

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

© 2021 г. Е. О. Адамов<sup>a,b,\*</sup>, В. Г. Асмолов<sup>a,\*\*</sup>, Л. А. Большов<sup>c,\*\*\*</sup>, В. К. Иванов<sup>a,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”, Москва, Россия

<sup>b</sup>Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалея, Москва, Россия

<sup>c</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

\*E-mail: aeo@proryv2020.ru

\*\*E-mail: VIGAsmolov@rosatom.ru

\*\*\*E-mail: bolshov@ibrae.ac.ru

\*\*\*\*E-mail: ivk@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 14.01.2021 г.

После доработки 19.01.2021 г.

Принята к публикации 18.02.2021 г.

В статье, подготовленной по материалам доклада на Общем собрании членов РАН 8 декабря 2020 г., анализируются перспективы и проблемы развития современной ядерной энергетики, а также пути их решения. В конце 2018 г. президиум Научно-технического совета Госкорпорации “Росатом” одобрил Стратегию развития ядерной энергетики, предусматривающую к концу столетия выход на мощность АЭС в диапазоне 70–90 ГВт. Стратегия предполагает, что к середине века ядерная энергетика станет двухкомпонентной: наряду с технологиями существующей ядерной энергетики, пока использующей открытый ядерный топливный цикл и реакторы на тепловых нейтронах, будет выстраиваться новая ветвь ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах при замкнутом ядерном топливном цикле. Её развитие позволит сократить накопление отработанного ядерного топлива, снизить объёмы радиоактивных отходов, повысить эффективность использования уранового сырья, экологические показатели и сохранить конкурентоспособность ядерной энергетики по сравнению с другими генерациями.

*Ключевые слова:* ядерная энергетика, Стратегия развития ядерной энергетики, быстрые реакторы, двухкомпонентная ядерная энергетика, конкурентоспособность, безопасность, радиационная эквивалентность.

DOI: 10.31857/S0869587321050029

Возможность создания ядерной энергетики была подготовлена академическими работами конца XIX и первой половины XX в., в том числе отечественных учёных Г.А. Гамова, Я.Б. Зельдовича, Д.Д. Иваненко, И.В. Курчатова, К.А. Петрика, Г.Н. Флёрова, Я.И. Френкеля и Ю.Б. Харитона. Однако именно перспектива создания ядер-

ного оружия ускорила разработку ядерных реакторов. Первые реакторы в США (Chicago Pile-1, CP-1), где в 1942 г. впервые была получена управляемая цепная реакция, и его аналог Ф-1 (1946) на площадке Лаборатории № 2 АН СССР (ныне – НИЦ “Курчатовский институт”) спешно строились для проверки реализуемости ядерных реакторов и получения лабораторных количеств плутония, не существующего в природных условиях. Их опыт был использован для создания промышленных реакторов “В” в Хэнфорде (США) и “А” на комбинате “Маяк” в городе Озёрске Челябинской области, которые решали задачи наработки оружейных изотопов (Pu). Развёрнутые в рамках АН СССР в 1930–1940-х годах работы по изучению ядерного ядра, а в 1942 г. по исследованию возможности создания урановой

АДАМОВ Евгений Олегович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель проектного направления “Прорыв” ГК “Росатом” и АО “НИКИЭТ”. АСМОЛОВ Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор, советник генерального директора ГК “Росатом”. БОЛЬШОВ Леонид Александрович – академик РАН, научный руководитель ИБРАЭ РАН. ИВАНОВ Виктор Константинович – член-корреспондент РАН, главный радиоэколог проектного направления “Прорыв” ГК “Росатом”.

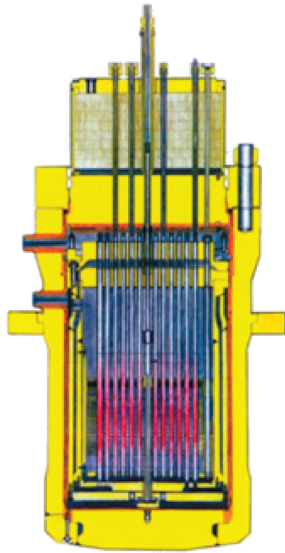


Рис. 1. Первый корпусной реактор ВМ-А

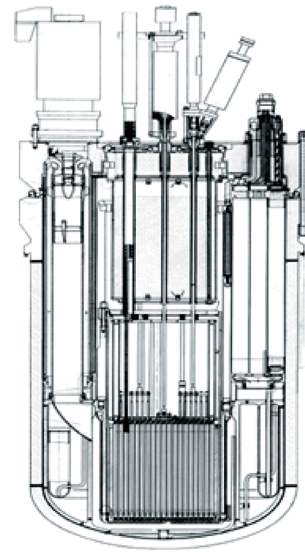


Рис. 2. Конструкция моноблочной установки МБУ-40

бомбы или уранового топлива (Постановление ГКО № 2352сс) были резко активизированы в августе 1945 г., после взрыва первых американских бомб в Хиросиме и Нагасаки, созданием Специального комитета при Государственном комитете обороны СССР. Но уже в октябре 1945 г. П.Л. Капица направляет в Первое главное управление при СНК СССР (предшественник Минсредмаша и нынешнего “Росатома”) записку “О применении внутриатомной энергии в мирных целях”. И.В. Курчатов подтвердил возможность использования конструкции созданного с целью наработки плутония реактора “А” для производства тепловой и электроэнергии. Постановление Правительства страны о строительстве в СССР первой атомной электростанции было принято в мае 1949 г., то есть за несколько месяцев до успешного испытания в Советском Союзе первого ядерного заряда.

Разработанная Н.А. Доллежалем, с использованием данных советской разведки, конструкция уран-графитового водоохлаждаемого реактора, принципиальная схема которого отличалась от американской, легла в основу одной из двух ветвей развития ядерной энергетики в СССР. Первая АЭС в Обнинске (1954), Сибирская АЭС (1958) на Сибирском химическом комбинате рядом с Томском положили начало каналному направлению реакторостроения в нашей стране, продолженному затем серией АЭС с РБМК (реактор большой мощности каналный).

Вторая ветвь ядерной энергетики – корпусные водо-водяные реакторы – появилась также благодаря оборонной тематике. Первый корпусной реактор ВМ-А (рис. 1) был спроектирован Н.А. Доллежалем для атомной подводной лодки, вошедшей

в строй в 1958 г. Развитие этого направления в рамках ВМФ сопровождалось переходом от петлевых конструкций реакторных установок к блочным со снижением их массы, габаритов и стоимости. Но настоящим прорывом стало предложение Н.А. Доллежала по конструкции моноблочной установки МБУ-40 (рис. 2), намного превосходившей перспективные решения в ядерной энергетике. Реализованные для оборонных задач реакторные установки интегрального типа стали прообразом многих разрабатываемых сегодня в мире реакторов, например, БН-1200 (рис. 3).

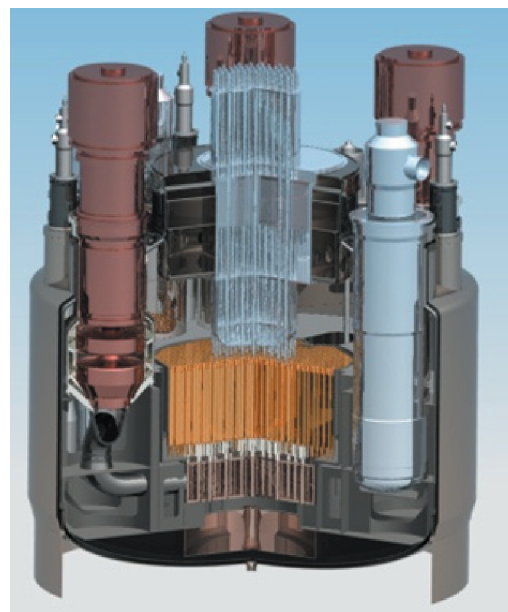


Рис. 3. Реакторная установка БН-1200

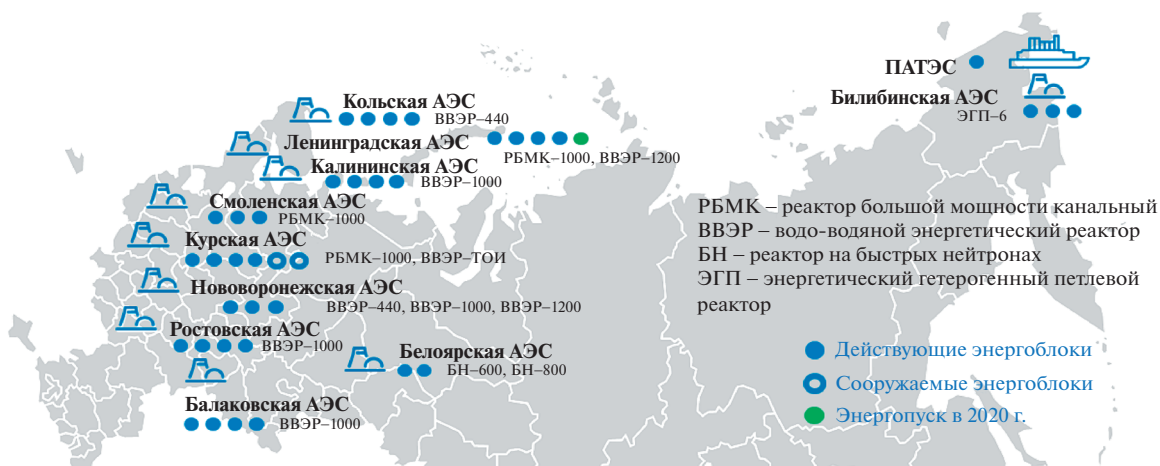


Рис. 4. Карта расположения действующих и строящихся энергоблоков АЭС России

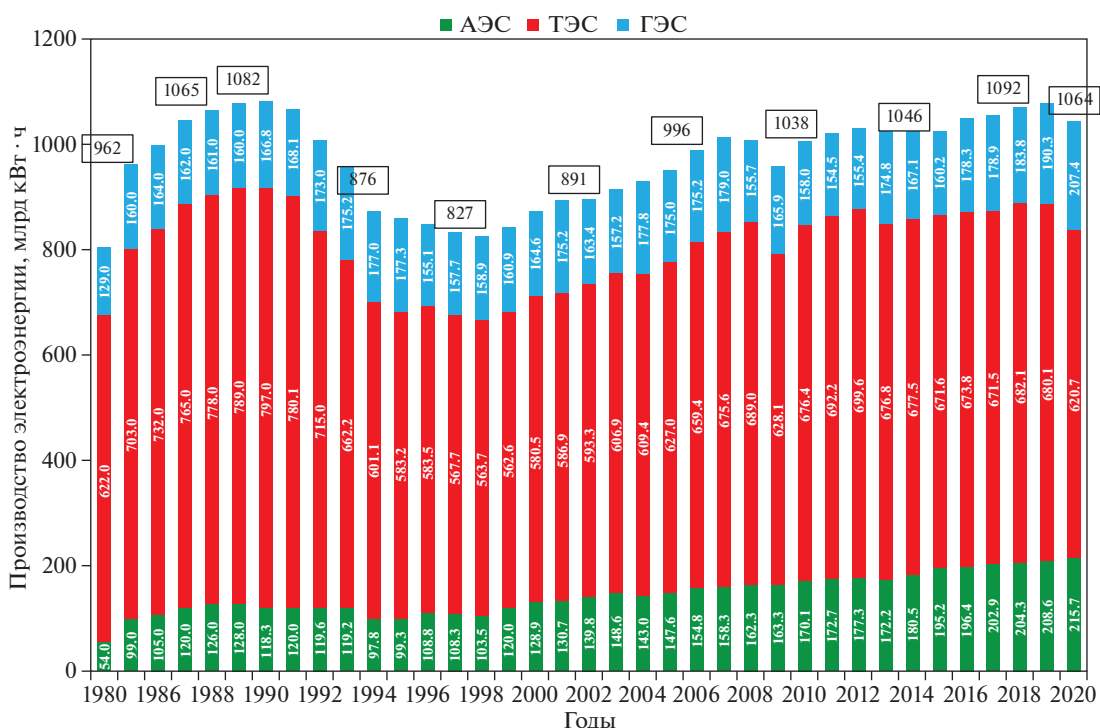
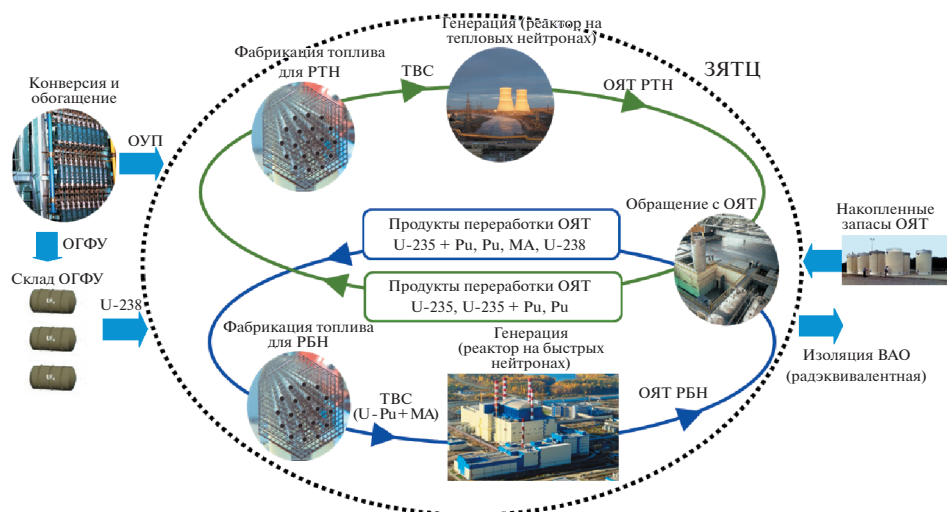


Рис. 5. Производство электроэнергии в Российской Федерации по типам электростанций (1985–2020 гг.)

Действующие и строящиеся в России энергоблоки представлены на рисунке 4. Современная ядерная энергетика РФ – это 12.0% установленной мощности генерирующих электроэнергию станций и более 20% производимой (в 2020 г.) электроэнергии. Следует обратить внимание и на динамику развития ядерной энергетики в нашей стране (рис. 5), где общее электропроизводство в течение вот уже 30 лет застыло на отметке 1000–1100 млрд кВт · ч. В 2000 г., когда этот уровень составил менее 900 млрд кВт · ч,

русская ядерная энергетика вышла на показатель 128.9 млрд кВт · ч, превысив уровень 1989 г., который долгое время оставался рекордным – 128 млрд кВт · ч. Государственная ядерная энергетика стала первой в России отраслью, восстановившей потенциал после сокрушительного падения всех показателей экономики в 1990-е годы. Для нефтяной промышленности, производства металлов и других отраслей, попавших в частные руки, на это потребовалось ещё 5–10 лет. В условиях стагнации экономики, обусловившей отсут-



**Рис. 6.** Двухкомпонентная атомная энергетика (система реакторы на быстрых нейтронах и реакторы на тепловых нейтронах)

стве потребностей в развитии производства электроэнергии, ядерная энергетика увеличила в 2020 г. производство электроэнергии до 215.7 млрд кВт · ч. Электрогенерация АЭС в Европейской части страны достигает почти 40%.

Продукция отрасли – ключевая часть высокотехнологичного экспорта: 10-летний портфель зарубежных заказов Госкорпорации “Росатом” превышает 130 млрд долл., в то время как, например, аналогичный портфель по экспорту вооружения составляет примерно 50 млрд долл. Лидирующие позиции РФ достигнуты в жёсткой конкуренции с США, Францией, Японией и Канадой. В то же время на мировые рынки активно выдвигаются новые игроки из Китая, Южной Кореи, предлагающие аналогичные продукты по более низкой цене, сопровождая свои предложения дешёвыми кредитами. В этих условиях удержание мирового лидерства невозможно без развития новых технологий, решения системных проблем ядерной энергетике, к которым относятся:

- тяжёлые аварии – отказ ФРГ, Швейцарии, Бельгии и, возможно, Южной Кореи от ядерной энергетике;
- низкая эффективность использования добываемого природного уранового сырья – 0.7% (содержание <sup>235</sup>U);
- отложенная проблема отработанного ядерного топлива (ОЯТ) – накопление и отсутствие экологически приемлемого обращения с долгоживущими высокоактивными отходами, младшими актиноидами и др.;
- риск переключения делящихся материалов, обращающихся в ядерном топливном цикле, на военные или террористические цели;
- опасность утраты конкурентоспособности.

Развитию новой технологической платформы ядерной энергетике положила начало федеральная целевая программа, принятая Правительством РФ в 2010 г., в рамках которой в 2013 г. было образовано проектное направление “Прорыв” [1]. Цель работ – выстраивание, наряду с технологиями существующей ядерной энергетике, пока использующей открытый ядерный топливный цикл и реакторы на тепловых нейтронах, новой ветви ядерной энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах при замкнутом ядерном топливном цикле (рис. 6). Двухкомпонентную ядерную энергетике мы рассматриваем как основную ядерную технологию в нынешнем столетии. Её развитие позволит сократить накопление отработанного ядерного топлива, снизить объёмы радиоактивных отходов, повысить эффективность использования уранового сырья, экологические показатели и сохранить конкурентоспособность ядерной энергетике по сравнению с другими генерациями [2].

Для основной из используемых сейчас технологий водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) предусматриваются два этапа развития. Первый – ВВЭР-С со спектральным регулированием и управлением за счёт изменения водно-уранового соотношения при использовании вытеснителей по ходу топливной кампании. Такие реакторы позволяют повысить коэффициент воспроизводства Pu до 0.7, снизить примерно на 30% потребление природного урана, полностью загрузить активную зону смешанным уран-плутониевым топливом, а за счёт исключения спецкорпуса, необходимого при борном регулировании, и некоторых технологических систем, снизить капитальные затраты на 10–15%. Исключение Zr как материала оболочек тепловы-

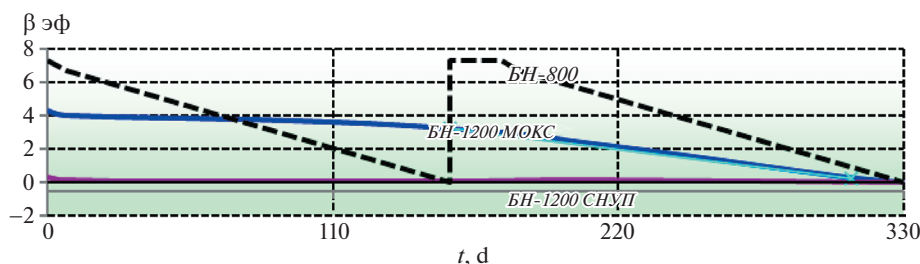


Рис. 7. Ход реактивности за кампанию в реакторной установке БН-1200 при использовании окисного (МОХ) и нитридного (СМУП) топлива

деляющих элементов снимает проблему водородных взрывов, имевших место на реакторах АЭС “Фукусима-1”.

На втором этапе – ВВЭР-СКД (реактор сверхкритического давления) – предусматривается переход к быстрому спектру нейтронов и достижение, как и у всех таких реакторов, самообеспечения топливом (КВ  $\sim 1$  вместо 0.3–0.5). Теплотехнические параметры, в том числе КПД  $\sim 46\%$  вместо 36% в АЭС-2006, выравниваются с характеристиками современной тепловой энергетики. Внедрение рассматриваемых улучшений технологии ВВЭР связано с решением проблем материаловедения.

Перспективы реакторов на быстрых нейтронах и предполагаемых их преимуществ в плане безопасности связаны с уже упоминавшимися конструкциями интегральных реакторов, в корпусе которых сосредоточены все элементы первого контура, парогенераторы и системы аварийного отвода тепла. Благодаря предложенной ещё Н.А. Доллежалем конструктивной схеме исключаются потери теплоносителя и теплоотвода от активной зоны, что детерминистически устраняет вероятность тяжёлых аварий, таких как на АЭС “Три-Майл-Айленд” (США, 1979) и “Фукусима-1” (Япония, 2011). Для исключения вероятности реактивной аварии, имевшей место на Чернобыльской АЭС в 1986 г., предлагается использовать равновесное топливо, что позволяет избежать избыточного запаса реактивности в реакторной установке, а следовательно, детерминистически исключить и такую аварию. В равновесном топливе выравнивается сжигание одних изотопов (U или Pu) и наработка плутония, что позволяет рассчитывать на прохождение любых теоретически возможных аварий без необходимости эвакуации и тем более отселения проживающего рядом со станцией населения, а также вывода из хозяйственного оборота больших земельных территорий и, следовательно, без крупного экономического ущерба [3].

Таким топливом может стать смешанное нитридное уран-плутониевое топливо (СМУП),

первенство в разработке технологии и обосновании работоспособности которого при реакторных испытаниях (до 9% выгорания тяжёлых атомов) принадлежит России. На рисунке 7 показан ход реактивности за кампанию в реакторной установке БН-1200 при использовании окисного (МОХ) и СМУП-топлива. Очевидно преимущество более плотного и теплопроводного СМУП-топлива [4].

Замыкание ядерного топливного цикла позволяет за счёт трансмутации наиболее долгоживущих изотопов реализовать так называемое радиационно-равновесное обращение с РАО, при котором через 300–500 лет, в зависимости от степени очистки от младших актиноидов, достигается радиационное равновесие добываемого уранового сырья и захораниваемых отходов. При всех обсуждаемых специалистами деталях такого подхода, очевидно, что довод о сохранении радиационного баланса Земли неизменным может оказаться решающим для общественного признания ядерной энергетики ключевой среди других “зелёных” генераций [5].

Россия выиграла соревнование с Францией в последовательном развитии линии реакторов на быстрых нейтронах (РБН): от БР-5 в 1959 г. до БН-800 в 2015 г., последовательно наращивая мощности и осваивая физику РБН и технологии натриевого теплоносителя. Благодаря этим работам РФ остаётся лидером тематики РБН в мире, которой сейчас активно занимаются Китай и Индия.

Сохраняя лучшие достижения РБН с натриевым теплоносителем и окисным топливом, Россия перехватывает лидерство у американской электротехнической компании “Westinghouse”, по проектам или лицензиям которой создана большая часть АЭС в мире. В 2015 г. “Westinghouse” объявила, что следующим поколением реакторных установок будут РБН, причём не с металлическим топливом, которое многие годы в США рассматривалось как перспективное для реакторов на быстрых нейтронах, а со СМУП-топливом, а также со свинцовым теплоносителем. За

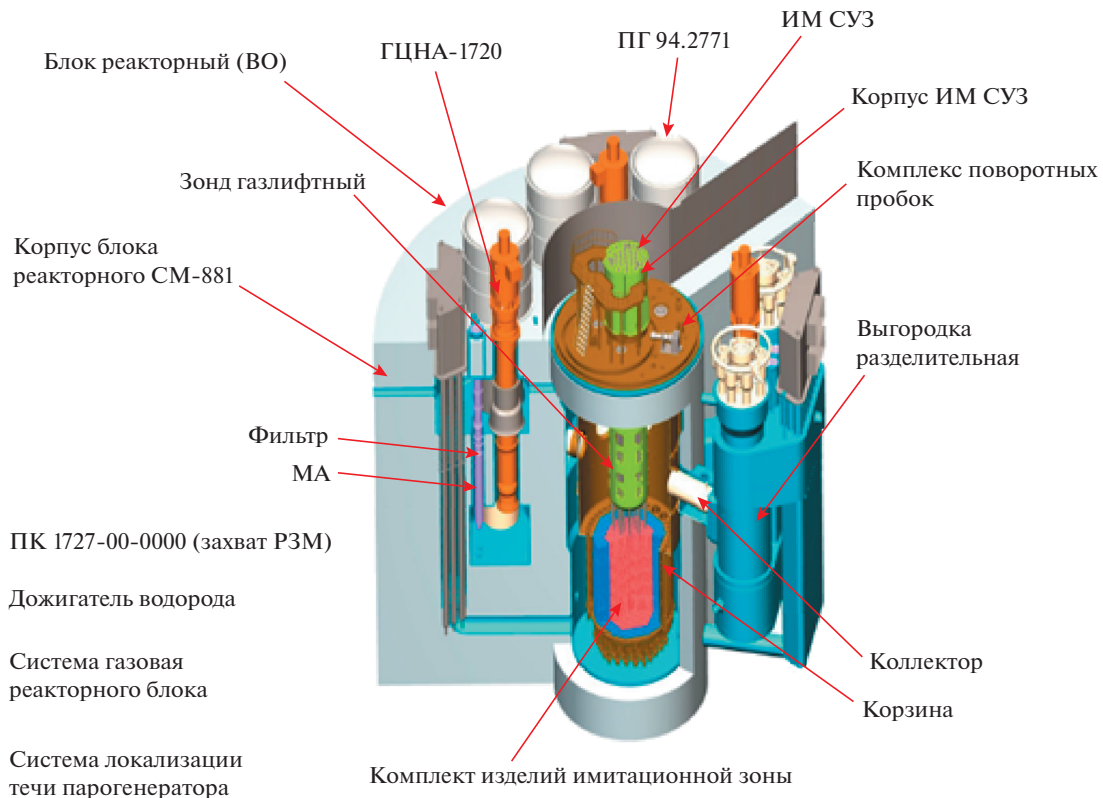


Рис. 8. Реакторная установка БРЕСТ-ОД-300

исключением металло-бетонного корпуса, на который наши конкуренты не решились, это те же конструктивные подходы, что и в отечественной разработке реакторной установки БРЕСТ (рис. 8), что позволяет говорить о перехвате первенства у американцев в развитии новой технологической платформы ядерной энергетики. Опытно-демонстрационный комплекс, включающий топливное производство, энергоблок БРЕСТ и модуль переработки ОЯТ, соответствующий подходам новой технологической платформы, сооружается на площадке Сибирского химического комбината: от первой Сибирской АЭС до перспективной АЭС с пристанционным замкнутым ядерным топливным циклом (ЗЯТЦ).

Экономика ядерной энергетики всегда отличалась высокой капиталоемкостью, однако выигрывала в стоимости производимых электричества и тепла, поскольку, в отличие от органической генерации, её топливная составляющая кратно ниже. Проектные изменения, обусловленные требованиями безопасности после тяжёлых аварий, поставили ядерную энергетику на грань конкурентоспособности. Новые проекты АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами могут сохранить конкурентоспособность с основными пока конкурентами (парогазовыми установками) при условии, что цена денег не будет слишком высо-

кой. Так, при нулевой ставке дисконтирования, LCOE<sup>1</sup> АЭС любого типа отличаются высокой конкурентоспособностью (рис. 9), и она сохраняется при ставке дисконтирования около 5%. Для всех капиталоемких объектов в мире большие требования к стоимости денег не предъявляются, и понятно, что государство выигрывает, предоставляя для строительства АЭС в РФ или за рубежом деньги бюджетные или из Фонда национального благосостояния России, по сравнению с размещением их в американские или европейские государственные ценные бумаги [6].

При разработке объектов ядерной энергетики и ядерного топливного цикла активно используются методы компьютерного расчёта и моделирования. Первоначальную базу таких расчётов в основном составили программы, разрабатывавшиеся в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша АН СССР и Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского под руководством академика Г.И. Марчука, в то время как сейчас лидером таких разработок стал Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН под руководством академика РАН Л.А. Большова,

<sup>1</sup> LCOE (Levelised Cost of Energy) – средняя расчётная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции, включая все возможные инвестиции, затраты и доходы.

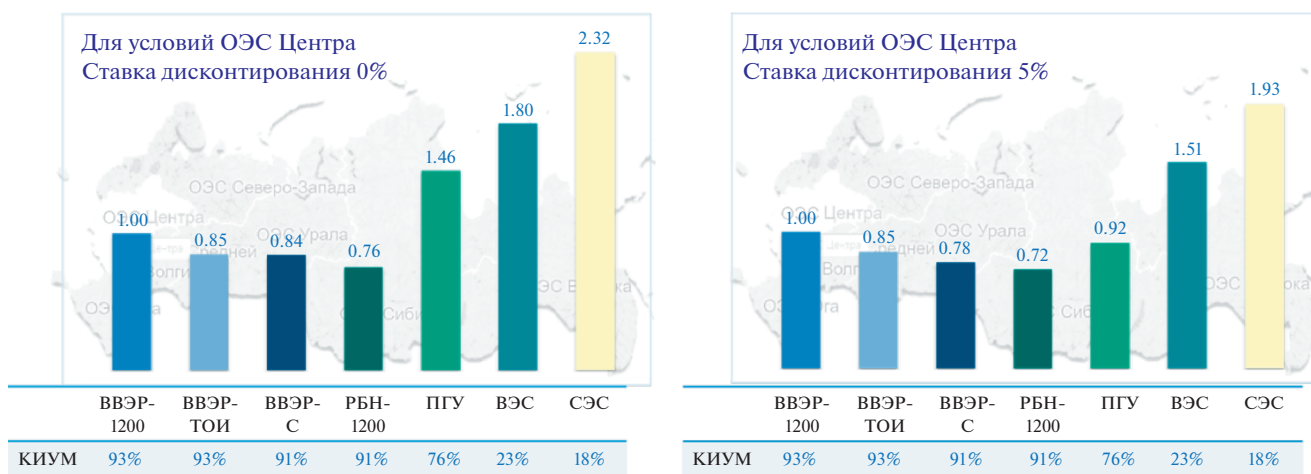


Рис. 9. Потенциал обеспечения конкурентоспособности двухкомпонентной ядерной энергетики – LCOE энерготехнологий, отн. ед.

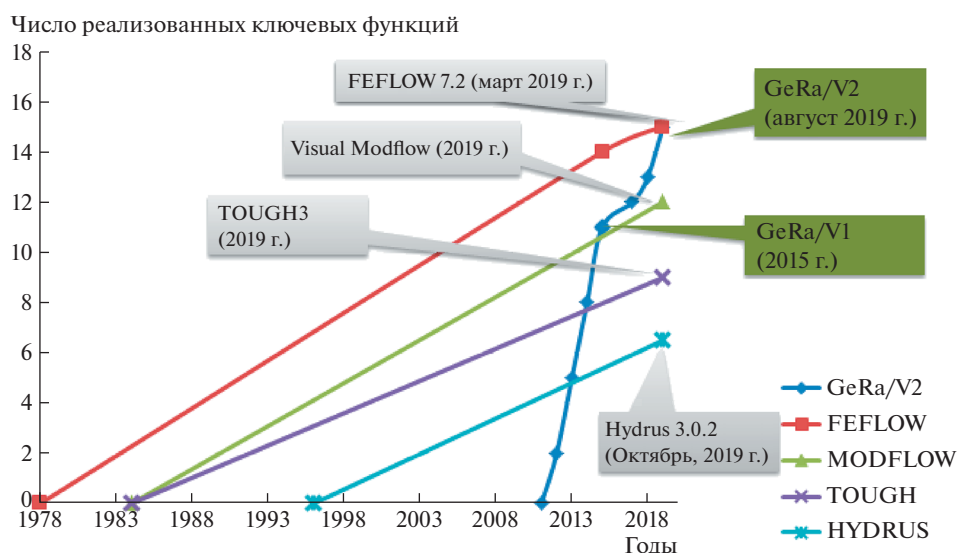


Рис. 10. Темпы разработки кода GeRa в сравнении с зарубежными аналогами

объединяющий результаты как своих специалистов, так и других институтов РАН, “Росатома” и университетов. Первоначально все программы предусматривались исключительно для реакторных установок, между тем в последние годы созданы коды для решения задач ядерного топливного цикла. Сравнение кодов (рис. 10) показывает, как большую точность отечественных разработок, так и существенно меньшее время на создание импортозамещающих кодов. Российский код “Нострадамус” продемонстрировал великолепные результаты при прогнозировании переноса в атмосфере радиоактивности от фукусимской площадки при аварии на японской АЭС в 2011 г. до Восточно-Европейской части РФ [7].

Цифровизация, о которой сейчас так много говорят, внедрялась в разработки ядерных объектов с 1950-х годов: от использования клавишных вычислительных машин до современных мощных вычислителей. Весь путь от НИОКР и до вывода объектов ядерной энергетики из эксплуатации сопровождается созданием цифровых двойников и моделированием их работы в условиях нормальных штатных режимов и отклонений от них, вплоть до постулирования тяжёлых аварий.

Уникальным достижением академической науки стало дополнение к обоснованию радиационно-эквивалентного обращения с РАО, о котором шла речь выше. Под руководством члена-корреспондента РАН В.К. Иванова показано, что онкологическое равновесие, то есть риск

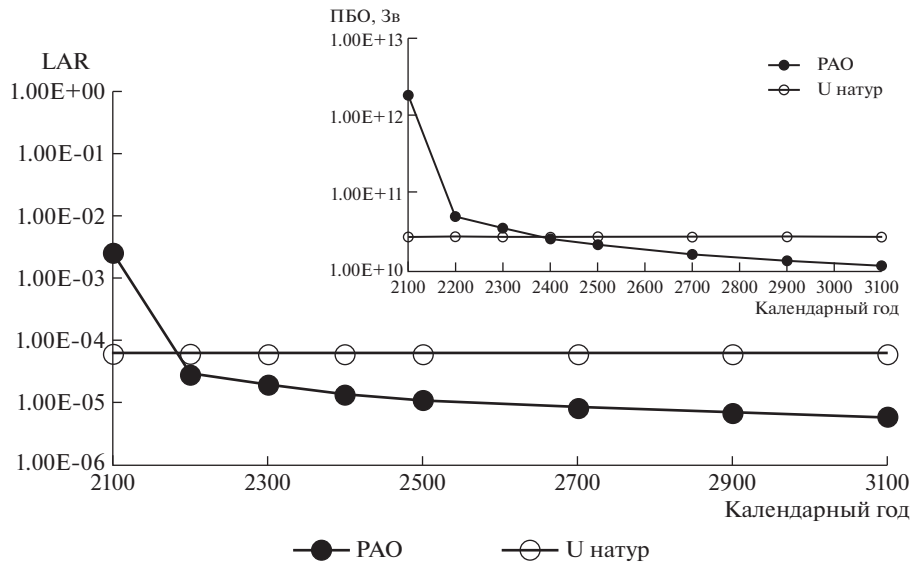


Рис. 11. Радиологическая эквивалентность по канцерогенному риску достигается через 100 лет выдержки

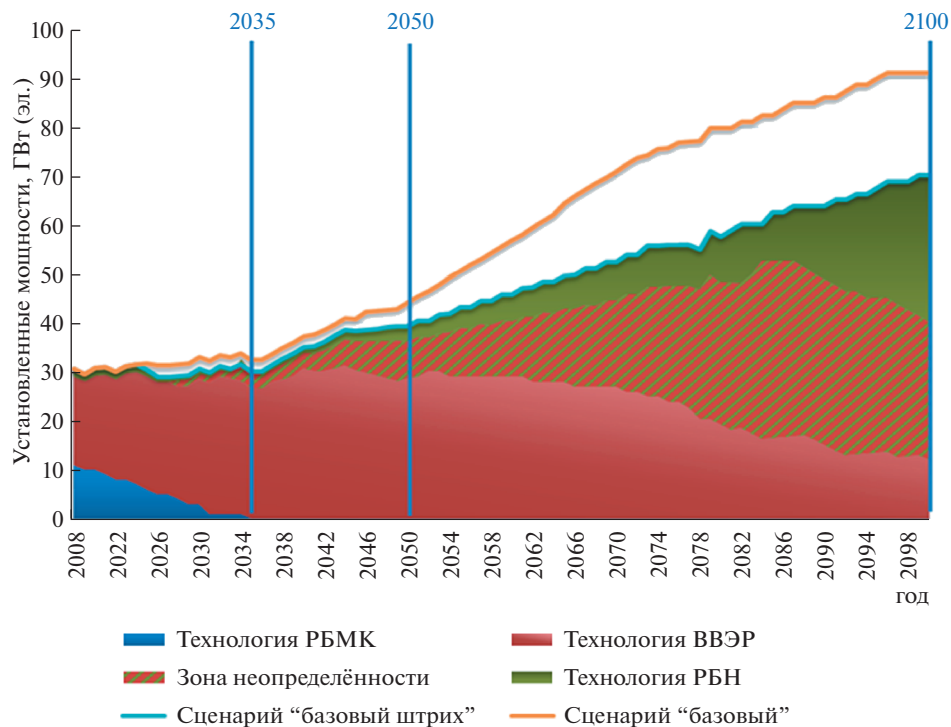


Рис. 12. Варианты сценариев развития ядерной энергетики

онкологических заболеваний от радиоактивных отходов и уранового сырья, при замкнутом ядерном топливном цикле достигается ещё быстрее, примерно через 100 лет (рис. 11) [8].

В конце 2018 г. президиум НТС Госкорпорации «Росатом» одобрил Стратегию развития ядерной энергетики, предусматривающую к концу столетия выход на мощность АЭС в диапазоне

70–90 ГВт (рис. 12). Зона неопределённости связана с тем, что не все теоремы преимущества РБН в настоящее время доказаны и, возможно, при задержке с этим, основную нагрузку придётся взять на себя реакторным установкам на тепловых нейтронах с теми усовершенствованиями, о которых речь шла выше. В любом случае уже сейчас очевидно, что ядерная энергетика, свободная от пе-



речисленных ранее проблем, может стать базовым элементом экологически чистой энергетики, основным элементом “зелёного квадрата”, другими сторонами которого являются гидроэнергетика, энергетика ветра и солнца [9].

Мы рассчитываем, что, как и в предыдущие годы, развитие ядерной энергетики будет идти в тесном взаимодействии Госкорпорации “Росатом”, РАН и НИЦ “Курчатовский институт”.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Адамов Е.О.* “Proryv” project – technological base-ment for large-scale nuclear energy. IAEA International conference on “Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development” (FR17). 26–29 June 2017. Book of Abstracts. Ekaterinburg: State Atomic Energy Agency Corporation “Rosatom”, 2017.
2. *Адамов Е.О., Рачков В.И., Толстоухов Д.А., Паннов С.А.* Сравнение технико-экономических показателей различных вариантов реализации ЯТЦ реакторов АЭС // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 2. С. 3–12.
3. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / Под ред. Е.О. Адамова. М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001.
4. *Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И. и др.* Сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования металлического и нитридного смешанного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 3–15.
5. *Адамов Е.О., Власкин Г.Н., Лопаткин А.В. и др.* Радиационно-эквивалентное обращение радиоактивных нуклидов в ЯТЦ – эффективная альтернатива отложенному решению проблемы накопления ОЯТ // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 6. С. 15–25.
6. *Адамов Е.О., Каширский А.А., Муравьев Е.В., Толстоухов Д.А.* Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетики при переходе к замыканию ядерного топливного цикла // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 14–32.
7. *Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Мелихова Е.М., Панченко С.В.* Уроки Чернобыля и Фукусимы: актуальные проблемы совершенствования системы защиты населения и территорий при авариях на АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. № 3. С. 36–51.
8. *Иванов В.К., Чекин С.Ю., Адамов Е.О. и др.* Атомная энергетика нового поколения: радиологическая состоятельность и экологические преимущества / Под общей редакцией В.К. Иванова, Е.О. Адамова. М.: Издательство “Перо”, 2019.
9. *Адамов Е.О., Лопаткин А.В., Муравьев Е.В. и др.* Национальная стратегия развития ядерной энергетики: два подхода к новой технологической платформе ядерной энергетики // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 1. С. 3–14.