

УДК 621.039

СРАВНЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА И ЭКОНОМИКИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ЯТЦ

© 2021 г. А. А. Каширский*

АО “Прорыв”, Москва, Россия

*e-mail: kana@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 22.12.2020 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

В статье приводятся результаты сравнительного анализа ключевых балансовых и экономических характеристик инновационных ЯТЦ, призванных повысить конкурентоспособность ЯЭ и способствовать ее развитию в России и мире. На данный момент для вовлечения регенерированных ядерных материалов в ЯТЦ и выделения РАО для окончательного захоронения существует достаточно большой перечень решений, предлагаемых различными разработчиками в качестве основы для реализации программ частичного или полного замыкания ЯТЦ. Эти технологии могут отличаться применяемыми реакторными установками, видом используемого топлива, масштабом создаваемой для их функционирования дополнительной или модернизируемой инфраструктуры (обоганительные комбинаты, заводы по производству и переработке топлива, специальные реакторы-дожигатели МА, объекты захоронения РАО и т.д.). Если некоторые подходы к замыканию ЯТЦ предполагают постепенный переход на АЭС с РБН, способных наряду с производством электроэнергии решать задачи в части сокращения объемов накопления ОЯТ, дожигания МА и реализации радиационно-эквивалентного захоронения РАО, то для альтернативных циклов технологической опорой полностью или частично служат реакторы ВВЭР, использующие в качестве топлива выделенный из ОЯТ РТН или наработанный в бланкетах РБН Pu. Настоящая работа выполнялась с целью отражения ключевых отличий между принятыми для исследования сценариями развития ЯТЦ в России с точки зрения экономики, ресурсного обеспечения и вопросов обращения с ОЯТ и РАО. Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для стратегического планирования национальных программ ЯЭ или формирования понимания о ключевых преимуществах и недостатках различных инновационных ЯТЦ.

Ключевые слова: ЯЭ, энергетическая стратегия, ЯТЦ, моделирование ЯТЦ, ЗЯТЦ, замкнутый ЯТЦ

DOI: 10.31857/S0002331021020102

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью исследования является проведение системного анализа наиболее актуальных сценариев развития ЯЭ России с переходом на инновационные опции полного или частичного замыкания ЯТЦ. Ожидаемые технико-экономические характеристики рассматриваемых технологий приведены в Стратегии-2018 [1]. Детально представлены диаграммы изменения структуры реакторного парка АЭС, балансов производства, переработки и транспортировки топлива, затрат на реализацию сценариев с де-

тализацией по переделам ЯТЦ. Исследуемый временной интервал принят равным 80 годам – с 2020 г. по 2100 г.

Для сравнения преимуществ и недостатков рассматриваемых в настоящей работе сценариев развития ЯЭ в качестве основной исходной предпосылки выбран “базовый” сценарий роста установленной мощности АЭС, приведенный в Стратегии-2018 с выходом на уровень 91 ГВт (э) к 2100 г. В качестве ключевого показателя, определяющего экономическую целесообразность реализации того или иного сценария в данной работе, принято значение полных затрат на развитие ЯЭС, которое включает затраты на добычу природного урана, конверсию, обогащение, фабрикацию топлива, транспортировку топлива до АЭС, капитальное строительство, транспортировку ОЯТ (до централизованного хранилища или перерабатывающего завода), хранение ОЯТ, переработку ОЯТ и захоронение РАО. Операционные затраты на эксплуатацию и затраты на вывод из эксплуатации АЭС не были включены в перечень учитываемых затрат ЯТЦ ввиду небольшой разницы для этого вида затрат при сравнении различных типов АЭС. Тем не менее, эти затраты являются важнейшей составляющей стоимости электроэнергии ЯЭ и должны быть учтены при более детальном рассмотрении экономики различных типов АЭС. Расчет полных затрат приведен на базе стоимостных данных переделов ЯТЦ в текущих ценах 2019 г. без НДС. Для наиболее полного учета балансовых различий и их влияния на экономику ЯТЦ в рассматриваемых сценариях принято решение использовать показатель полных затрат (включая затраты на строительство АЭС), так как традиционный подход к экспоненциальному дисконтированию денежных потоков при расчете LCOE для выбранных временных интервалов не позволит учесть особенности сценариев (накопление ОЯТ, производство, переработка и транспортировка относительно большого количества топлива и т.д.), которые будут для них характерны во второй половине XXI века.

Ресурсная база природного урана принята без какого-либо ограничения в намерениях отразить возможность импорта ресурсов у зарубежных поставщиков, однако в целях демонстрации степени зависимости ЯТЦ от природной компоненты для каждого сценария проведен расчет интегрального потребления природного урана. Данный показатель по аналогии со Стратегией-2018 может использоваться в качестве условного критерия достаточности собственной ресурсной базы для развития ЯЭ России.

СЦЕНАРИЙ ПН “ПРОРЫВ”

В первом сценарии (сценарий ПН “Прорыв”) рассматривается развитие двухкомпонентной ЯЭ с постепенным полным переходом на технологии РБН, причем парк ВВЭР работает в открытом ЯТЦ исключительно на оксидном урановом топливе (включая дообогащенный регенерированный уран) с переработкой выгружаемого ОЯТ, а парк РБН – в замкнутом ЯТЦ на MNIT топливе. Рефабрикация и переработка ОЯТ РБН осуществляется пристанционным образом в рамках развития парка ПЭК (рис. 1).

СЦЕНАРИЙ МОХ ВВЭР + РБН

Во втором сценарии (сценарий МОХ ВВЭР + РБН) рассматривается развитие двухкомпонентной ЯЭ на основе парков РТН и РБН (за основу приняты характеристики БН-1200М), однако помимо парка ВВЭР, функционирующего на урановом топливе (включая дообогащенный регенерированный уран), рассматриваются также реакторы ВВЭР-С, работающие на МОХ-топливе (рис. 2). Парк РБН при этом функционирует на уран-плутониевом топливе (характеристики приняты для MNIT БН-1200М) и снабжается урановыми бланкетами. В данном сценарии для предотвращения возник-

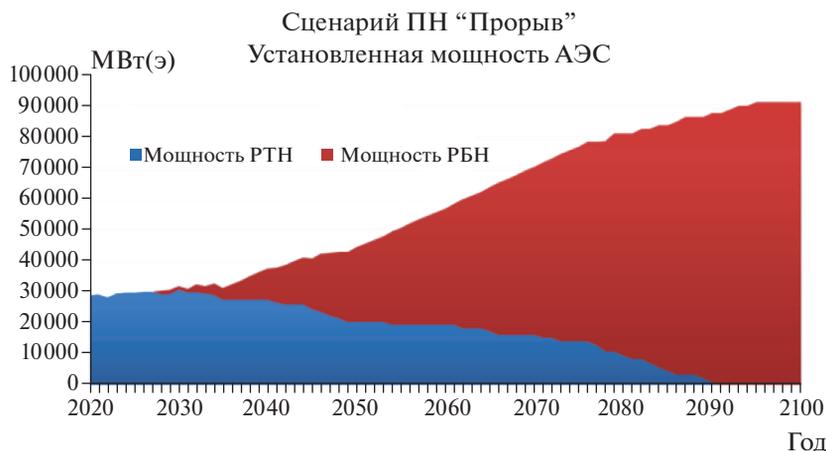


Рис. 1. Изменение структуры установленной мощности в сценарии ПН “Прорыв”.

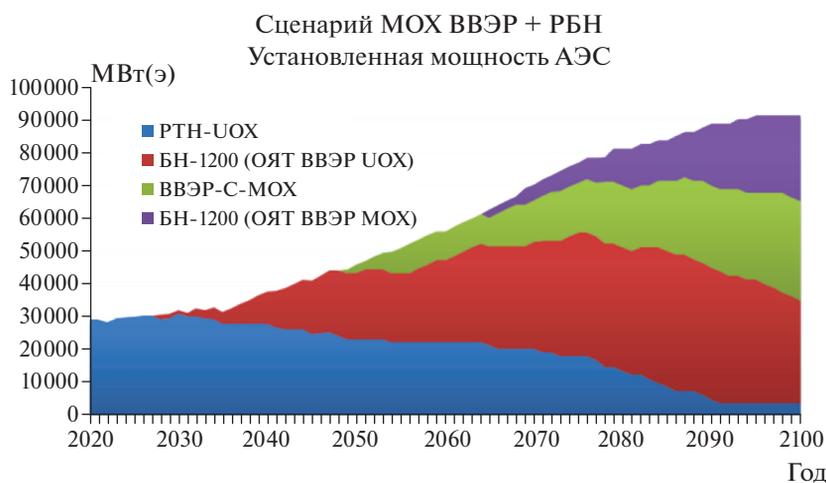


Рис. 2. Изменение структуры установленной мощности в сценарии “МОХ ВВЭР + РБН”.

новения потенциального дефицита $P_{и}$ ввод мощностей различных типов АЭС осуществляется поочередно. В первую очередь вводятся АЭС с БН-1200М, запускаемые на $P_{и}$ из ОЯТ ВВЭР (включая складской + экс-оружейный). Эти РБН помимо выработки э/э используются для наработки $P_{и}$ в бланкетах, который, в свою очередь, будет применяться для пуска ВВЭР-С. В процессе переработки бланкетов РБН выделяется также U- $P_{и}$ регенерат для последующего изготовления МОХ-топлива реакторов ВВЭР-С. Ядерные материалы в составе U- $P_{и}$ -МА, получаемые после переработки МОХ ОЯТ ВВЭР, направляются на пуск новых РБН.

По сравнению со сценарием ПН “Прорыв”, где баланс доступного для запуска РБН $P_{и}$ в основном зависит от скорости исчерпания запасов складского и вновь полу-

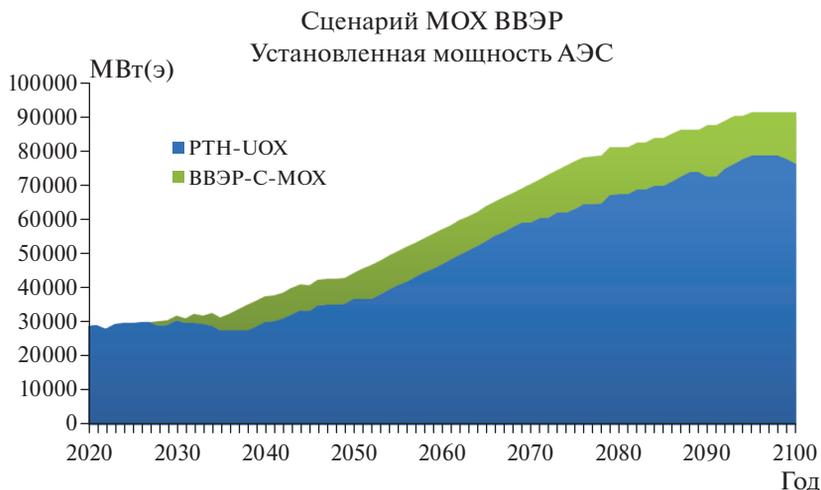


Рис. 3. Изменение структуры установленной мощности в сценарии “МОХ в ВВЭР”.

чаемого Р_и от переработки ОЯТ РТН, ввод мощностей в сценарии ВВЭР + РБН зависит от большего количества факторов, включая доступный запас Р_и от переработки ВВЭР, скорости наработки Р_и в бланкетах, накопления достаточного количества ОЯТ МОХ ВВЭР-С для запуска РБН, работающих на Р_и с меньшим содержанием Р_и-239. Важной особенностью для данного сценария также является централизованный подход к производству и переработке ОЯТ, что повышает запрос на “свежее” уран-плутониевое топливо, по сравнению со сценарием ПН “Прорыв”.

СЦЕНАРИЙ МОХ ВВЭР

В третьем сценарии (МОХ ВВЭР) рассматривается однокомпонентная ЯЭ, развивающаяся на базе парка ВВЭР, причем часть этого парка функционирует исключительно на однократно рециклированном МОХ топливе (рис. 3). Все ВВЭР-С работают на 100% загрузках МОХ топлива. Уран-плутониевый регенерат, образующийся в результате переработки ОЯТ ВВЭР, предназначен для производства на его основе МОХ-топлива ВВЭР. Минорные актиниды, отделяемые от U-Р_и регенерата из ОЯТ ВВЭР, включаются в остеклованные ВАО, которые далее направляются на окончательную изоляцию. В настоящем сценарии предполагается, что после выгорания в активной зоне ВВЭР-С ОЯТ МОХ топлива не перерабатывается и направляется на хранение.

СЦЕНАРИЙ УОХ ВВЭР

Для наглядного сопоставления преимуществ и недостатков сценариев, с точки зрения балансовых характеристик и экономической эффективности, дополнительно разработан сценарий “УОХ ВВЭР”, в котором вся вводимая мощность вплоть до 2100 г. осуществляется на базе технологий ВВЭР (без каких-либо ограничений по сырьевой базе) без переработки ОЯТ.

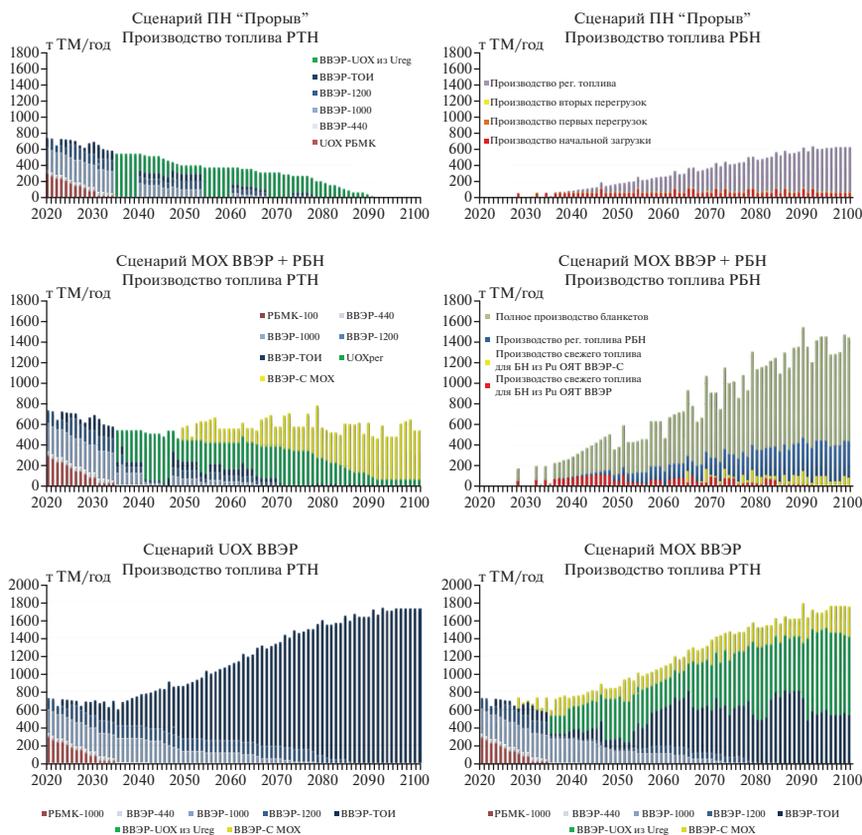


Рис. 4. Динамика производства топлива.

ОПИСАНИЕ БАЛАНСОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЦЕНАРИЕВ

Суммарное количество производимого свежего и регенерированного топлива для каждого сценария зависит от многих факторов, в том числе глубины выгорания, схемы организации топливообеспечения (ПЯТЦ/ЦЯТЦ), длительности выдержки ОЯТ перед переработкой и, наконец, запасов и качества производимого ЯЭС плутония. На рисунке 4 приведена динамика топливообеспечения АЭС для рассматриваемых сценариев.

На рисунке 4 обращает на себя внимание то обстоятельство, что наименьшее количество топлива, которое требуется для обеспечения АЭС к концу века, производится в сценарии ПН "Прорыв". По мере замещения АЭС с ВВЭР новыми ПЭК в данном сценарии основным топливом для всей ЯЭС становится МНПТ с высокой средней глубиной выгорания (12% т.а.). В сценарии MOX ВВЭР + РБН также используется МНПТ топливо, однако, ввиду наличия в системе ВВЭР-С и некоторой доли ВВЭР-ТОИ, полного перехода на топливо РБН не происходит. Более того, в данном сценарии особое значение имеет производство Pu в blankets, которое используется для запуска и подпитки ВВЭР-С. С учетом blankets общее производство топлива РБН достигает 1500 т TM/год в 2100 г., что в 2.5 раза больше, чем в сценарии ПН "Прорыв" (не включая производство топлива РТН).

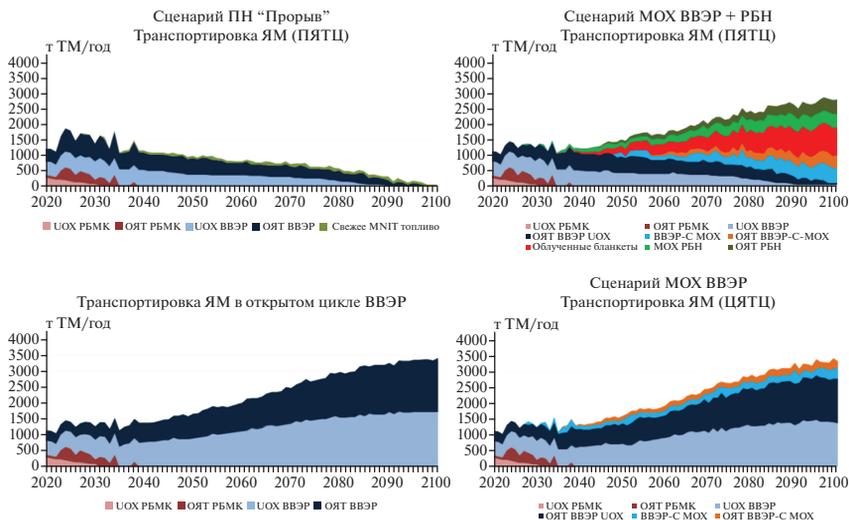


Рис. 5. Динамика транспортировки топлива.

Экономика топливообеспечения сценария МОХ ВВЭР + РБН в значительной степени зависит от стоимости производства бланкетов, МОХ-топлива ВВЭР-С и топлива РБН. В данном случае также стоит отдельно отметить, что в сценарии МОХ ВВЭР + РБН используется централизованный подход к переработке и рефабрикации топлива РБН, что позволяет снизить удельные затраты на производство более дорогого топлива MNIT. С другой стороны, из-за необходимости более длительной выдержки топлива перед транспортировкой, система должна будет произвести большее количество свежего MNIT топлива из Pu OYAT РТН, что, в свою очередь, приведет к более быстрому израсходованию доступного запаса Pu для РБН. При наступлении дефицита Pu из OYAT РТН такая ЯЭС переходит на ввод АЭС с ВВЭР-С, которые для своего топливообеспечения используют Pu из бланкетов РБН. При такой организации ввода установленной мощности в сценарии МОХ ВВЭР + РБН, начало запуска РБН на Pu из OYAT ВВЭР-С наступает только в 2065 году.

В сценарии МОХ ВВЭР возможность производства уран-плутониевого топлива для ВВЭР-С определяется запасом и темпом переработки OYAT ВВЭР. На рисунке 4 видно, что доля МОХ топлива в общем топливообеспечении сценария невелика – всего 15% от общей суммы за весь период. Экономический выигрыш в данном случае возможен в случае, если экономия урана оправдывает затраты на фабрикацию МОХ топлива ВВЭР-С и переработку OYAT.

Вышеприведенные потоки производства и переработки топлива будут оказывать характерное влияние на объемы транспортировки ЯМ. У сценария ПН "Прорыв" с пристанционным исполнением ЯТЦ для АЭС с РБН в этом отношении заметное преимущество, т.к. в данном случае для АЭС с РБН необходимо будет транспортировать лишь начальные загрузки и первые две подзагрузки MNIT (длительность внешнего топливного цикла равна 2 годам). В остальных сценариях обременение на транспортное сообщение будет усиливаться по мере роста запроса ЯЭС на топливо (рис. 5).

На рисунке 5 отдельно стоит отметить наличие большого объема транспортировки облученных бланкетов в сценарии МОХ ВВЭР + РБН, что может представлять интерес с точки зрения многокритериального анализа, в котором помимо экономических,

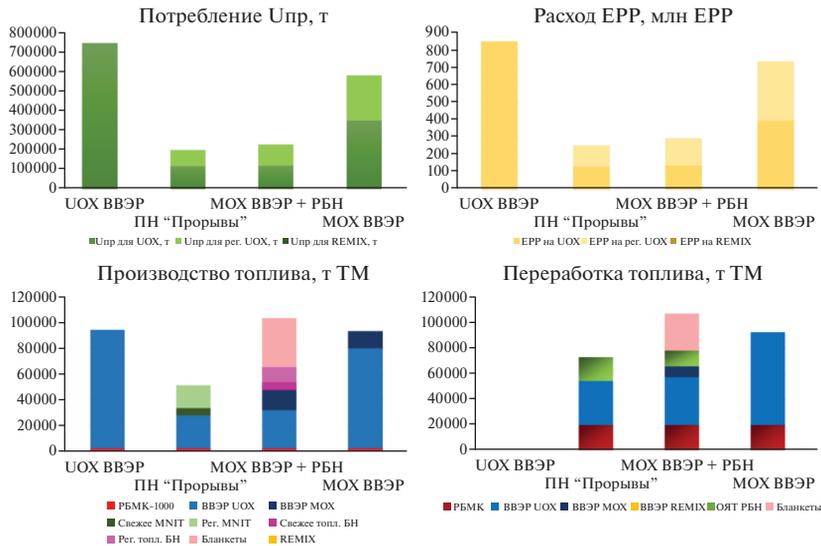


Рис. 6. Балансовые показатели сценариев (потребление природного урана, обогащение, производство и переработка топлива).

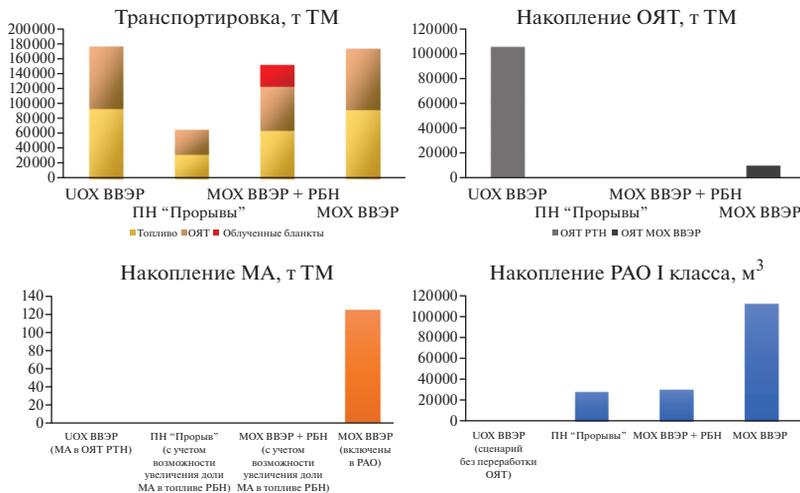


Рис. 7. Балансовые показатели сценариев (транспортировка, накопление ОЯТ, накопление РАО и МА).

ресурсных и радиоэкологических критериев оценивается потенциал нарушения режима нераспространения ядерного оружия.

В целях комплексного анализа результатов расчетов целесообразна детализация интегральных балансовых показателей рассматриваемых сценариев (рис. 6 и 7).

На рисунке 6 в части экономии природного урана очевидно преимущество двухкомпонентных ЯЭС с полным или частичным переходом на технологии РБН. В сце-

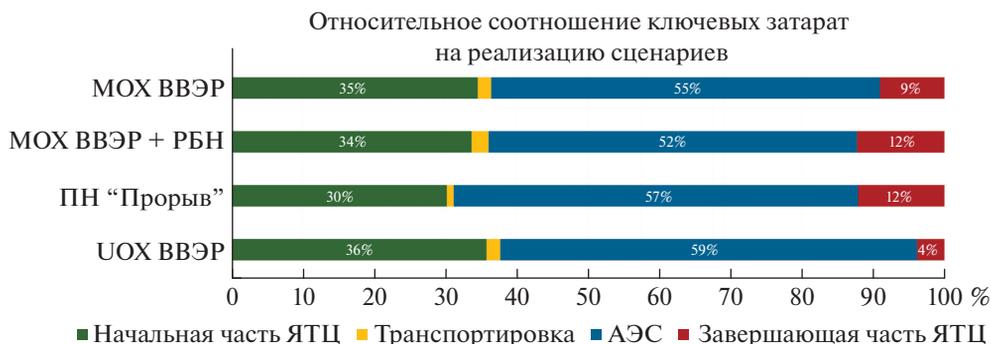


Рис. 8. Относительное соотношение ключевых затрат на реализацию сценариев.

нарии МОХ ВВЭР несмотря на частичное замыкание ЯТЦ интегральное потребление урана превысило отечественные запасы природного урана с учетом возможности извлечения, составляющие ~500 тыс. т. Отличия в балансовых характеристиках сценариев отразились на их интегральных показателях. Так, для сценария ПН "Прорыв" характерен минимальный суммарный объем производства, переработки (исключая сценарий УОХ ВВЭР) и транспортировки топлива. На рисунке 7 для каждого сценария представлены объемы РАО I класса, образуемые после переработки ОЯТ и отправляемые на окончательную изоляцию (учтены только ПД). Из-за включения МА в ВАО в сценарии МОХ ВВЭР объем РАО I класса заметно превышает альтернативные сценарии (за исключением сценария УОХ ВВЭР, где ОЯТ РТН не перерабатывается). В свою очередь, для сценариев с вводом реакторов РБН учтена теоретическая возможность увеличения концентрации МА в топливе MNIT выше 0.5% [2], что позволит полностью утилизировать МА ОЯТ РТН. При отказе от переработки ОЯТ РТН суммарное количество накопленного ОЯТ превысит 100000 т ТМ, что на 20000 т ТМ больше ОЯТ, накопленного за все время существования ядерной энергетики США.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОЛНЫХ ЗАТРАТ

Оценка экономической целесообразности альтернативных сценариев в настоящей работе проводилась путем сравнения затрат на реализацию рассматриваемых ЯЭС с учетом всех переделов ЯТЦ, за исключением операционных затрат на эксплуатацию АЭС, так как этот вид затрат незначительно отличается для выбранных объектов исследования (рис. 8). На рисунке 8 продемонстрированы межсценарные отличия с детализацией по ключевым переделам ЯТЦ. Сравнение альтернативных сценариев с полным или частичным замыканием ЯТЦ целесообразно проводить, опираясь на характеристики сценария УОХ ВВЭР, у которого самые высокие затраты на добычу природного урана, конверсию, обогащение и хранение ОЯТ. Очевидно, что если технологии ЯТЦ позволяют экономить природный уран, то интегральные затраты на добычу, конверсию и обогащение будут меньше, чем в сценарии УОХ, однако эту экономию следует сопоставить с затратами на фабрикацию и переработку топлива. Также обращает на себя внимание то обстоятельство, что наибольший вклад в полные затраты любого сценария вносит строительство АЭС.

На рисунке 9 приведено итоговое сравнение относительного соотношения полных затрат на реализацию рассматриваемых сценариев.

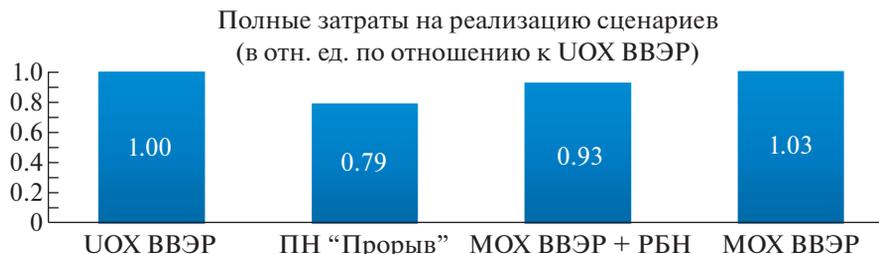


Рис. 9. Расчет полных затрат на реализацию сценариев (в отн. ед. по отношению к УОХ ВВЭР).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ интегральных характеристик показал, что:

- при выполнении сценарных условий по достижению заявленных технико-экономических показателей полные затраты на реализацию сценария ПН “Прорыв” существенно ниже альтернативных опций, рассмотренных в настоящей работе;
- затраты на реализацию сценария с частичным замыканием ЯТЦ (МОХ ВВЭР) оказались выше полных затрат на реализацию сценария на базе технологий УОХ ВВЭР; при увеличении стоимости урана этот сценарий мог бы сравняться со сценарием УОХ ВВЭР по показателю полных затрат ввиду некоторой экономии природного ресурса, однако это привело бы к еще большей потере конкурентоспособности по сравнению с двухкомпонентными сценариями ПН “Прорыв” и МОХ ВВЭР+РБН;
- перманентная двухкомпонентная ЯЭ на базе РБН и ВВЭР не предлагает каких-либо экономических преимуществ по сравнению со сценарием ПН “Прорыв”. Кроме того, предполагаемый масштаб транспортировки топлива с большим количеством Pu (в особенности в облученных бланкетах) в данном сценарии может отрицательно повлиять на общественное восприятие ЯЭ ввиду наличия рисков нарушения режима нераспространения ядерного оружия;
- неоптимальные ЯТЦ могут привести к существенному снижению конкурентоспособности всей ЯЭ по сравнению с альтернативными технологиями генерации э/э.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективы на период до 2100 г. – одобрена решением Президиума НТС ГК “Росатом” 26 декабря 2018 г.
2. Аналитический отчет. Результаты расчетных оценок гомогенного выжигания МА от переработки ОЯТ реакторов ВВЭР с РБН с ограничением содержания МА в топливе Инв. № 02.2-3 от 25.05.2020. АО “Прорыв”.

Economic Performance and Mass Balance Comparative Assessment of Innovative NFC

A. A. Kashirsky*

ITC for “PRORYV” Project, Moscow, Russia

**e-mail: kana@proryv2020.ru*

The paper summarizes the results of a comparative assessment of material and economic characteristics of innovative nuclear fuel cycles that are currently being developed in several nuclear states, including Russia. Today there is a large variety of technologies envisioned for recycling the nuclear materials contained in irradiated nuclear fuel. These technologies pro-

pose different reactor types, fuels, NFC infrastructure and waste repository scale, etc. Some approaches toward closing the NFC envision a gradual transition towards NPPs with fast reactors, capable of providing electricity as well as burning minor actinides and reducing the quantity and radiotoxicity of nuclear waste. Other cycles presume that thermal LWR will continue to be the backbone of the nuclear fleet and will themselves use fuel comprised of Pu reprocessed from spent fuel or produced in FR blankets. The main goal of the study was to highlight the key differences between several promising nuclear fuel cycles that are being considered in Russia for deployment in the context of a large-scale nuclear energy system. Issues regarding economics, resource availability and waste management are taken into account. The findings of this study could be used as a basis for developing a national nuclear development strategy or understanding the advantages and disadvantages of innovative nuclear fuel cycles.

Keywords: Nuclear Power, energy strategy, NFC, NFC modeling, CNFC, closed NFC