

УДК 338.45:621.039(470+575.2)  
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-8-45-61

**АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
(НА ПРИМЕРЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ)**

*В.И. Гусева, В.В. Бологова, Н.И. Колданова*

*Аннотация.* Рассматриваются проблемы и перспективы развития атомной энергетики как в Российской Федерации, так и в Кыргызстане, которая делает первые шаги к ядерной энергетике. Рассмотрены применяемые и перспективные технологии АЭС, проведен анализ операционной, инвестиционной и финансовой деятельности АО «Концерн Росэнергоатом». Основное внимание уделено технологии, предполагающей объединение реактора на быстрых нейтронах (БН) непосредственно с действующими реакторами с открытым циклом водородных энергетических реакторов (ВВЭР). Проведен обзор возможных к применению цифровых технологий и дана оценка результатов внедрения виртуальной подстанции на Калининской АЭС, просчитан дополнительный эффект от реализации «зеленых сертификатов».

*Ключевые слова:* атомная энергетика; замкнутый ядерный технологический цикл; реактор на быстрых нейтронах; топливная составляющая себестоимости; факторная модель; экономическая эффективность.

**АТОМ ЭНЕРГЕТИКАСЫ: КӨЙГӨЙЛӨРҮ ЖАНА ӨНҮГҮҮ КЕЛЕЧЕГИ  
(РОССИЯ ФЕДЕРАЦИЯСЫНЫН ЖАНА КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН  
МИСАЛЫНДА)**

*В.И. Гусева, В.В. Бологова, Н.И. Колданова*

*Аннотация.* Бул макала атомдук энергетикага алгачкы кадамдарды жасап жаткан Россия Федерациясындагы жана Кыргызстандагы атомдук энергетиканы өнүктүрүүнүн көйгөйлөрүнө жана келечегине арналган. АЭСтин колдонулуучу жана келечектүү технологиялары каралып, «Росэнергоатом концерни» Акционердик коомунун операциялык, инвестициялык жана финансылык ишмердүүлүгүнө талдоо жүргүзүлдү. Негизги көңүл тез нейтрон реакторун (ТН) түздөн-түз иштеп жаткан ачык циклдагы суу-суулу энергетикалык реакторлор (ССЭР) менен бириктирүүнү камтыган технологияга бурулат. Калинин АЭСиндеги виртуалдык көмөкчордонду ишке ашыруунун натыйжасы бааланып санариптик технологияларды колдонууга мүмкүн болгон сереп жүргүзүлүп, «жашыл сертификаттарды» ишке ашыруунун кошумча таасири эсептелди.

*Түйүндүү сөздөр:* атом энергетикасы; туюк ядролук технологиялык цикл; тез нейтрон реактору; өздүк нарктын отун компоненти; фактордук модель; экономикалык натыйжалуулук.

**NUCLEAR ENERGY: PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT  
(ON THE EXAMPLE OF THE RUSSIAN FEDERATION AND THE KYRGYZ REPUBLIC)**

*V.I. Guseva, V.V. Bologova, N.I. Koldanova*

*Abstract.* This article is devoted to the problems and prospects for the development of nuclear energy, both in the Russian Federation and in Kyrgyzstan, which is taking the first steps towards nuclear energy. The article considers the current and promising technologies of NPPs, analyzes the operational, investment and financial activities of JSC "Rosenergoatom Concern". The paper focuses on the technology involving the combination of a fast neutron reactor (BN) directly with operating reactors with an open cycle of pressurized water reactors (VVER). A review of possible digital technologies for use was also carried out and the result of the implementation of a virtual substation at the Kalinin NPP was assessed, the additional effect of the implementation of "green certificates" was calculated.

*Keywords:* nuclear power engineering; closed nuclear technological cycle; fast neutron reactor; fuel component of cost; factor model; economic efficiency.

Интерес в мире к атомной энергетике снова растет. Если в Российской Федерации атомная энергетика развивается семимильными шагами, то Кыргызская Республика делает первые шаги к созданию ядерной инфраструктуры. В последние годы в периодических изданиях республики активно обсуждаются перспективы развития ядерной энергетике, в том числе строительства атомной станции малой мощности на территории республики. «В Кыргызской Республике есть как сторонники, так и противники строительства АСММ. Среди выступающих за возведение атомной станции малой мощности – глава кабмина Акылбек Жапаров, против инициативы – «Зеленый альянс Кыргызстана», объединяющий более 40 организаций» [1].

Представители организаций «Зеленый альянс Кыргызстана» считают, что «потенциальное строительство атомной станции даже малой мощности несет серьезную угрозу безопасности жизни и здоровью населения, так как невозможно обеспечить полную безопасность атомной станции, особенно из-за нарастающей конфликтности в регионе и более частых природных катаклизмов» [1].

Мы полагаем, что следует признать факт, что, во-первых, «...генерации электроэнергии все меньше и меньше, у нас большой дефицит мощностей», а во-вторых, нельзя забывать, что «в энергетике Кыргызстана основная масса электрооборудования энергокомпаний по степени износа соответствует красному уровню угрозы энергетической безопасности, то есть износ оборудования свыше 60 %. Поскольку предельно-критическое значение износа основных фондов 30 %, то можно сделать неутешительный вывод, что практически все энергокомпании используют оборудование, технические характеристики которого по степени изношенности значительно превышают данный индикатор, что свидетельствует о наличии реальной угрозы энергетической безопасности в республике» [2, с. 15]. (рисунок 1).

На рисунке 1 показана степень изношенности оборудования энергокомпаний, это свидетельствует, что «острой проблемой для энергетической отрасли республики является текущее состояние сетей передачи электроэнергии, поскольку инфраструктурные объекты сектора устарели и потери электроэнергии высокие. Большинство линий электропередачи, построенных еще в 1960–1970-х годах, находятся в аварийном состоянии. Передающие и распределительные сети разрушаются, что приводит к высоким техническим потерям электроэнергии» [2, с. 16].

В свою очередь, накопление износа оборудования выше критического уровня в энергетической отрасли страны ведет к нарушениям энергетического режима эксплуатации, веерным отключениям, хронически возникающим авариям (рисунок 2).

Кроме того, аварийные отключения в республике имели место и в 2022, и в 2023 гг. Не является исключением ситуация в энергетической отрасли и в 2024 г. – аврийные и верные отключения также случались регулярно.

Поэтому следует согласиться с мнением заместителя министра энергетики Кыргызской Республики Т. Байгазиева, который заявил, что «...из-за зависимости от гидроэнергоресурсов у нас в провале идет базовая мощность – подача энергии, которая должна идти круглосуточно, круглогодично и многолетне... . Возможно, в будущем строительство этих станций позволит создать новую базовую мощность для многолетнего использования» [1].

Кроме того, необходимо учесть тот факт, что в Кыргызстане происходит интенсивное таяние ледников и гидропотенциал страны снижается, что также ухудшает ситуацию в энергетической отрасли.

Следует отметить, что некоторые центральноазиатские страны, в том числе Республика Казахстан и Республика Узбекистан, взвесив все аспекты внедрения атомных станций, подписали соглашения о строительстве АЭС. А если учесть тот факт, что атомная энергетика является частью безуглеродной энергетике, так называемого «Зеленого пути», то развитие данной отрасли особенно актуально, как в Кыргызской Республике, так и в Российской Федерации.

В связи с этим, вызывает научный и практический интерес анализ развития атомной энергетике в Российской Федерации и опыт внедрения новых технологий, в частности, на Калининской АЭС.

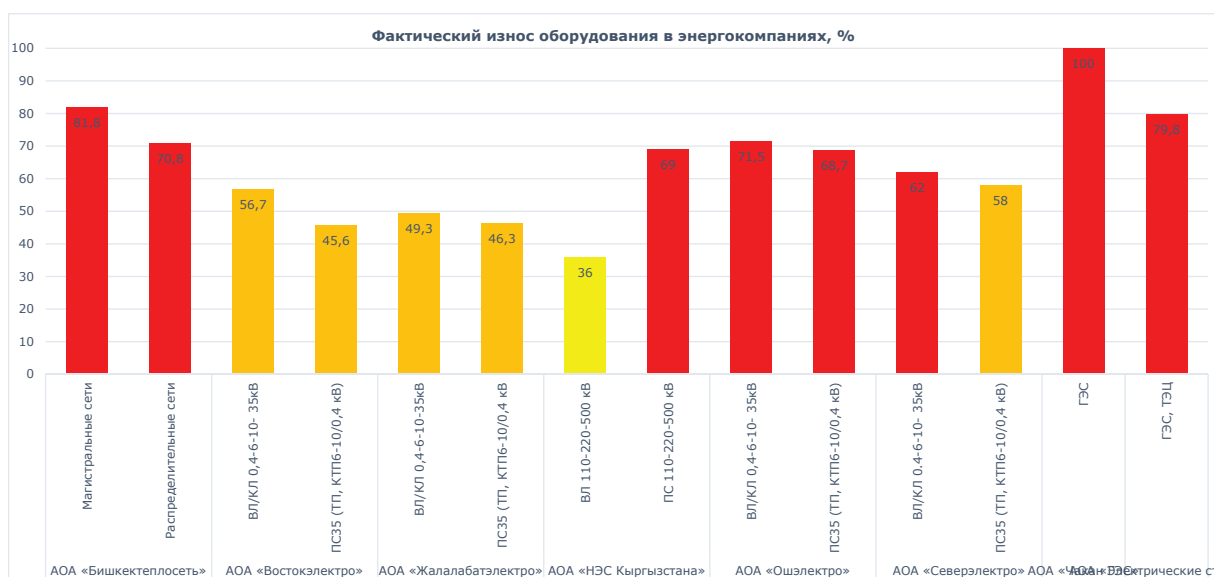


Рисунок 1 – Степень изношенности оборудования энергокомпаний [3]

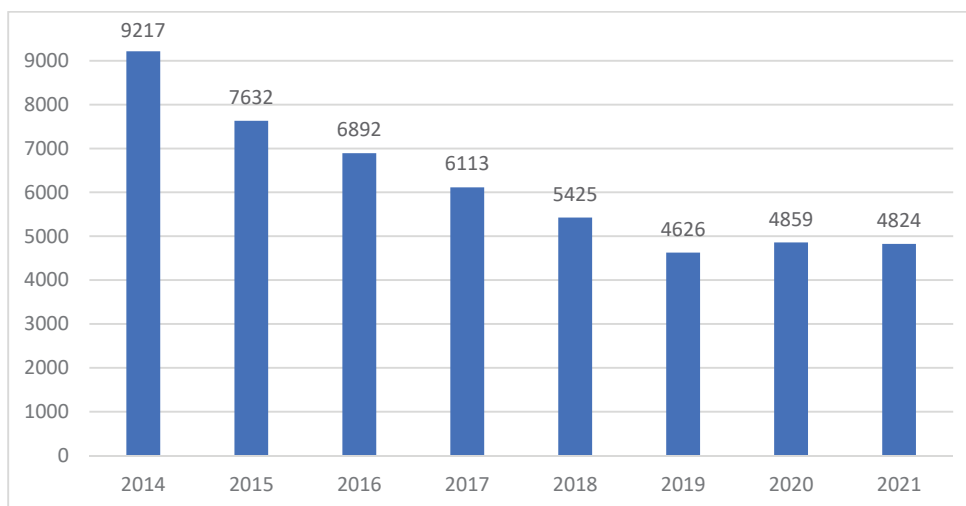


Рисунок 2 – Количество аварийных отключений в Кыргызской Республике [3]

Рассмотрим долю генерации АЭС в общем воспроизводстве электроэнергии в Российской Федерации (рисунок 3).

Аналитика тенденции нагрузки по обеспечению показывает рост генерации атомной энергетики. Основопологающим ресурсом для питания атомных станций является уран. Его запасы расположены неравномерно на всей планете. В настоящее время уран добывают 28 стран. Основные мировые запасы урана в мире находятся в 8 странах (рисунок 4).

Основные мировые запасы урана находятся в Австралии – в стране 19 месторождений урана. Казахстан занимает 2-е место в мировой добыче, мировые запасы этой страны составляют 11,81 %. В этой стране находятся шестнадцать урановых месторождений, крупнейшие из них: Корсан, Южный

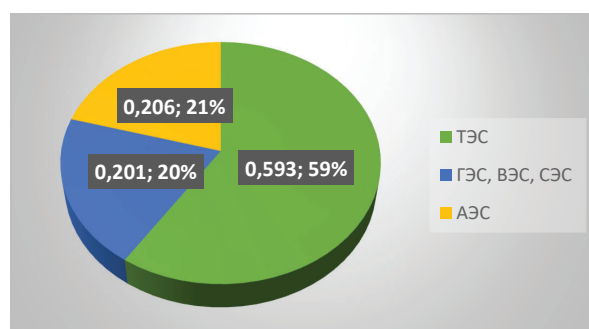


Рисунок 3 – Структура воспроизводства электроэнергии в Российской Федерации [4]

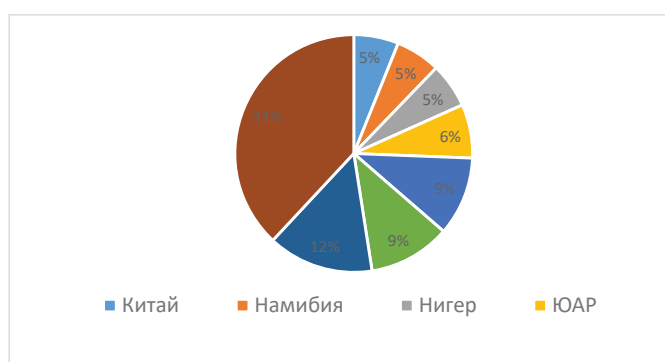


Рисунок 4 – Запас урана в разных странах

Инкай, Ирколь, Харасан, Западный Мынкудук и Буденовское. Россия располагает 9,15 % мировых урановых ресурсов, она занимает третье место по количеству запасов урановой руды. Большинство месторождений расположены в Забайкалье. В Читинской области добывается около 90 % урановой руды. Краснокаменск является крупнейшим центром добычи. Остальные месторождения находятся в Курганской области и Бурятии.

Атомная энергетика в настоящее время переживает не самый простой период. Сегодня ее использование по-прежнему ограничено небольшой частью мира: только 31 страна эксплуатирует атомные электростанции. В общей сложности на 11 АЭС России эксплуатируются 38 энергоблоков установленной мощностью 30,3 ГВт, из них:

- 21 энергоблок с реакторами типа ВВЭР (из них 3 энергоблока – ВВЭР-1200, 13 энергоблоков – ВВЭР-1000 и 5 энергоблоков – ВВЭР-440 различных модификаций);
- 13 энергоблоков с канальными реакторами (10 энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000 и 3 энергоблока с реакторами типа ЭГП-6);
- 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением (БН-600 и БН-800).
- 2 реактора ПАТЭС типа КЛТ-40С электрической мощностью 35 МВт каждый.

В России атомные электростанции вырабатывают до 19 % всей электроэнергии. В европейской части страны эта цифра достигает 30 %, а на северо-западе – 37 %, так как отдаленные территории чаще запитываются атомными электростанциями. Выработка электроэнергии в России в 2019 г. [5]:

- ТЭС – 679,9 млрд кВт·ч (снижение производства на 0,3 %);
- ГЭС – 190,3 млрд кВт·ч (увеличение производства на 3,6 %);
- АЭС – 208,8 млрд кВт·ч (увеличение производства на 2,2 %);

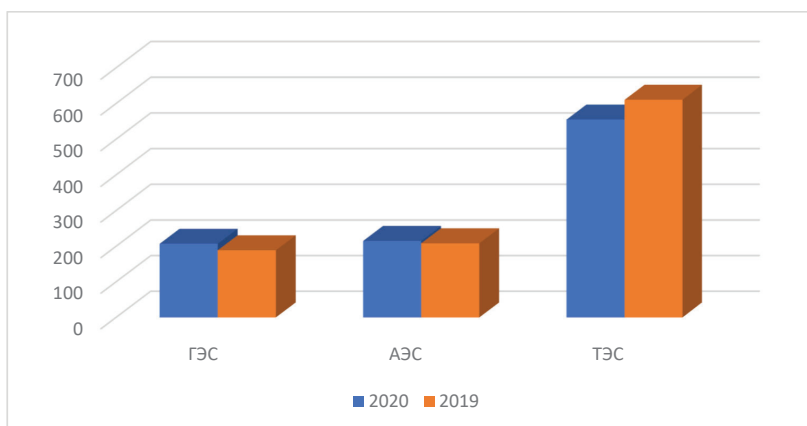


Рисунок 5 – Нагрузка по обеспечению спроса на электроэнергию [2]

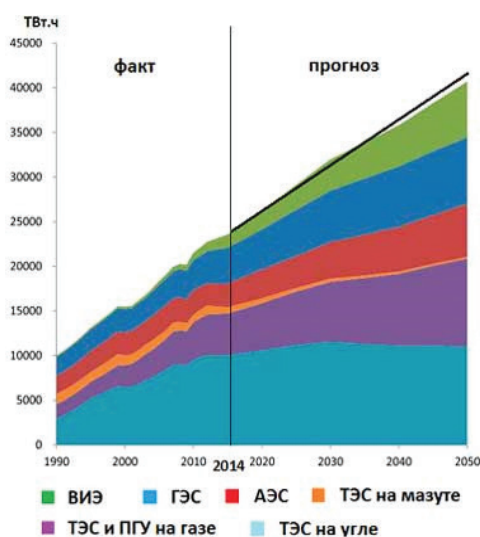


Рисунок 6 – Прогноз мирового электропроизводства [6]

- ВЭС – 0,3 млрд кВт·ч (увеличение производства на 47,3 %);
- СЭС – 1,3 млрд кВт·ч (увеличение производства на 69,4 %).

Анализ тенденции показывает рост генерации атомной энергетики. На рисунке 5 показан график нагрузки по обеспечению спроса на электроэнергию в 2019 и 2020 гг. [6]. Большая часть электроэнергии выработана на ТЭС (тепловых электростанциях). В 2020 г. тепловые станции выработали 555,5 млрд кВт·ч, что на 9,9 % меньше, чем в 2019 году. Данные по ГЭС – 207,4 млрд кВт·ч (на 9,0 % больше, чем в 2019 г.). В свою очередь на атомных электростанциях выпущено 215,5 млрд кВт·ч, что превышает объем 2019 г. на 3,3 %. На промышленных предприятиях электростанций выработали 65,2 млрд кВт·ч, объем в сравнении с 2019 г. вырос на 3,1 %. Наблюдается рост доли АЭС, а использование ТЭС – снижается.

По прогнозу CNPC ETRI 2016 г., в 2050 г. мировое производство электроэнергии на АЭС составит 5,9 трлн кВт·ч (рисунок 6) [7].

Факторы, способствующие развитию АЭС в России:

- устойчивое увеличение потребности в электроэнергии в ближайшие десятилетия;
- конкурентоспособность ядерной электро- и тепловой энергетики;
- сырьевое обеспечение;
- инвестиционные возможности и производственные мощности.

Следует учитывать и экологический фактор, в котором преимущество АЭС очевидно: на ТЭС, помимо опасных компонентов дымовых газов, ещё есть и твердые частицы, диоксид серы, окислы азота и углекислый газ. Также дымовые газы ТЭС содержат канцерогенные углеводороды, пары кислот, токсичные металлы. В таблице 1 приведена сравнительная оценка химических выбросов ТЭС и АЭС.

Таблица 1 – Сравнительная оценка химических выбросов от ТЭС и АЭС на 1 ГВт\*ч выработанной энергии [4]

Химический загрязнитель	Концентрация выбросов, отн. ед.	
	ТЭС	АЭС
SO <sub>2</sub>	1.18*	1.68*
Твердые частицы	3.33*	2.08*
NO <sub>x</sub>	1.28*	1.92*
CO <sub>2</sub>	1.09*	1/82*

Также существует разница в необходимом количестве топлива. Для ТЭС, чтобы год работать на угле и обеспечить выработку 2 ГВт, в год необходимо 6 млн т угля – это 150 000 вагонов, потребность в кислороде составляет около 1010 м<sup>3</sup>/год, за год накапливается около 1.4 млн т (800 тыс. м<sup>3</sup>) твердых отходов. Для аналогичной АЭС нужно всего 2 вагона топлива, она не потребляет кислород, а ОЯТ выделяется в количестве 40–50 т. Твердые отходы ТЭС не дают возможности изготовить новое топливо, а изготовленное новое топливо из 50 т ОЯТ позволяет заместить 2 млн т угля, или 1,6 млрд м<sup>3</sup> газа, или 1,2 млн т нефти. Работа атомных станций положительно влияет на решение экологических проблем – эта технология не потребляет много природного сырья и кислорода, в атмосферу не выбрасываются ядовитые газы, снижается парниковый эффект. Единственным недостатком атомных станций является радиоактивное излучение.

В настоящее время в мире реализуется так называемый «Зеленый курс», он сопровождается формированием новых экосистем и появлением обновленных технологий.

Атомная энергетика в минувшем году обеспечила генерацию более 10 % мировой электроэнергии. Эта доля остается сравнительно стабильной. Но отраслевые эксперты и компании регулярно выражают обеспокоенность по поводу значительного снижения действующих генерирующих мощностей и их рыночной доли в последние 10–15 лет. Ряд стран вовсе приняли решение сократить использование атомной энергии для предотвращения техногенных катастроф и ослабления общественной критики. Так Франция, один из мировых лидеров по доле АЭС в общенациональной выработке электроэнергии, – более 70 %, в 2018 г. объявила о закрытии к 2035 г. не менее 14 реакторов, что соответственно снизит долю АЭС до 50 % [8]. На использовании ядерной энергетики в целом негативно сказываются низкие цены на природный газ, отсутствие дефицита электроэнергии в ключевых экономиках, а также сильное давление со стороны субсидируемых возобновляемых источников энергии, которые в последние годы демонстрируют удешевление строительства генерирующих мощностей и нормированной стоимости электроэнергии. Хотя многие существующие атомные электростанции остаются экономически приемлемым вариантом в рамках перехода на концепцию зеленого развития. На практике они зачастую гораздо менее выгодны для инвесторов из-за того, как структурируется политика ведущих государств в области низкоуглеродной генерации. В последние годы наблюдается резкое отставание атомной энергетики от возобновляемой с точки зрения привлечения инвестиций.

Так, в 2018 г. валовый объем инвестиций в проекты новых энергоблоков в мире составил 33 млрд долл. США, тогда как аналогичный показатель по ветровой и солнечной энергетике достигал соответственно 134 и 139 млрд долл. США. Инвестиционные решения следует рассматривать как важный барометр текущего состояния политической конъюнктуры, а также экономической привлекательности технологий на глобальном и региональном уровнях. Если сохранятся нынешние тенденции рынка, технологий и ресурсов, и если не будут внесены значительные изменения в действующее законодательство и политические приоритеты, которые регулируют атомную энергетику, то ее позиции в мире в расчете на долгосрочную перспективу существенно ослабеют.

В этой связи атомной энергетике срочно **необходима коррекция подходов к реализации новых проектов**, в том числе через: а) ужесточение критериев планирования и разработки проектов АЭС как на ранних, так и продвинутых стадиях; б) использование проверенной цепочки поставок и квалифицированной рабочей силы; в) включение производителей оборудования и инжиниринговых компаний в процесс проектирования на ранних этапах для гарантирования соответствия конструкции и оборудования АЭС утверждаемому проекту и действующим стандартам; г) назначение единого менеджера по основным контрактам с доказанным опытом в управлении несколькими независимыми субподрядчиками; д) создание контрактной структуры, обеспечивающей заинтересованность всех подрядчиков в успехе проекта; е) создание гибкой регулирующей среды, которая поможет своевременно приспосабливать непредвиденные изменения при проектировании и строительстве [6].

В атомной отрасли существуют различные варианты развития технологий. В России основной является технология ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), которая использует обогащенный природный уран для производства электроэнергии, регенерированный уран используется в меньшей степени, при этом КПД составляет около 33 %. Российские ученые постоянно разрабатывают технологии, которые позволяют улучшать технико-экономические показатели ВВЭР:

- ВВЭР с технологией спектрального регулирования для повышения коэффициента безопасности и более эффективного использования топлива как в открытом, так и в замкнутом топливном цикле, а также в режиме переменной нагрузки;
- ВВЭР-СКД, имеющая критические параметры теплоносителя, способствующие увеличению КПД и коэффициента воспроизводства;
- разработка новых видов топлива, таких как РУТ, РЕМИКС, МОКС, которые будут способствовать работе ВВЭР в замкнутом топливном цикле (улучшается топливоиспользование);
- увеличение привлекательности для потребителей в рамках надежности, безопасности, маневренности, мощности.

В таблице 2 представлены действующие современные топливные циклы ВВЭР на обогащенном уране.

Одним из вариантов развития атомной генерации является замкнутый ядерный технологический цикл (ЗЯТЦ). Эта технология основана на том, что переработанное ядерное топливо получает «новую жизнь» в реакторах на быстрых нейтронах (БН), которые отличаются большей мощностью и более высоким КПД (около 43 %). Данные реакторы работают на МОКС (*англ.* Mixed-Oxide fuel – ядерное топливо, содержащее несколько видов оксидов делящихся материалов) и СНУП (смешанном нитридном уран-плутониевом) топливе, которое является результатом переработки топлива, уже отработанного в реакторах с открытым циклом, что позволяет сократить объем используемого урана в ВВЭР и БН. Разрабатывается проект БН, который позволит утилизировать отходы нептуния и америция. На данный момент приступили к сооружению на Белоярской АЭС блока № 5 с РУ БН-1200М. В перспективе рассматривается использование двухкомпонентной ЯЭС на базе ВВЭР и БН с использованием в реакторах топлива, основу которого будет составлять плутоний, выделенный из ОЯТ ВВЭР.

Активному развитию данной технологии препятствует и довольно дорогая стоимость топлива для БН. Для снижения топливных затрат используется однотипное оборудование и топливо, которое можно использовать как для быстрых, так и для тепловых реакторов.

Таблица 2 – Современные и перспективные топливные циклы ВВЭР на обогащенном природном уране [5]

Страна	АЭС	Состояние на 2014			Ближайшая перспектива		
		Тип ТВС	Топливный цикл, мес.	Тепловая мощность реактора, МВт	Тип ТВС	Топливный цикл, мес.	Тепловая мощность реактора, МВт
Россия	Балаково 1-3	ТВС-2М	18	3120	ТВС-2М	18	3120
	Ростов 1,2	ТВС-2М	18	3120	ТВС-2М	18	3120
	Балаково 4	ТВСА-плюс	18	3120	ТВСА-плюс	18	3120
	Калинин, 1-4	ТВС-2М	18	3120	ТВС-2М	18	3210-3300
	Ростов 3				ТВС-2М	18	3120
	АЭС-2006				ТВС-2М	12-18	3120
	ТОИ				ТВС-2М	18	3300
Болгария	Козлодуй 5,6	ТВСА	12	3000	ТВСА-12	12	3120
Китай	Тайвань 1,2	ТВСА	12	3000	ТВС-2М	18	3120
	Тайвань 3,4				ТВС-2М	12-18	3000
Чехия	Темелин 1,2	ТВСА-Т	12	3120	ТВСА-Т	12	3120
Индия	Куданкулам 1	УТВС	12	3000	УТВС	12	3000
	Куданкулам 2				УТВС	12	3000
Иран	Бушер 1	УТВС	12	3000	УТВС	12	3000
Украина	Запорожская	ТВСА	12	3000	ТВСА-12	12	3000
	Южно-Украинская						
	Хмельницкая						
	Ровенская						

На данный момент введен в эксплуатацию реактор БН-800, который полностью работает на МОКС топливе, готовится к сооружению реактор БН-1200. Эти технологии станут начальным этапом перехода к замкнутому ядерному циклу. В перспективе рассматривается смешанное металлическое топливо для БН.

Отходы водо-водяных реакторов могут стать основой такого вида топлива, как РЕМИК топливо, изготовленное из регенерированного плутония и урана, а также РУТ – топлива, для которого регенерируют уран [9].

Реакторы БН, в сравнении с реакторами ВВЭР, имеют более длинный срок полезного использования, например, срок полезного использования ВВЭР-1000 составляет 30 лет, а действующего на Белярской АЭС реактора БН-800 – 45 лет, у БН-1200 – 60 лет. Кроме этого, авторами было определено прогнозируемое снижение себестоимости производства за счет снижения расходов на захоронение и транспортировку отработанного ядерного топлива (ОЯТ), благодаря вторичной переработке использованного топлива. Предлагаемый другими авторами дополнительный эффект от использования переработанного топлива в БН на ВВЭР [10] в данной работе не учитывался, так как эта теория еще не подтверждена на практике.

Внедрение новых технологий непосредственно влияет в том числе и на величину и структуру инвестиционных затрат, себестоимость производства и, как следствие, на эффективность. На данный момент разрабатывается множество моделей оценки эффективности работы реакторов БН. Рассматриваются различные сценарии, в которых идет совмещение реакторов БН с реакторами ВВЭР (водо-водяными энергетическими реакторами), а также реакторами РБМК (реактор большой мощности канальный).



В настоящее время основным коэффициентом оценки эффективности работы АЭС является КИУМ (коэффициент использования установленной мощности). Данные, характеризующие использование установленной мощности электростанций ЕЭС России в разрезе ОЭС, без учета электростанций промышленных предприятий за период 2019–2020 гг., приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты использования установленной мощности электростанций [4]

Объект	2020 г.					2019 г.				
	ТЭС	ГЭС	АЭС	ВЭС	СЭС	ТЭС	ГЭС	АЭС	ВЭС	СЭС
ЕЭС России	41,34	47,33	81,47	27,47	15,08	45,68	43,85	79,82	19,91	14,14
ОЭС Центра	36,57	27,79	80,03			40,35	22,06	76,53		
ОЭС Средней Волги	35,38	43,53	87,17	28,43	14,70	38,94	37,71	85,6	27,77	14,23
ОЭС Урала	49,84	8,67	83,03	6,00	13,84	54,98	44,9	75,17	6,24	13,17
ОЭС Северо-Запада	38,15	53,19	73,14	24,38		44,2	46,71	74,09	23,36	
ОЭС Юга	38,93	38,38	92,48	27,40	16,04	41,38	37,77	95,98	12,7	14,91
ОЭС Сибири	37,35	52,98			14,00	42,99	48,64			12,18
ОЭС Востока	47,37	41,81				47,04	41,01			

Следует отметить, что повышение интенсивности использования имеющегося оборудования на полную мощность еще не означает лучшего результата по технологической эффективности производства энергии на АЭС. Эффективность оценивается другим показателем, таким как КПД нетто, который показывает значение удельного расхода топливного ресурса на единицу отпущенной энергии.

В 2010–2011 гг. выполнен ряд исследований и разработок, позволяющих ввести параметр расхода ядерного топлива в условном исчислении (ЯТУИ) в число инструментов управляющего воздействия на повышение эффективности энергетического производства. Абсолютные и удельные значения ЯТУИ достаточно результативно могут использоваться при оценке результатов хозяйственной деятельности; планировании по технически обоснованным нормативам; сравнении видов генерации в топливном сегменте энергетики; расчетном определении эффективности реконструкции и внедрения новой техники. Систематизация информации основывалась на «Алгоритме расчетного определения расхода ядерного топлива в условном исчислении на производство электрической и тепловой энергии, отпускаемой АЭС» (РОЯТУЭ) и применении определенных способов трансформации натуральных и стоимостных величин с соответствующими единицами измерений, описанных в специальной литературе и разработанных в ходе предыдущих исследований. Численные значения параметров ограничиваются типовым набором технических показателей, представленных в статистической и отраслевой отчетности. Центральное место занимает рассмотрение технологической эффективности и топливной составляющей производства энергии. Численно определенный характер расхода учетной величины ЯТ, выраженный линейной (пропорциональной) зависимостью от количества произведенной первичной теплоты, позволяет проводить техническое нормирование расхода топливного ресурса. Норма расхода учетной величины ЯТ определяется совокупностью следующих нормативов: удельного расхода топливного ресурса на производство первичной теплоты; удельного расхода электрической энергии на доставку тепловой энергии от точки отбора до коллекторов; потерь первичной теплоты при ее преобразовании в электрическую (тепловую) энергию; расхода электрической энергии на собственные нужды.

Специфика работы и необходимость обеспечения безопасной эксплуатации обуславливают соответствующие требования к экономическим условиям функционирования АЭС в действующих и перспективных правилах рынка. В этой связи модель рынка, в котором участвует атомная генерация, должна учитывать необходимость обеспечения эксплуатирующей АЭС организации средствами,

обеспечивающими безопасную эксплуатацию. Помимо этого, за счет средств, получаемых от реализации электроэнергии действующих АЭС, частично осуществляется финансирование действующей масштабной программы строительства новых энергоблоков АЭС, что также требует отдельного учета при разработке правил участия атомной генерации в **рынке** [4].

Рядом авторов были рассмотрены вопросы оценки экономической эффективности двухкомпонентной системы ядерных реакторов, состоящей из тепловых реакторов больших мощных канальных (РБМК), ВВЭР и быстрых натриевых реакторов. Так, А.Л. Мосеевым, В.М. Декусар, В.В. Коробейниковым, В.А. Елисеевым было проведено исследование потенциала двухкомпонентной системы ядерной энергетики (ЯЭ) в разных условиях её развития [11]. В работе авторов рассмотрена технологическая сторона нескольких сценарных методов, которые также предполагают объединение ВВЭР и БН, однако не раскрыта экономическая сторона вопроса.

Особенностью рассматриваемых двухкомпонентных систем ядерных реакторов, состоящих из тепловых реакторов разных типов и быстрых реакторов, является то, что запасы ОЯТ реакторов всех типов в течение рассматриваемого интервала времени полностью перерабатываются и весь избыточный выделенный плутоний используется для изготовления МОКС-топлива, а, следовательно, количество ОЯТ постепенно стремится к 0 [11]. В этой технологии к основной экономической проблеме относится достаточно высокая стоимость изготовления топлива (ТСС), решающий вклад в которую для реактора БН-1200 вносит статья «изготовление тепловыделяющей сборки (ТВС) активной зоны». Во всех рассмотренных случаях он составляет не менее 50 %, причем с увеличением нормы дисконтирования до  $r = 5\%$  он возрастает до 80 % [12]. Следовательно, для снижения ТСС требуется, в первую очередь, уменьшение затрат на топливо, а в условиях принятой нулевой цены плутония и отработанного урана – уменьшение стоимости изготовления (ТВС). В снижении стоимости изготовления ТВС, помимо усовершенствования технологических решений, большую роль играет масштабный фактор – производительность завода по изготовлению МОКС-топлива и масштаб развития АЭ на быстрых реакторах.

На рисунке 7 показана зависимость стоимости изготовления топлива от производительности завода. Видно, что увеличение производительности завода снижает указанную стоимость в разы.

Как показывает практика, стоимость производства МОКС-топлива является одним из сдерживающих факторов при замыкании ядерного топливного цикла (ЯТЦ), также, как и стоимость производств по обращению с отходами ядерного топлива (ОЯТ). Повышение коэффициента воспроизводства полностью не решит проблемы ресурсообеспеченности ураном, однако кризис доступности природного урана отодвигается на несколько десятилетий, за которые возможно появление новых технологий.

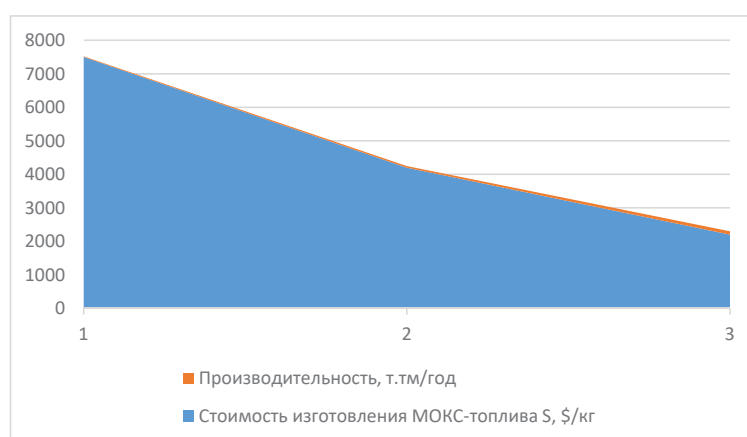


Рисунок 7 – Стоимость изготовления МОКС-топлива как функция производительности завода [12]

В настоящее время существуют различные мнения относительно того, какие именно технологии ЗЯТЦ и реакторы на быстрых нейтронах (БР) нужно создавать, и когда и как переходить на эти технологии в ядерной энергетике (ЯЭ), стартовавшей на тепловых реакторах. Россия обладает технологией БН, которая постоянно развивается с накоплением положительного опыта проектирования, сооружения и эксплуатации, и нетребовательна к изотопному составу загружаемого плутония, и способной к производству плутония высокого качества.

В России внедряются новые реакторы на быстрых нейтронах. Эти реакторы отличаются более высокой стоимостью по сравнению с классическими тепловыми реакторами. На Нововоронежской АЭС-2 и Ленинградской АЭС-2 тепловые реакторы обошлись в 114 млн руб/МВт, в то время как реактор на быстрых нейтронах – в 161 млн руб/МВт. На данный момент на Белоярской АЭС готовится к строительству реактор БН-1200, который, возможно, будет дешевле своего предшественника.

Стоит отметить, что нанотехнологии применяются в атомной энергетике ещё с 70–80-х годов прошлого столетия. Высокоплотное топливо с нанодобавками используется как для повышения эффективности работы АЭС, увеличения глубины выгорания топлива, а также для увеличения срока службы реакторов на быстрых нейтронах без снижения параметров теплоносителя. Развивается технология упрочнения нового класса ферритно-мартенситных сталей частицами оксидов нанометрового размера (ДУО-стали) [13].

Технология БН, как продукта, обеспечивает практически неограниченный по времени потенциал увеличения доли ЯЭ на рынке как электрического, так и неэлектрического применения за счет следующих выгод от владения данной технологией:

- обеспечивается энергетическая безопасность страны на столетия вперед без потребления углеводородных природных ресурсов;
- использование плутония с улучшенным изотопным составом, обуславливающим снижение топливной составляющей стоимости при использовании МОКС-топлива не только БН, но и ВВЭР;
- воспроизводство плутония (при необходимости) в количестве, определяемом потребностями парка ВВЭР на МОКС-топливе;
- возможность исключения зон воспроизводства;
- глубокое выгорание выгружаемого топлива;
- решение экологических проблем через снижение объемов ОЯТ и РАО;
- исключение выбросов оксидов углерода и азота или их снижение за счет замещения традиционных энергоисточников;
- выжигание минорных актинидов;
- возможность размещения энергоблока в любом регионе;
- возможность создания достаточно широкого мощностного ряда;
- расширение международного бизнеса за счет предоставления услуг замыкания ЯТЦ дополнительно к эффективному производству тепла и электричества;
- потенциал расширения спектра предоставляемых услуг за счет, как минимум, когенерации питьевой и технической воды, наработки изотопной продукции.

Перечисленные преимущества и выгоды от применения технологий БН на данный момент трудно оценить в финансово-экономическом аспекте. Тем не менее, их значимость достаточно велика, чтобы все они учитывались при анализе конкурентоспособности технологии. Современные требования к энерготехнологиям, определяющие их многоцелевое использование, направленное на повышение качества жизни населения, предоставляют новые ниши применения ядерных энергоисточников. Эти ниши необходимо и возможно занять при реализации двухкомпонентной ядерной энергетической системы, в которой энергоблоки с реакторами БН являются «партнерами» ВВЭР, а не конкурентами на рынке энергоисточников. Кроме того, развитие ЯЭ обеспечивает развитие неядерных технологий: в медицине, в создании накопителей энергии. Необходимо также решить задачу восстановления производства теплоносителя – натрия для полной независимости от импортных поставок, получить

преференции по технологиям замыкания ЯТЦ на РУ БН-800, обосновать режимы маневрирования. Но это задачи из категории «решаемые» [14].

Основой для оценки эффективности послужили показатели предприятия АО «Концерн Росэнергоатом» [15]. В 2022 г. произошел рост совокупной себестоимости на 82,1 %. Авторами была разработана факторная модель оценки эффективности внедрения новых технологий в атомную отрасль:

$$\sum \Delta t = Vp - (\sum C_{ям} * \sum V_{ям} - \sum M - \sum Pt - \sum K - \sum Tt - \sum C_{мохт} * \sum V_{мохт}) + \sum \Delta Co2t, \quad (1)$$

где  $Vp$  – выручка предприятия;  $\sum C_{ям}$  – стоимость уранового топлива для ВВЭР;  $\sum V_{ям}$  – необходимый объем добычи топлива для ВВЭР;  $\sum M$  – технологические удельные расходы, связанные с эксплуатацией ВВЭР;  $\sum Pt$  – потоки обязательных платежей;  $\sum K$  – инвестиции в строительство БН-1200, внедрение виртуальной атомной станции;  $\sum Tt$  – затраты на переработку ОЯТ, в том числе на их транспортировку;  $\sum C_{мохт}$  – затраты на МОКС – топливо;  $\sum V_{мохт}$  – необходимый объем топлива для БН-1200;  $\sum \Delta Co2t$  – зеленые сертификаты, доход от их продажи.

Стоит отметить, что данная модель более комплексная, чем те, которые разработаны на данный момент. Она охватывает как внешние, так и внутренние факторы, которые могут повлиять на поток платежей при внедрении технологии. Внешним фактором является стоимость уранового топлива – то есть изменение цен на уран. Внутренними факторами является топливная составляющая, которая также зависит от цен на уран и от количества используемого топлива, а также и стоимости разработки МОКС-топлива. У БН-1200 топливная составляющая выше, но это компенсируется тем, что снижаются расходы на утилизацию и транспортировку ОЯТ. Также нужно учесть, что за счет снижения затрат на переработку ОЯТ снижаются общие капитальные обязательные затраты на АЭС.

Авторами были проведены расчеты с использованием этой модели. Рассматривался вариант строительства 2-х реакторов БН-1200 непосредственно в зависимости с ВВЭР-1000. За основу были приняты ВВЭР-1000, которые эксплуатируются на Калининской АЭС в Тверской области. Калининская АЭС является частью предприятия АО «Росэнергоатом» и имеет 4 действующих реактора ВВЭР-1000. Предполагается, что 2 реактора БН-1200 будут использовать отходы от 4-х ВВЭР-1000, таким образом, ОЯТ от ВВЭР будут впоследствии полностью использованы.

На рисунке 8 показан прогнозируемый график сравнения топливной составляющей реакторов БН-1200 и ВВЭР-1000.

На рисунке 9 показан график снижения ОЯТ за счет внедрения БН-1200. Стоит отметить, что расходы снижаются значительно и это приведет к полному их использованию в будущем.

Для большего понимания структуры себестоимости по каждому из реакторов, стоит рассмотреть основные составляющие себестоимости по каждому из типов реакторов (рисунок 10). А также сравнить изменение структуры после внедрения технологий.

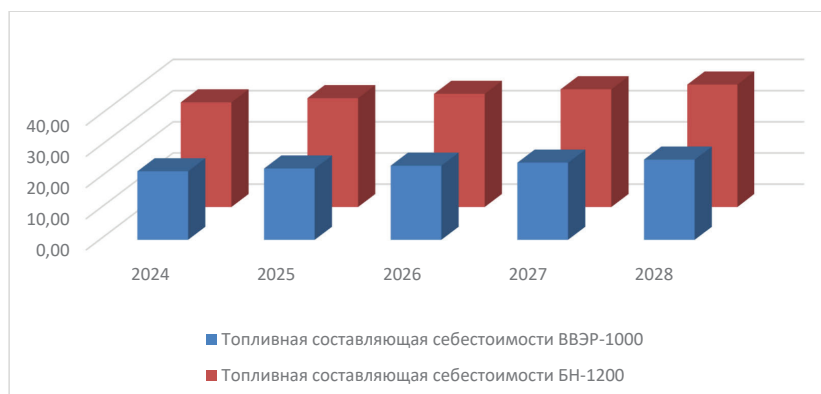


Рисунок 8 – Топливная составляющая себестоимости



Рисунок 9 – Затраты ОЯТ после внедрения БН-1200 на Калининской АЭС

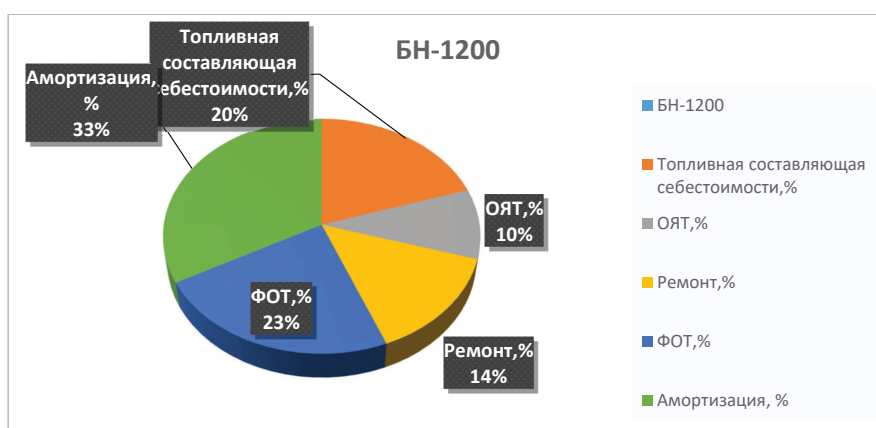
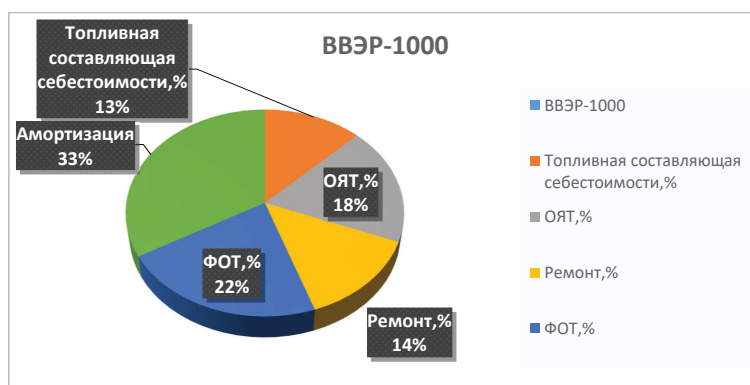


Рисунок 10 – Основные составляющие себестоимости по каждому типу реакторов ВВЭР-1000 и БН-1200

Стоит отметить увеличение ФОТ на БН-1200 за счет дополнительного персонала для новых станций, а также снижение затрат на ОЯТ за счёт того, что происходит использование отработанного ОЯТ от ВВЭР-1000 в реакторах БН-1200.

Отдельным преимуществом новых реакторов является более высокий коэффициент выгорания. Данный коэффициент отражает эффективность использования топлива в реакторе. На рисунке 11 показана зависимость расхода топлива от коэффициента выгорания.

То есть, фактически, расход топлива у БН-1200 гораздо меньше, чем у ВВЭР-100. Увеличение коэффициента выгорания говорит ещё и о том, что ОЯТ будут перерабатываться эффективней, а значит их процент будет снижаться быстрее.

При внедрении любого проекта немаловажную роль играет экономический эффект от применяемых технологий. В данной ситуации таким эффектом можно считать приведенную удельную стоимость электроэнергии (LCOE). Для расчета данного показателя используются годовые денежные потоки, которые делятся на годовой объем производства, с учетом нормы дисконтирования [16].

На рисунке 12 показано сравнение данного показателя у ВВЭР-1000 и полученного авторами в результате проведенного расчета значения для БН-1200.

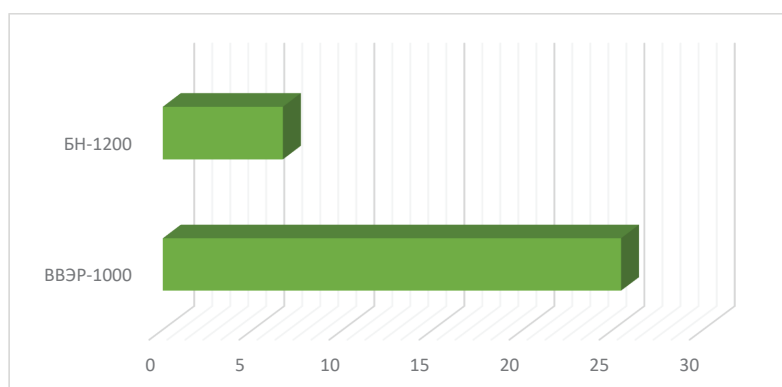


Рисунок 11 – Зависимость количества расхода топлива от коэффициента выгорания

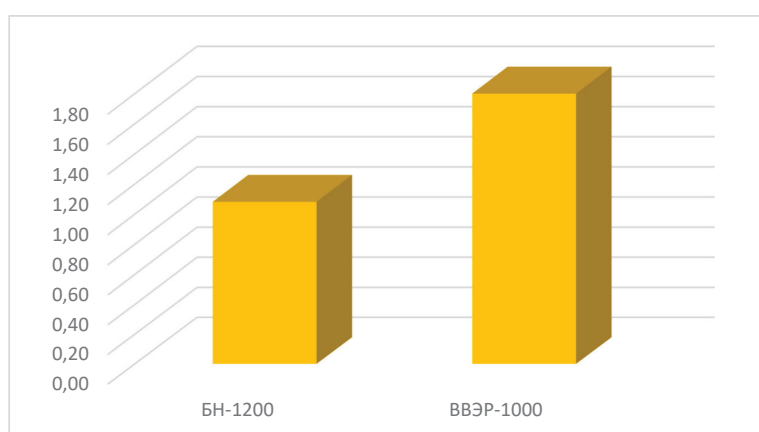


Рисунок 12 – График LCOE, тыс. руб./МВт\*ч

В разработанной модели авторами также предусмотрено внедрение программы «Атомная станция», с помощью которой предполагается производить обучение сотрудников предприятия работе на новых реакторах БН-1200 [17]. На рисунке 13 можно увидеть основной эффект от внедрения программы на Калининской АЭС.

Отдельно следует отметить в модели и такой показатель как «зеленые сертификаты» на электроэнергию. Данные сертификаты удостоверяют, что 1 МВт электроэнергии был произведен возобновляемыми источниками энергии. Стоимость одного сертификата принята в размере 50 руб/МВт\*ч без учета НДС [18].

На рисунке 14 показано увеличение выручки за счет продажи «зеленых сертификатов».

Таким образом, можно отметить, что срок окупаемости проекта по строительству станций составляет 21 год, учитывая, что срок службы реактора БН-1200 – 60 лет.

Строительство реакторов на быстрых нейтронах, если его рассматривать с эффектом масштаба, имеет как положительный экономический эффект от увеличения мощности и снижения стоимости электроэнергии, так и способствует переработке ОЯТ.

Внедрение проекта показало следующую эффективность на поток платежей Калининской АЭС:

- снижение затрат на ОЯТ;
- повышение срока полезного использования в два раза за счет того, что у БН-1200 срок полезного использования 60 лет, а у ВВЭР-1000 – 30 лет;
- общее увеличение электрической мощности Калининской АЭС на 70 %;
- общий коэффициент выгорания вырос в 4,5 раза;
- снижение аварийности за счет проектирования и обучения персонала в программе «Атомные станции»;
- повышение квалификации персонала;
- повышение ФОТ в 1,5 раза;
- дополнительный доход за счет продажи «зеленых сертификатов».

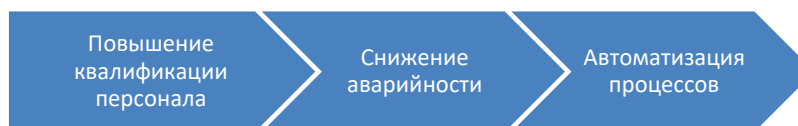


Рисунок 13 – Положительное влияние внедрения виртуальной подстанции на Калининской АЭС

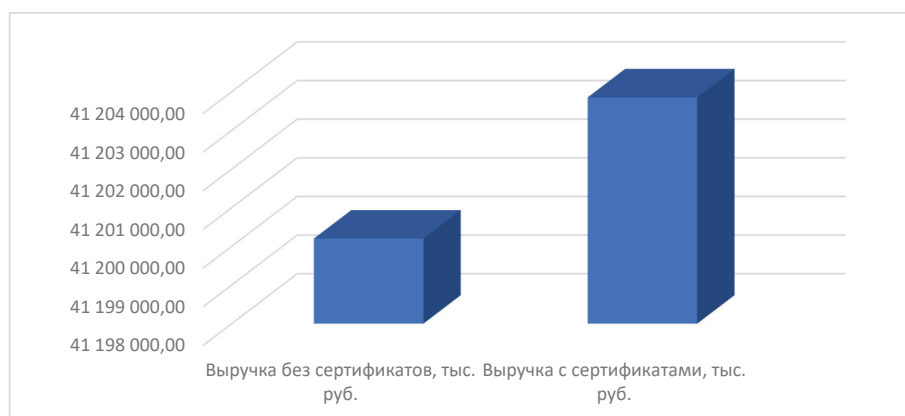


Рисунок 14 – Доход от продажи сертификатов

Дополнительным эффектом от внедрения новых технологий является инвестиционная привлекательность Тверского региона. Увеличение общей вырабатываемой мощности увеличивает и зону покрытия, и обеспечивает электроэнергией большой радиус территорий.

**Выводы.** Для внедрения новых технологий в Кыргызской Республике необходимо проведение исследования опыта работы Калининской АЭС РФ, поскольку из существующих альтернативных источников энергии наиболее перспективным видом энергии выступает атомная энергетика. К тому же, обслуживание атомных станций в долгосрочной перспективе обходится дешевле других источников альтернативной энергии.

Необходимо ознакомиться с технологией, используемой на Калининской АЭС, предполагающей объединение реактора на быстрых нейтронах (БН) непосредственно с действующими реакторами с открытым циклом водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Применение данной технологии позволило получить положительный экономический эффект и повышение эффективности использования ресурсов, а также снижение затрат.

Поступила: 28.05.24; рецензирована: 11.06.24; принята: 13.06.24.

#### *Литература*

1. Атомная станция в Кыргызстане – энергия будущего или серьезная угроза? Мнения. URL: [https://kaktus.media/doc/498200\\_atomnaia\\_stanciiia\\_v\\_kyrgyzstane\\_energiia\\_bydyshego\\_ili\\_sereznaia\\_ygroza\\_mneniia.html](https://kaktus.media/doc/498200_atomnaia_stanciiia_v_kyrgyzstane_energiia_bydyshego_ili_sereznaia_ygroza_mneniia.html) (дата обращения: 20.05.2024).
2. Касымова В.М., Гусева В.И., Курдюкова Г.Н. URL: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/184?heading=3154> (дата обращения: 25.05.2024).
3. Энергетика Кыргызстана 2020 по заказу ГКПЭН. URL: <https://nehk.energo.kg/uploads/download/410389af95bb035c942ea0c1ed4a95d8.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).
4. Полные затраты на производство электроэнергии. Агентство по ядерной энергии // АЯЭ. 2018. № 7298. URL: <https://www.oecd-nea.org> (дата обращения: 16.01.2024).
5. Отчет о функционировании АЭС в России за 2020 год. URL: <https://www.so-ups.ru/> (дата обращения: 16.01.2024).
6. Официальный сайт Объединения юридических лиц «Казахстанская ассоциация организаций нефтегазового и энергетического комплекса «KAZENERGY». URL: <https://www.kazenergy.com/ru/association/about-op/> (дата обращения: 17.12.2023).
7. Нигматулин Б.И. Прогноз мирового электропроизводства на АЭС 2015–2050 / Б.И. Нигматулин // Энергетическая политика. 2017. № 3, С. 78–89.
8. Атомная энергетика до 2030 года: пять ключевых стран. URL: <https://www.atomic-energy.ru/> (дата обращения: 17.12.2023).
9. Облик двухкомпонентной ядерной энергетической системы на базе ВВЭР и реакторов БН / П.Н. Алексеев, А.Л. Баланин, А.В. Гулевич, В.М. Декусар, А.Ф. Егоров, Д.А. Клинов, В.В. Коробейников, Е.В. Марова, А.М. Маслов, А.Л. Мосеев, В.А. Невиница, П.С. Теплов, В.М. Троянов, П.А. Фомиченко, С.Ф. Шепелев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2022. № 4. С. 59–74.
10. Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетической системы при переходе к замыканию ядерного топливного цикла / Е.О. Адамов, А.А. Каширский, Е.В. Муравьев, Д.А. Толстоухов // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 14–32.
11. Исследования потенциала двухкомпонентной системы ЯЭ в разных условиях её развития / А.Л. Мосеев, В.М. Декусар, В.В. Коробейников, В.А. Елисеев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 2. С. 189–205.
12. Сравнительный анализ топливной составляющей стоимости производства электроэнергии на АЭС с РУ типа ВВЭР и БН / В.М. Декусар, В.И. Усанов, А.Ф. Егоров // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2017. № 3. С. 163–170.
13. Наноматериалы, нанопокртия, нанотехнологии: учеб. пособие / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Л.В. Маликов, П.В. Турбин. Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. 209 с. URL: <https://studfile.net/preview/2459232/page:6/> (дата обращения: 17.01.2024).



14. Многофакторная оценка конкурентоспособности коммерческого энергоблока типа БН в системе энергетики России / П.Н. Алексеев, В.Ю. Бландинский, А.Л. Баланин, А.В. Гроль, А.В. Гулевич, В.М. Декусар, А.Ф. Егоров, В.В. Коробейников, Е.В. Марова, А.М. Маслов, А.Л. Мосеев, В.А. Невиница, П.С. Теплов, М.Р. Фаракшин, П.А. Фомиченко, С.Ф. Шепелев, А.В. Широков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. № 3. С. 45–61.
15. Государственный информационный ресурс бухгалтерской (финансовой) отчетности ФНС России. URL: <https://bo.nalog.ru/> (дата обращения: 16.01.2024).
16. Levelized Cost of Energy (LCOE) The Average Total Cost of a Project Per Unit of Total Electricity Generated <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/levelized-cost-of-energy-lcoe/> (дата обращения: 22.01.2024).
17. Программный комплекс “Атомная энергетика”. URL: [https://pl-llc.ru/catalog/energetika-i-teplosnabzhenie/atomnaya-energetika/filter/type\\_element-is-virtual/apply/](https://pl-llc.ru/catalog/energetika-i-teplosnabzhenie/atomnaya-energetika/filter/type_element-is-virtual/apply/) (дата обращения: 02.11.2023).
18. Официальный сайт ПАО «ТГК-1». URL: <https://www.tgc1.ru/press-center/news/i/item/25421/> (дата обращения: 02.11.2023).