энергетики и отражает существующие тенденции изменения потребности в рассматриваемом ископаемом и сделанные ранее инвестиции в добычу.

Согласно разработанной модели, использующей аналитическое решение нелинейного дифференциального уравнения баланса масс, динамика годовой добычи $G(t)$ в году $t > 0$ (от начала прогноза) описывается выражением

$$G(t) = G_0 \frac{(2 + \theta)^2 \exp(T)}{(\exp(T) + 1 + \theta)^2}, \quad (1)$$

где $\theta = k_0 T_0 = k_0 M / G_0$ – безразмерный параметр, характеризующий темп истощения сырья; $T_0 = M / G_0$ – период истощения сырьевого ресурса M при постоянной годовой добыче G_0 (именуемый в зарубежной литературе «Reserves-to-Production» или «R/P-ratio»); $T = (k_0 + 2/T_0)t$ – безразмерный параметр, характеризующий время прогноза. Согласно (1) график $G(t)$ имеет колоколообразную форму (рисунок 1, б).

В предлагаемой модели, в отличие от модели К. Хабберта, используются три исходных параметра (M , G_0 и k_0), достоверно известные на настоящий момент времени (начало прогноза), а не два параметра (M и k) ретроспективно восстановленные на начало освоения ресурса. То есть, модель К. Хабберта является частным случаем предлагаемой модели.

Как следует из рисунков 1 (а, б), чем меньше ресурсы урана (меньше себестоимость добычи), тем раньше наступает пик добычи и последующее ее снижение. Даже при наибольшем ресурсе урана $M = 8$ Мт, для которого определена себестоимость добычи до 260 \$/кгU, и высоком сценарии развития мировой ядерной энергетики ($k_0 = 3$ %/г.) предложение (добыча) природного урана существенно отстает от потребности в нем (штриховые линии), **что и формирует спрос на вторичное сырье**. Для «стагнационного» сценария ($k_0 = 0$) потребность во вторичном сырье заметно меньше,

чем для высокого сценария, но в этом случае вклад АЭС в мировое производство электроэнергии, растущее с темпом около 2 %/г., будет быстро снижаться от нынешнего уровня 10,5 до 4 % в 2060 г. (рисунок 1, в).

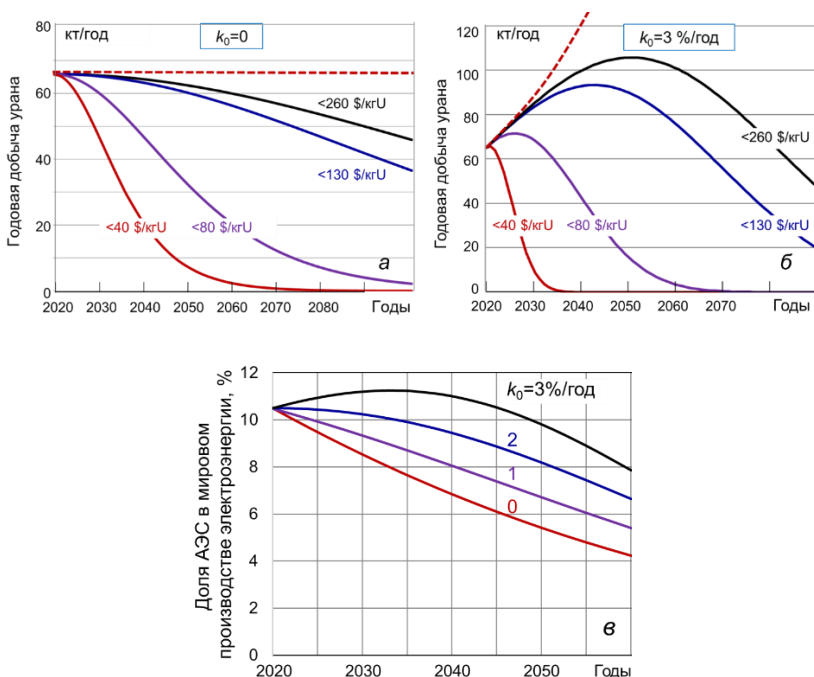


Рисунок 1. Прогнозы динамики истощения ресурсов природного урана с разной себестоимостью добычи (от 40 до 260 \$/кгU) (а, б) и изменения доли АЭС в мировом производстве электроэнергии (в) для разных сценариев развития ядерной энергетики в начальный период прогноза ($k_0 = 0-3\%/г.$) при начальном уровне добычи $G_0 = 66$ кг/г. Разность между потребностью в природном уране (штриховые линии на рисунках а и б при $k_0 = 0$ или 3 %/г.) и его предложением (добычей, сплошные линии) определяет потребность во вторичном сырье. Темп роста производства электроэнергии в мире 2 %/г. (рисунок в)

Для сравнения сырьевых источников ядерного топлива важно оценить динамику себестоимости добычи урана в процессе его истощения. На основе разработанной модели истощения ископаемых ресурсов предложена авторская методика прогнозирования

средневзвешенной себестоимости добычи урана в зависимости от сценария развития ядерной энергетики. Казалось бы, в первую очередь должны обрабатываться (исчерпываться) наиболее дешевые месторождения, что привело бы к постепенному росту средневзвешенной себестоимости добычи (**рисунок 2**, пунктирная линия) от минимальной (40 \$/кгU) до максимальной (260 \$/кгU).

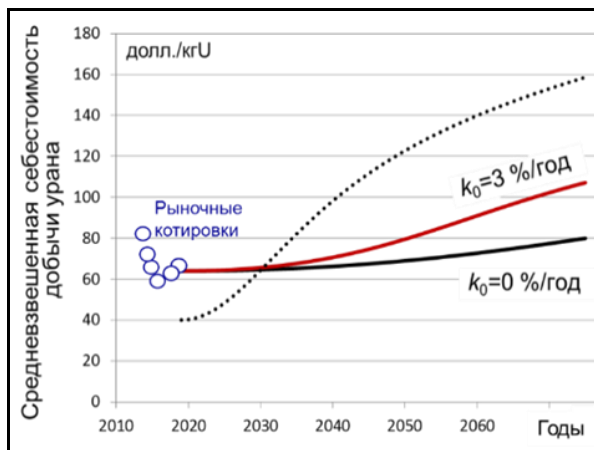


Рисунок 2. Прогноз роста средневзвешенной себестоимости добычи урана для двух сценариев развития мировой ядерной энергетики до 2070 г. ($k_0 = 0$ и $3 \text{ \%}/\text{г.}$) в условиях исчерпания природного урана ($M \approx 8 \text{ Мт}$). Пунктирная линия – расчет средневзвешенной себестоимости добычи урана в предположении, что в первую очередь обрабатываются наиболее дешевые месторождения (при $k_0 = 2 \text{ \%}/\text{г.}$)

Однако, в действительности, на рынок поступает природный уран из месторождений с разной себестоимостью добычи, даже превышающей иногда рыночные котировки. Такая ситуация связана с историческими и социальными особенностями развития добывающей отрасли, обусловленными, в частности, высокой волатильностью рыночных цен на уран. В итоге средневзвешенная себестоимость добычи урана увеличится по нашему прогнозу к середине века от 64 до 70–80 \$/кгU при $k_0 = 0\text{--}3 \text{ \%}/\text{г.}$ (**рисунок 2**).

Из приведенных на **рисунках 1 и 2** данных следует, что в отсутствии иных источников для производства ядерного топлива, кроме природного урана, динамика производства электроэнергии на АЭС

будет повторять динамику истощения природного урана при росте себестоимости его добычи, что подчеркивает необходимость привлечения вторичных ресурсов для производства топлива и поддержания заданного сценария развития ядерной энергетики.

2. Впервые предложено определение ценности накопленного ОГФУ как вторичного сырья для ядерного топлива тепловых реакторов, характеризующей максимальную рыночную цену, ниже которой ОГФУ экономически выгодно вовлекать в производство эквивалента натурального урана или обогащенного уранового продукта для производства топлива. Впервые полученные аналитические выражения для расчета ценности ОГФУ позволили усовершенствовать методику оценки экономической эффективности вовлечения ОГФУ в ЯТЦ в зависимости от концентрации делящегося нуклида ^{235}U в ОГФУ и во вторичных отвалах при различных рыночных условиях и режимах работы разделительного каскада.

По данным Всемирной ядерной ассоциации и ряда других организаций в настоящее время накоплено около 2 млн т обедненного гексафторида урана с концентрацией ^{235}U в диапазоне $y = 0,1\text{--}0,4\%$ (по массе в расчете на металлический уран). Возникает вопрос: при каких условиях экономически целесообразно использовать ОГФУ в качестве питания (сырья) обогатительного завода для производства либо эквивалента натурального урана (ЭНУ), либо обогащенного уранового продукта (ОУП) в целях последующего производства ядерного топлива?

Рассмотрено несколько производственных схем вовлечения ОГФУ в обогатительное производство. Так, себестоимость C_x (дол./кгU) производства обогащенного уранового продукта в количестве P (кг/г.) с обогащением x по урану-235 (например, $x = 4,95\%$) при одновременном питании разделительного каскада природным ураном в количестве F (кг/г.) и ОГФУ в количестве D (кг/г.) определяется выражением

$$C_x = (F \cdot C_F + D \cdot C_D + R \cdot C_R + W \cdot C_W)/P, \quad (3)$$

в котором учтены затраты, соответственно, на приобретение природного урана и ОГФУ (в количестве F и D), на работу деления R (ЕРР/г.) и на утилизацию производственного отвала в количестве W (кг/г.) с концентрацией w урана-235 меньшей, чем в питающих

каскад ОГФУ и природном уране ($w < y < c$). В этом выражении C_F , C_D , C_R , C_W – рыночные (или внутренние) цены на природный уран (включая конверсию), ОГФУ, работу разделения, утилизацию производственного отвала. Входящая в выражение (3) работа разделения изотопов урана определяется стандартным выражением

$$R = P \cdot V(x) + W \cdot V(w) - D \cdot V(y) - F \cdot V(c), \quad (4)$$

где $V(z)$ – разделительный потенциал Пайерлса-Дирака ($z = x, w, y, c$)². Взаимосвязи между массовыми потоками определяются балансом масс изотопов урана в разделительном каскаде. Таким образом, выражения (3) и (4) и входящие в них массовые потоки, концентрации в них урана-235 и цены взаимосвязаны и, фактически, определяют сложные **экономические отношения** (интересы) как потребителей топлива, так и добывающих и обогащательных производств. Зависимость (3) себестоимости ОУП от вышеперечисленных параметров является **инструментом** оценки эффективности вовлечения ОГФУ в производство ОУП (или эквивалента натурального урана при $F = 0$ и $x = c$).

Выражение (3) позволяет определить ценность ОГФУ как такую его цену, при которой стоимость получаемого из него ОУП (или ЭНУ) равна рыночной стоимости, соответственно, обогащенного или природного урана. Как следует из [рисунка 3](#), ценность ОГФУ тем выше, чем выше концентрация в нем делящегося изотопа ²³⁵U, причем максимум ценности ОГФУ достигается при некоторой оптимальной глубине вторичного отвала, зависящей от отношения цен на работу разделения и природный уран. Приведенные на [рисунке 3, а](#) результаты расчета ценности ОГФУ получены с позиции заказчика, который в процессе контрактации ориентируется на рыночные котировки работы разделения и природного урана.

² Работа разделения имеет такую же размерность, что и массовые потоки F , P , D , W . Однако для работы разделения введена специальная единица измерения: 1 кг работы разделения называют единицей работы разделения – ЕРР (англ. Separative work unit, SWU). Так, крупнейшие заводы по разделению изотопов урана имеют мощность 7–10 млн ЕРР/г.

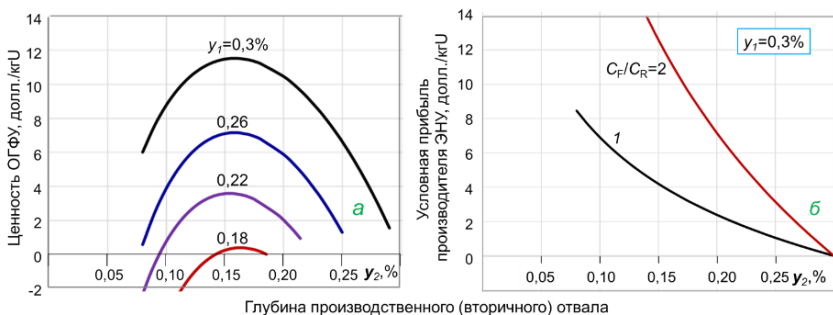


Рисунок 3. Ценность ОГФУ (а) при концентрации ^{235}U в нем $y_1 = 0,18\text{--}0,30\%$ для наработки эквивалента натурального урана (ЭНУ) и условная прибыль производителя ЭНУ (б, в расчете на 1 кг U в ОГФУ) в зависимости от концентрации ^{235}U во вторичном отвале ($y_2 = 0,08\text{--}0,3\%$) разделительного производства. Рыночные котировки на природный гексафторид урана 90 долл./кгU и работу разделения 45 долл./ЕРР (а) и 45–90 долл./ЕРР (б)

С позиции производителя ЭНУ (обогажительного завода) на первое место ставится задача получения максимальной прибыли от переработки ОГФУ. Производитель ЭНУ, в отличие от Заказчика, оценивает стоимость ЭНУ исходя не из рыночных котировок на работу разделения, а из ее себестоимости, которая может быть существенно ниже рыночных котировок. Оценки показывают, что производителю ЭНУ выгодно смещать глубину производственного (вторичного) отвала в область меньших концентраций урана-235 (рисунок 3, б). Показано также, что вовлечение ОГФУ в производство эквивалента натурального урана выгодно только тогда, когда рыночная цена природного урана превышает цену работы разделения ($C_F/C_R > 1$), что и наблюдается в последнее десятилетие.

При использовании ОГФУ в качестве подпитки обогажительного каскада при производстве обогащенного урана из-за низкой концентрации ^{235}U в ОГФУ для получения на выходе заданного обогащения урана требуется затратить больше работы разделения, чем в случае обогащения только природного урана. Но стоимость ОГФУ может быть существенно ниже стоимости природного урана, что позволяет получить положительный экономический эффект. Оценки показывают, что ценность ОГФУ в этом случае, как и при производстве ЭНУ, имеет экстремум в зависимости от глубины

вторичного отвала и увеличивается с ростом отношения цены природного урана к цене работы разделения (C_F/C_R). Т. е. чем выше цена природного урана по сравнению с ценой работы разделения, и чем выше ценность ОГФУ, тем выгоднее использовать ОГФУ вместо природного урана для производства обогащенного уранового продукта (рисунок 4). Результаты, приведенные на рисунке 4, относятся к предельному случаю, в котором на вход разделительного каскада подается только ОГФУ (без природного урана). Как видно, повышение цены ОГФУ до 10 дол./кг U существенно повышают стоимость ОУП (рисунок 4, а) и, соответственно, снижают прибыль (рисунок 4, б) в расчете на 1 кг U в ОУП. Под прибылью здесь понимается дополнительная прибыль за счет разности себестоимостей ОУП, полученных при обогащении природного урана и ОГФУ.

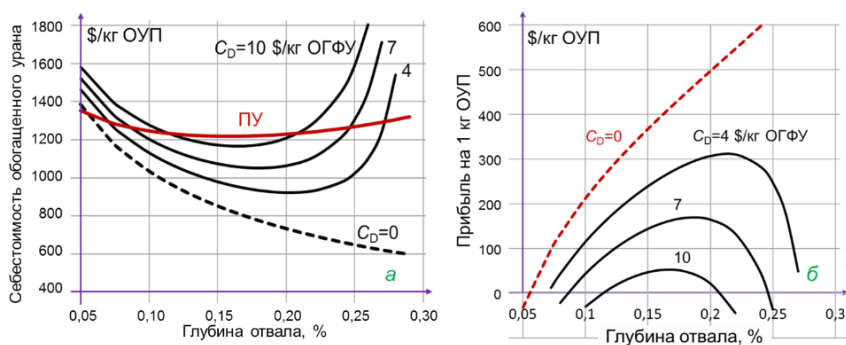


Рисунок 4. Себестоимость обогащенного до 4,95 % уранового продукта (а), получаемого из ОГФУ с концентрацией $y_1 = 0,3$ %, и возникающая прибыль (б) обогатительного завода в зависимости от глубины вторичного отвала и стоимости ОГФУ ($C_D = 0-10$ дол./кг ОГФУ) при рыночных котировках на природный гексафторид урана $C_F = 90$ дол./кг U и на работу разделения $C_R = 45$ дол./ЕРР. Красная линия ПУ на рисунке а – себестоимость ОУП из природного урана

При годовой потребности современного реактора в ОУП около 25 т/г. разделительный завод может заработать годовую прибыль более 3–4 млн дол./г. при входной стоимости ОГФУ не более 7 дол./кгU. Для этого потребуется переработать менее 800 т ОГФУ при содержании в нем 0,3 % ^{235}U и глубине вторичного производственного отвала менее 0,16 %.

Возникает вопрос: что выгоднее для разделительного завода – использовать ОГФУ для производства эквивалента натурального урана или обогащенного уранового продукта? Для ответа на этот вопрос определена прибыль производства ЭНУ и ОУП в расчете на 1 кг используемого ОГФУ и на единицу затрачиваемой работы разделения. Расчеты показали, что прибыль производства ЭНУ и ОУП в расчете на единицу массы расходуемого ОГФУ одинаковы (рисунк 5, а).

Прибыль производства ОУП в расчете на единицу работы разделения (рисунк 5, б) может существенно превышать прибыль производства ЭНУ (до 10 раз). Т. е., расходуя одно и то же количество работы разделения на производство ЭНУ или ОУП, получаем существенно разную прибыль. При рыночных ценах на природный уран и работу разделения, характерных для 2019 г., величина прибыли в расчете на единицу работы разделения превышает 45 дол./ЕРР, что обусловлено высокой ценой природного гексафторида урана (90 дол./кг U) по сравнению с ценой работы разделения (45 дол./ЕРР) и используемого ОГФУ (менее 10 дол./кг U). Так, разделительный завод мощностью 5 млн ЕРР/г. может заработать прибыль на использовании ОГФУ (вместо природного урана) более 300 млн дол./г.

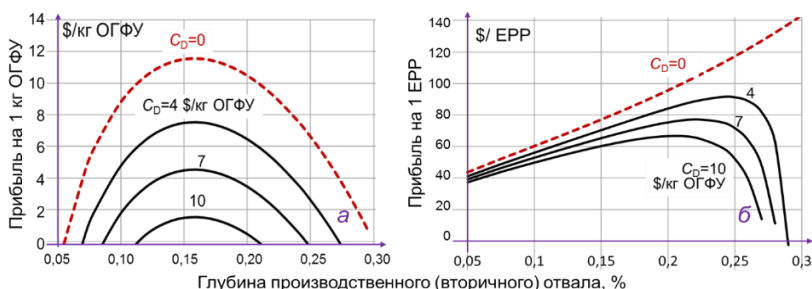


Рисунок 5. Прибыль производства обогащенного до 4,95 % уранового продукта из ОГФУ с концентрацией 0,3 % в расчете на 1 кг ОГФУ (а) и на единицу работы разделения (б) в зависимости от глубины вторичного отвала (0,05–0,3 %) и входной стоимости ОГФУ ($C_D = 0$ –10 дол./кг U в ОГФУ) при рыночных котировках $C_F = 90$ дол./кг U и $C_R = 45$ дол./ЕРР

Таким образом, разработанные методы оценки экономической эффективности вовлечения, обедненного гексафторида урана

(ОГФУ) в производство эквивалента натурального урана и обогащенного уранового продукта показали, что использование ОГФУ в качестве сырья в производстве обогащенного уранового продукта выгоднее по сравнению с производством из ОГФУ эквивалента натурального урана. Сформулированное в работе понятие экономической ценности ОГФУ для разделительного производства и приведенные методы расчетов ценности, как и прибыльности, позволяют определять условия для вовлечения ОГФУ в производство ядерного топлива тепловых реакторов.

3. Разработаны новые методики оценки экономической эффективности вовлечения регенерированной из ОЯТ уран-плутониевой смеси в качестве вторичного сырья в производстве инновационного топлива (РЕМИКС-топлива) для тепловых реакторов. Впервые определены условия конкурентоспособности РЕМИКС-топлива в зависимости от его изотопного состава, способов достижения необходимого обогащения и стоимости ключевых технологических переделов с учетом истощения ресурсов природного урана и роста рыночных цен на природный уран и работу разделения в долгосрочной перспективе. Предложено решение обратной задачи определения конкурентоспособности РЕМИКС-топлива по отношению к топливу из природного урана: определены требования к стоимости ключевых технологических переделов в зависимости от рыночных котировок на работу разделения и природный уран.

В составе ОЯТ, выгружаемого из реакторов типа ВВЭР (PWR и др.), остаются делящиеся нуклиды (^{235}U и ^{239}Pu) с концентрацией $X_{\text{ОЯТ}} \approx 1,5\text{--}2,0\%$, т. е. более чем вдвое, превышающей содержание ^{235}U в природном уране $c = 0,711\%$. Накопленная масса ОЯТ в мире эквивалентна по энергетическому потенциалу природному урану в объеме не менее 1 Мт, что эквивалентно увеличению более чем на 12 % ресурсов ископаемого природного урана (оцененным на сегодня в 8 Мт). При многократном рециклировании РЕМИКС-топлива объем сырья для тепловых реакторов возрастает почти до 20 Мт, то есть увеличивается в 2,5 раза по сравнению с оценкой запасов ископаемого природного урана в 8 Мт. В действительности число рециклов ограничивается величиной 3–5 вследствие накопления в топливе «нейтронных ядов», а также источников жесткого гамма-излучения и нейтронов спонтанного деления. Однако, расче-

ты показывают, что энергетическая целесообразность вовлечения ОЯТ в производство топлива для реакторов на тепловых нейтронах появится не ранее 30-х гг. даже при высоком сценарии развития мировой ядерной энергетики (3 %/г.). До этого времени достаточно урана в освоенных месторождениях и богатых отвалах. Вместе с тем, актуальность переработки ОЯТ в настоящее время обусловлена в большей степени другими причинами, связанными с необходимостью:

1) уменьшения накапливаемой массы ОЯТ и существенного сокращения массы высокорadioактивных отходов для окончательного захоронения путем выделения из ОЯТ продуктов деления, доля которых в ОЯТ около 5–6 %;

2) повышения конкурентоспособности АЭС на мировом рынке за счет комплексного предложения услуг поставки топлива с переработкой ОЯТ и утилизации накопленного плутония путем сжигания его в тепловых реакторах;

3) освоения технологий масштабной промышленной переработки ОЯТ для экономически приемлемого замкнутого ЯТЦ в период ожидаемой двухкомпонентной ядерной энергетики.

Предложенное в 2000-х гг. в России инновационное топливо тепловых реакторов, получившее наименование РЕМИКС-топливо (REgenerated MIXture of U-Pu oxides), подразумевает переработку ОЯТ с выделением уран-плутониевой смеси, очищенной от продуктов деления, и имеет несколько модификаций (А, Б, С, Е), отличающихся способом достижения необходимой концентрации делящихся нуклидов в топливе (обогащения топлива). Благодаря низкому содержанию плутония ($< 1\%$) в регенерированном уран-плутониевом топливе возможна 100 % загрузка РЕМИКС-топливом активной зоны реакторов ВВЭР и PWR без существенных изменений в системе управления и сохранении уровня безопасности реактора. Обогащение топлива РЕМИКС-А и С достигается путем смешения регенерированной из ОЯТ уран-плутониевой смеси массой $M_{\text{СМ}}$ с добавкой из обогащенного до 20 % природного урана массой $M_{\text{х}}$, при этом остаток регенерата урана, не вошедшего в уран-плутониевую смесь, отправляется либо на склад (А), либо на дообогащение и последующую загрузку в топливо РЕМИКС-С (рисунк 6). Т. е. топливо РЕМИКС-А можно рассматривать как частный случай топлива РЕМИКС-С при $\mu_{\text{R}} = 0$. Топливо РЕМИКС-Б состоит из

уран-плутониевой смеси и обогащенного регенерата урана без добавки из обогащенного природного урана, $\mu_x = 0$.



Рисунок 6. Схема материальных потоков и их обозначения в замкнутом РЕМИКС-ЯТЦ для тепловых реакторов.

Буквой μ_i обозначены относительные массовые доли i -компонент в технологических переделах и составе ОЯТ. Состав топлива в % условный

В работе построена новая аналитическая модель для управления экономическими параметрами замкнутого ЯТЦ с РЕМИКС-топливом с учетом стоимостных характеристик ключевых технологических переделов при изготовлении такого топлива. В предлагаемой модели стоимость готовой для эксплуатации тепловыделяющей сборки (ТВС) с РЕМИКС-топливом (в расчете на 1 кг тяжелых металлов в топливе) представлена в виде суммы

$$C = (C_{\text{ОЯТ}} + \mu_{\text{РАО}} C_{\text{РАО}}) + (\mu_x C_x + \mu_R C_{\text{UR}}) + C_{\text{Ф}}, \quad (5)$$

учитывающей три группы затрат разных предприятий замкнутого ЯТЦ: 1) на операции переработки ОЯТ (стоимость переработки ОЯТ $C_{\text{ОЯТ}}$) и обращения с РАО ($C_{\text{РАО}}$); 2) на обогащение регенерированного урана по цене C_{UR} и производство обогащенной топливной добавки из природного урана C_x ; 3) на изготовление (фабрикацию) тепловыделяющих сборок (ТВС) с РЕМИКС-топливом $C_{\text{Ф}}$. Массовые доли РАО в ОЯТ, добавки к топливу из обогащенного природного урана и из обогащенного регенерированного из ОЯТ урана (соответственно $\mu_{\text{РАО}}$, μ_x , μ_R , см. рисунок 6) рассчитываются в работе в зависимости от массовой доли уран-плутониевой смеси $\mu_{\text{см}}$, обогащения топлива X_p , концентрации делящихся нуклидов в ОЯТ и глубины выгорания топлива (рисунок 7) согласно балансу

масс изотопов топлива. Так, при увеличении массовой доли уран-плутониевой смеси в топливе от 20 до 80 % ее обогащение (концентрация делящихся нуклидов) уменьшается от $X = 3\text{--}6\%$ до $1,1\text{--}2,3\%$. Это обстоятельство требует увеличения концентрации ^{235}U при обогащении регенерированного и природного урана в обогатительных комбинатах, причем обогащение топливной добавки повышается до 20 % при доле уран-плутониевой смеси около 0,8 (рисунки 7).

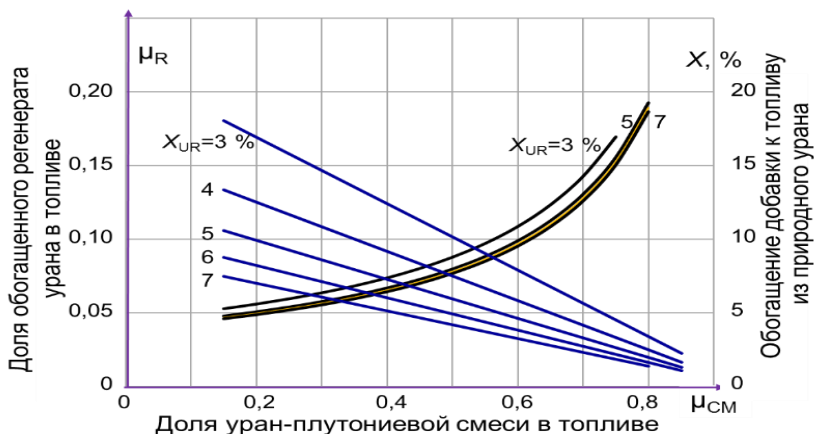


Рисунок 7. Зависимости массовой доли обогащенного регенерата урана μ_R и обогащения X (%) топливной компоненты из природного урана в топливе РЕМИКС-С от массовой доли уран-плутониевой смеси $\mu_{\text{см}}$ и обогащения регенерата урана $X_{\text{UR}} = 3\text{--}7\%$ при заданном обогащении топлива 4,95 %, исходного регенерата урана 0,8 %, доле отходов (РАО) 5 %, глубине отвала 0,16 %

Стоимость топливной добавки C_X и обогащенного регенерата урана C_{UR} рассчитываются в работе в зависимости от концентраций ^{235}U в сырье и обогащенных продуктах, а также от рыночных цен на работу разделения, природный уран и конверсию. Стоимости переработки ОЯТ, обращения с РАО, фабрикации ТВС и утилизации отходов раздельного производства варьируются как исходные параметры.

Величина C , определяемая выражением (5) и представляющая собой топливные затраты АЭС в замкнутом ЯТЦ (в расчете на 1 кг

тяжелых металлов в топливе), имеет смысл стоимости замкнутого топливного цикла (дол./кг т.м.). Топливные затраты АЭС с традиционным урановым топливом и открытым ЯТЦ (стоимость традиционного открытого ЯТЦ) обозначим C_0 .

О конкурентоспособности топлива РЕМИКС свидетельствует отношение стоимости C замкнутого топливного цикла с таким топливом и открытого уранового C_0 . Отношение C/C_0 , характеризующее отношение топливных составляющих стоимости электроэнергии АЭС в замкнутом и открытом топливном цикле при одинаковой глубине выгорания топлива, назовем **критерием конкурентоспособности** топлива РЕМИКС.

Разработанная модель позволяет получить ряд неочевидных результатов, важных для процессов управления. Так, согласно (5), топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС с топливом РЕМИКС-А слабо зависит от обогащения топливной добавки при ее изменении в широком диапазоне $X = 8\text{--}20\%$. Дело в том, что с ростом обогащения добавки растет ее цена, но снижается массовая доля (рисунок 7), необходимая для получения заданного обогащения топлива (в данном случае $X_p = 4,95\%$), что в итоге ведет к слабому изменению стоимости РЕМИКС-топлива и делает его конкурентоспособным с традиционным урановым топливом (при суммарной стоимости переработки ОЯТ и фабрикации ТВС не выше 1400 дол./кг т.м.). Цена топлива РЕМИКС-С обогащением 4,95 % составляет около $C \approx 2350$ дол./кг т.м.) практически независимо от изменения массовой доли уран-плутониевой смеси $\mu_{\text{см}} = 0,15\text{--}0,85$ и обогащения регенерата урана $X_{\text{UR}} = 3\text{--}7\%$ при рыночных котировках на природный уран и работу разделения (по ценам 2019 г.). Т. е. влияние состава топлива на его стоимость мало по сравнению с влиянием существующих на сегодня неопределенностей в ценах на переработку отработавшего топлива и изготовление ТВС с РЕМИКС-топливом (с учетом более высокой радиоактивности). В то же время топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС снижается линейно с уменьшением стоимости переработки отработавшего топлива, достигая предельно низкого значения около 3,6 дол./(МВт · ч) даже при гипотетически нулевой стоимости переработки.

С ростом рыночных котировок на природный уран и работу разделения топливо РЕМИКС-А и С становится более конкурентоспо-

собным и тем значительнее, чем ниже стоимость переработки отработавшего топлива (рисунк 8). Однако даже при гипотетически нулевой стоимости переработки ОЯТ выигрыш в топливной составляющей цены электроэнергии при внедрении такого топлива не превышает 25 %.

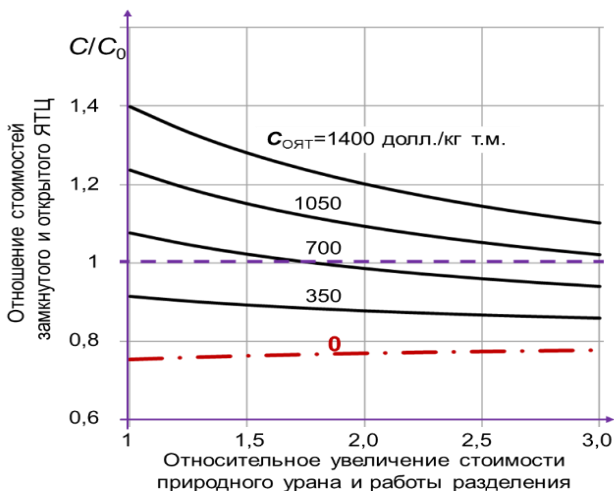


Рисунок 8. Зависимость критерия конкурентоспособности топлива РЕМИКС-С от относительного увеличения стоимости природного урана и работы разделения от 1 до 3 раз и от стоимости переработки отработавшего топлива $C_{\text{ОЯТ}} = 0\text{--}1400$ дол./кг тяж. мет. Расчет при обогащении топлива 4,95 %, компоненты из обогащенного природного урана 19 %, регенерата урана 5 %, ценах $C_{\text{РАО}} = C_{\text{ТВС}} = C_{\text{ОТРО}} = 700$ дол./кг тяж. мет., $C_{\text{ТВСО}} = 350$ дол./кгU, массовых долях $\mu_{\text{см}} = 80\%$, $\mu_{\text{х}} = 18\%$, $\mu_{\text{R}} = 2\%$

Если стоимость переработки превышает 1000 дол./(кг т.м.), то цикл с РЕМИКС-топливом проигрывает открытому урановому даже при подорожании природного урана и работы разделения более чем в 2,5 раза по сравнению с принятыми в расчетах котировками на гексафторид природного урана (в ценах 2019 г.). При высокой стоимости переработки отработавшего топлива (1400 дол./кг тяж. мет.) топливо РЕМИКС-С приводит к росту топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС не более, чем на 40 %. Учитывая, что топливная составляющая цены электроэнергии АЭС обычно менее 20 %, рост цены электроэнергии не превысит 8 %.

Важно отметить ряд других экономических эффектов, вытекающих из разработанной модели и сопровождающих внедрение РЕМИКС-топлива. Топливо РЕМИКС-С позволяет ежегодно экономить 28–36 % природного урана (в зависимости от глубины отвала 0,1–0,23 %) и сокращать на 25–40 % образование обедненного гексафторида урана по сравнению с традиционным урановым открытым топливным циклом. Топливо РЕМИКС-А дает меньшую экономию урана 18–24 % и накопление ОГФУ 15–17 %, но большую экономию работы разделения 8–18 %. Топливо РЕМИКС позволяет почти в 20 раз уменьшить массу радиоактивных отходов, подлежащих окончательному захоронению (правда, почти при той же радиоактивности, что и ОЯТ).

В топливе РЕМИКС-Б, в отличие от РЕМИКС-А и С, отсутствует топливная добавка из обогащенного природного урана, а необходимая концентрация делящихся нуклидов достигается обогащением регенерата урана, полученного в результате переработки ОЯТ. В вариантах топлива РЕМИКС-А и С в результате переработки одной отработанной ТВС формируется одна ТВС с РЕМИКС-топливом, а в варианте РЕМИКС-Б в одну ТВС входят уран-плутониевая смесь и обогащенный остаток регенерата урана (не вошедшего в уран-плутониевую смесь), полученные в результате переработки нескольких ТВС. Конкурентоспособность топлива РЕМИКС-Б более чувствительна к стоимости переработки ОЯТ по сравнению с топливом РЕМИКС-А и С, поскольку для его производства требуется переработка массы ОЯТ, превышающей массу готового топлива в 3,4–3,8 раза. Во столько же раз больше плутония содержится в топливе РЕМИКС-Б по сравнению с топливом РЕМИКС-А и С, что ставит вопросы по обеспечению безопасности реактора. Оценки показывают, что топливные затраты АЭС, работающей в замкнутом ЯТЦ с топливом РЕМИКС-Б, станут ниже таковых для открытого уранового ЯТЦ, если стоимость переработки ОЯТ будет ниже 300–500 дол./кг т.м., а стоимость обращения с ОЯТ в традиционном открытом цикле будет более 500–1300 дол./кг т.м. Допустимая для конкурентоспособности топлива РЕМИКС-Б стоимость переработки ОЯТ возрастает в случае ожидаемого подорожания природного урана и работы разделения. В то же время производство топлива РЕМИКС-Б, в сравнении с традиционным урановым топливом, не нуждается в природном уране, требует в 3

раза меньше работы разделения, оставляет в 3–3,5 раза меньше обедненного гексафторида урана и почти в 20 раз меньше массы РАО для окончательного захоронения.

4. Применительно к экспортируемой товарной продукции ЯТЦ впервые использована разработанная ранее в НИЯУ МИФИ оригинальная методика формирования оптимального инвестиционного портфеля (А.В. Крянев и др.). Показана возможность формирования и прогнозирования эффективных портфелей с продукцией ЯТЦ (природный уран, обогащенный урановый продукт, РЕМИКС-топливо и др.) для производственно-сбытовой компании в условиях заданной неопределенности исходных инженерно-экономических параметров (цен, объемов, экспортных и импортных ограничений и др.). Предлагаемая методика, в отличие от схемы Марковица и VaR-схемы, основана на так называемых «вероятностях приоритета продукта», что позволяет максимизировать ожидаемое значение рентабельности портфеля и снизить экономические риски.

Прогнозирование внешнеторгового потенциала компании по объёму товаров или услуг (продуктовому портфелю) и по выручке наталкивается на ряд неопределенностей, затрудняющих оценку товарно-денежных отношений на глобальном рынке. В работе приведен краткий анализ неопределенностей на рынке продукции ЯТЦ, связанных с разнообразием сценариев развития ядерной энергетики, волатильностью рыночных цен на уран, конверсию и работу разделения, квотированием поставщиков, конкуренцией на рынке ТВС, масштабами переработки ОЯТ, с возможностью выхода на рынок толерантного топлива, устойчивого к авариям. В предлагаемой методике при формировании портфеля из n -продуктов для

m -заказчиков (покупателей) учитываются потребности каждой j -страны-импортера ($j = 1, \dots, m$) в i -продукте ($i = 1, \dots, n$) и существующие квоты на поставку отечественной продукции. Искомые относительные доли продукции в портфеле обозначим w_{ij} . Требуется определить такой набор (портфель) объемов продаж w_{ij} , при котором достигается максимум ожидаемой эффективности $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} R_{ij}$, где под R_{ij} понимается рентабельность продаж

каждого продукта. В качестве критериев эффективности портфеля могут приниматься другие показатели в зависимости от того, какой показатель эффективности рассматривается импортером. При этом, конечно, состав портфеля будет иным, соответствующим заданному критерию. В связи с неопределенностью (разбросами) возможных значений исходных данных выбранный критерий R_{ij} может принимать любое значение из диапазона (интервала) $[R_{ij \min}, R_{ij \max}]$ с плотностью вероятностей p_{ij} . За пределами этого интервала рентабельность может быть отрицательной. Определение состава продуктового портфеля включает несколько этапов: 1) определение экспертами интервалов разброса исходных параметров, дающих неотрицательную рентабельность с учетом ограничений; 2) выбор функции распределения вероятностей p_{ij} достижения рентабельности R_{ij} ; 3) расчет математических ожиданий рентабельности; 4) расчет долей w_{ij} продуктов в портфеле.

В простейшем случае эти доли (веса) можно выбирать пропорционально средним ожидаемым значениям показателя эффективности. Чем больше среднее ожидаемое значение доли прибыли в выручке для рассматриваемого продукта по сравнению с другими продуктами, тем большая доля этого продукта должна быть в составе портфеля. Однако наилучший экономический эффект можно получить, если доли w_{ij} продуктов в портфеле определять на основе оценки **вероятностей приоритетов** рентабельности (прибыльности) различной продаваемой продукции. Вероятности приоритетов рентабельности определяются попарным сравнением рентабельностей продуктов, входящих в портфель компании. Данная схема обладает таким свойством, что при равенстве математического ожидания рентабельности двух продуктов большую долю в портфеле получает продукт с меньшей дисперсией. Такая схема формирования эффективных продуктовых портфелей позволяет, с одной стороны, не упускать возможности увеличения рентабельности от поставок любых видов продукции и услуг, а с другой стороны, максимизировать общий уровень рентабельности продуктового портфеля компании и снизить риски.

В качестве примера реализации разработанной методики прогнозирования продуктового портфеля ЯТЦ в условиях неопределенности рассматривается глобальный рынок трех продуктов: 1)

природного урана (в форме гексафторида UF_6); 2) работы разделения;

3) РЕМИКС-топлива для реакторов типа PWR (ВВЭР) и BWR на горизонте планирования до 2050 г. (рисунок 9). Динамика рыночных цен на природный уран (в форме гексафторида UF_6), на обогащение урана (работу разделения) и на РЕМИКС-ТВС (с обогащением 4,5 %) задавалась исходя из моделей, представленных в главах 1–2, с учетом влияния на цены темпов развития ядерной энергетики (чем выше спрос, тем выше цены). Интервалы разброса других исходных данных задавались в пределах от ± 1 до ± 10 % по отношению к средним значениям различных исходных параметров.

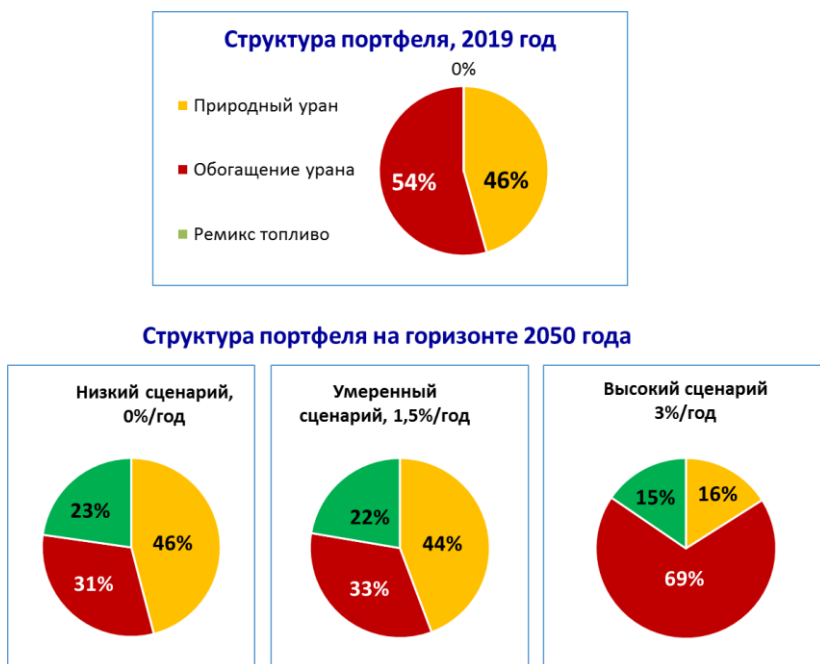


Рисунок 9. Пример прогноза структуры портфеля сбытовой компании в сырьевом секторе ЯТЦ (из трех продуктов: природный уран, обогащение урана и РЕМИКС-топливо) при разных сценариях развития мировой ядерной энергетики (низкий, умеренный и высокий сценарии)

В 2019 г. структура портфеля определялась только двумя продуктами – природным ураном (46 %) и услугами по обогащению урана

(54 %), что соответствует традиционному ЯТЦ. В последующие годы появляется третий продукт – РЕМИКС-топливо, фабрикация которого предусматривает переработку ОЯТ. При высоких темпах развития ядерной энергетики (3 %/г.) в структуре портфеля сбытовой компании наибольший вес приобретают услуги по обогащению урана (69 %), поскольку исчерпание его традиционных ресурсов требует все более глубокого извлечения урана-235, что и ведет к увеличению работы разделения и ее рыночной цены. При этом объемы продаж РЕМИКС-топлива также возрастут (по заданному сценарию до 16 % от потребности АЭС), но его вес в портфеле снизится по сравнению с весом в базовом (умеренном) сценарии (1,5 %/г.), для которого потребность в природном уране и работе разделения меньше.

Исследовано также влияние интервалов неопределенностей на структуру портфеля. Так, уменьшение интервала возможного изменения рентабельности услуг по обогащению урана с 50 условных единиц до 0 (при неизменных интервалах рентабельности по природному урану и Ремикс-топливу) приводит к увеличению веса обогащения урана в портфеле с 28 до 36 %. Такая закономерность обеспечивается ростом показателя приоритета для того продукта, у которого снижается размер интервала возможных значений рентабельности (и, тем самым, дисперсия).

В заключении представлены основные выводы и результаты проведенного исследования.

1. Разработана новая методика долгосрочного прогнозирования динамики и себестоимости добычи природного урана и влияния этой динамики на потребности тепловых реакторов во вторичных источниках ядерного топлива для разных сценариев развития мировой ядерной энергетики.

2. Определена ценность обедненного гексафторида урана в качестве вторичного сырья для производства ядерного топлива тепловых реакторов и усовершенствована методика оценки экономической эффективности вовлечения ОГФУ в производство эквивалента натурального урана и обогащенного уранового продукта с учетом рыночных цен на природный уран и работу разделения изотопов урана.

3. Разработаны новые методы оценки экономической эффективности использования регенерированной из ОЯТ уран-плутониевой смеси в качестве сырья для производства конкуренто-

способного

РЕМИКС-топлива тепловых реакторов в зависимости от состава топлива и стоимости ключевых технологических переделов. Определены условия конкурентоспособности РЕМИКС-топлива в зависимости от его состава и рыночных цен на ключевые технологические переделы, природный уран и работу разделения.

4. Предложена методика формирования набора продуктового портфеля (и бизнес-проектов) для поставщика продукции ЯТЦ при разных сценариях развития ядерной энергетики в условиях заданной неопределенности исходных технико-экономических параметров.

5. Апробированы предложенные методы и инструменты управления экономикой сырьевого обеспечения ядерной энергетики в компании АО «Техснабэкспорт» Госкорпорации «Росатом», как одного из ведущих мировых экспортеров продукции ЯТЦ, и в учебном процессе НИЯУ МИФИ.

III. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ АВТОРА

Публикации в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ по экономическим наукам:

1. Ульянов Ю.А. Экономика сбалансированного ядерного топливного цикла с инновационным РЕМИКС-топливом / Ю.А. Ульянов, В.В. Харитонов // Микроэкономика. – 2021. – № 2. – С. 55–63.
2. Ульянов Ю.А. Сценарии развития мировой ядерной энергетики в условиях ограниченности ископаемых ресурсов / Ю.А. Ульянов, В.В. Харитонов // Экономические стратегии. – 2021. – № 3. – С. 24–31.
3. Ульянов Ю.А. Прогнозирование динамики истощения традиционных энергетических ресурсов / Ю.А. Ульянов, В.В. Харитонов, Д.Ю. Юршина // Проблемы прогнозирования. – 2018. – № 2. – С. 60–71. // Forecasting the Dynamics of the Depletion of Conventional Energy Resources // Studies on Russian Economic Development, 2018. – Vol. 29. – No. 2. – P. 153–160. Doi: <https://doi.org/10.1134/S1075700718020156>.

Публикации в других ведущих рецензируемых изданиях, включенных в глобальные индексы цитирования Scopus и Web of Science

4. Ульянов Ю.А. Оценка конкурентоспособности регенерированного уран-плутониевого РЕМИКС-топлива в тепловых реакторах / А.В. Матвеев, В.В. Харитонов, Ю.Г. Павлов, Ю.А. Ульянов // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 1. – С. 52–56 // Competitiveness Assessment of Regenerated Uranium-Plutonium Remix Fuel in Thermal Reactors // Atomic Energy, 2021. –

Vol. 130. – No. 1, Q3. – P. 57–62. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00774-z>.

5. Ульянин Ю.А. О ценности ОЯТ как сырья для топлива реакторов на тепловых нейтронах / А.П. Соловьева, Ю.А. Ульянин, В.В. Харитонов, Д.Ю. Юршина // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 140–150. // The value of spent nuclear fuel as a raw material for fueling reactors on thermal neutrons // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika. 2019. – No. 2, Q4. – P. 140—152. – Doi: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.12>.

6. Ульянин Ю.А. Эффективность вовлечения обеднённого урана в обогатительное производство / Ю.Г. Павлов, Ю.А. Ульянин, Д.А. Лазарев, В.В. Харитонов // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127. – Вып. 1. – С. 29–35 // Economic Efficiency of Bringing Depleted Uranium into Enrichment // Atomic Energy. 2019. – Vol. 127. – P. 33–39. – Q4. – Doi: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00580-8>.

7. Ульянин Ю.А. Расчет приведенной стоимости работы разделения изотопов урана / Ю.Г. Павлов, Е.В. Семенов, Ю.А. Ульянин, В.В. Харитонов // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124. – Вып. 4. – С. 234–239. // Calculation of the Present Value of Separative Work for Uranium Isotopes // Atomic Energy, 2018. – Vol. 124. – No. 4. – P. 279–286. – Q4. – Doi: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0411-8>.

8. Ulyanin Yu.A. Schemes for the formation of effective resource portfolios and areas of activity of organizations based on statistical forecasts / A.V. Kryanev, Yu.G. Pavlov, D.E. Sliva, Yu.A. Ulyanin // Journal of Physics: Conf. Series. 1205 (2019). – 012028. – 6 p. [IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1205/1/012028].

9. Yury Uliyanin. Forecasting of an NPP decommissioning dynamics / Alena Soloveva, Yury Uliyanin, Vladimir Kharitonov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series, 2018. – Vol. 1133. – No. 1. – Q4. – Doi: 10.1088/1742-6596/1133/1/012006.

Публикации в изданиях, индексируемым в РИНЦ, и в других изданиях

10. Ульянин Ю.А. Аналитическое моделирование динамики истощения не возобновляемых традиционных энергетических ресурсов / В.В. Харитонов, Ю.А. Ульянин, Д.Е. Слива // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2019. – Т. 8. – № 3. – С. 298–307.

11. Ульянов Ю.А. Прогнозирование эффективности инвестиций в многоблочные электростанции / В.В. Харитонов, Н.В. Косолапова, Ю.А. Ульянов // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2018. – Т. 7. – № 6. – С. 545–562.

12. Ульянов Ю.А. Имитационная экономико-математическая модель продуктовых рынков ядерного топливного цикла «Рынок ЯТЦ» / Д.С. Смирнов, А.А. Богатырева, Ю.Г. Павлов, Н.С. Ростовский, Ю.А. Ульянов, В.В. Харитонов // IV Российский экономический конгресс (Москва, МГУ, 21–25 декабря 2020 г.) Тематическая конференция «Цифровая экономика и сети» (сборник материалов). – 2020. – Т. XX. – С.73–74.

13. Uljanin Y.A. On the economic value of depleted uranium hexafluoride / Y.G. Pavlov, Y.A. Uljanin, V.V. Kharitonov // XVII International Scientific Conference and School of Young Scholars «Physical and Chemical Processes in Atomic Systems». Technical Program and Abstracts. – М.: NRNU MEPhI, 2019. – P. 36.

14. Ульянов Ю.А. Инженерно-экономический анализ применения толерантного топлива в ядерной энергетике / В.В. Харитонов, Б.А. Калинин, А.Н. Силенко, Ю.А. Ульянов // Тезисы докладов XI конференции по реакторному материаловедению АО «ГНЦ НИИАР» (г. Димитровград, 27–31 мая 2019 г.). – Димитровград. – 2019. – С. 84–89.

15. Uliyanin Y.A. Nuclear perspectives at exhausting trends of traditional energy resources / Y.A. Uliyanin, V.V. Kharitonov, D.Yu. Yurshina // Nuclear Energy and Technology. – 2018. – № 4 (1). – P. 13–19. <https://doi.org/10.3897/nucet.4.28724> DOI 10.3897/nucet.4.28724.

16. Ульянов Ю.А. Формирование эффективных портфелей направлений деятельности организаций на основе статистических прогнозов / А.В. Крянев, Д.Е. Слива, Ю.Г. Павлов, Ю.А. Ульянов // Сборник докладов VII Международной конференции «Проблемы математической физики и математическое моделирование» (Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling) (25–27 июня 2018 г., Москва). – М.: НИЯУ МИФИ. – 2018. – С. 180–182.

17. Ульянов Ю.А. Перспективы ядерной энергетики в условиях истощения традиционных энергетических ресурсов / Ю.А. Улья-

нин, В.В. Харитонов, Д.Ю. Юршина // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 5–16.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
ЕРР	Единица работы разделения (1 кг)
МОКС-топливо	Смешанное оксидное уран-плутониевое топливо (с содержанием плутония до 20 %) (от MOX – Mixed-OXide fuel)
ОГФУ	Обедненный гексафторид урана (UF ₆)
ОУП	Обогащенный урановый продукт
ОЯТ	Облученное (отработавшее) ядерное топливо
ПУ	Природный уран
РАО	Радиоактивные отходы
РЕМИКС-топливо	Смешанное оксидное уран-плутониевое топливо для тепловых реакторов (с содержанием плутония до 5 %) (от REMIX – REgenerated MIXture)
ТВС	Тепловыделяющая сборка
т. м.	Тяжелые металлы
ЭНУ	Эквивалент натурального урана
ЯТЦ	Ядерный топливный цикл
BWR	Boiling water reactor (кипящий водяной реактор)
PWR	Pressurized water reactor (реактор с водой под давлением, аналог ВВЭР)

Подписано в печать 20.12.2022. Формат 60х84 1/16.
Уч.-изд.л. 2,25. Печ.л. 2,25. Тираж 80 экз.

Типография НИЯУ МИФИ.
115409, Москва, Каширское ш., 31.