

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИЙСКОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Анатолий Дьяков

АННОТАЦИЯ

Россия в своей долгосрочной стратегии увеличения производства электроэнергии отдала приоритет атомной энергетике. Но устойчивое развитие этой стратегии в течение длительного периода зависит от способности решения проблем, связанных с выработкой возрастающего количества отработавшего ядерного топлива. Росатом¹, российская корпорация по атомной энергии, полагает, что решением проблемы является разработка реакторов-размножителей плутония на быстрых нейтронах и технологий их топливных циклов. Данная статья представляет обзор текущих правительственных программ, связанных с разработкой атомной энергетике и обращением с отработавшим топливом в России.

Автор статьи работает в Центре по изучению проблем контроля над вооружениями, энергетике и экологии, г. Долгопрудный, Московская область, Россия.

Почтовый адрес для корреспонденций: Anatoli Diakov, Researcher, Center for Arms Control, Energy and Environmental Studies, 3 Zhukovskogo Street, #301, Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia.

Адрес электронной почты: diakov@armscontrol.ru

Статья получена 7 марта 2013 года и принята к публикации 6 мая 2013 года.

ВВЕДЕНИЕ

Россия занимает четвертое место в мире по суммарной мощности атомных электростанций и является важным игроком среди тех стран, которые продолжают развивать новые ядерные технологии. В ближайшем будущем (2025 – 2030 годы) предпочтительной технологией останутся легководные реакторы (ВВЭР). В дальней перспективе в атомной промышленности России считают, что ограниченные поставки урана и увеличивающиеся запасы отработавшего топлива потребуют разработки замкнутого топливного цикла, базирующегося на реакторах-размножителях плутония на быстрых нейтронах. Для того, чтобы достичь этой цели, Росатом инициировал несколько федеральных целевых программ (ФЦП), направленных на увеличение мощности российских ВВЭР и на разработку реакторов-размножителей и технологий для их топливных циклов². Недавно принятая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года» (Программа 2010) направлена на разработку и демонстрацию ряда прототипов реакторов на быстрых нейтронах с замкнутыми топливными циклами. Но нацеленность на исследования и разработки наводит на мысль о продолжающейся неопределенности в выборе пути развития.

СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ

Россия является крупным производителем и экспортером нефти и природного газа. Официальные данные о российских запасах нефти засекречены, но, согласно опубликованным оценкам, Россия занимает седьмое место в мире по доказанным запасам, оцениваемым от 8 до 10 миллиардов тонн³. В последние годы добыча сырой нефти составляла от 480 до 495 миллионов тонн в год. Однако, нефтяные резервы России разработаны более, чем на 50%, и ее крупные месторождения сейчас оскудевают. Доля вторичной выработки непрерывно возрастает, и у крупных нефтяных компаний она достигает 30 – 65%. Размеры новых нефтяных месторождений либо малые, либо средние, и большую часть нефти извлекать довольно сложно. При текущих уровнях добычи имеющиеся запасы нефти будут выработаны примерно за 20 лет.

Запасы природного газа в России – самые большие в мире, и на нее приходится примерно 20% от общемирового производства. На начало 2008 года российские запасы коммерческого природного газа равнялись 48

триллионов кубометров, а общие запасы оценивались в 164,2 триллиона кубометров⁴. Однако, недавно открытые месторождения становятся все более сложными и вскрывать их все более трудно. Проблемы, относящиеся к их эксплуатации, включают неблагоприятные климатические условия и удаленность от сложившихся центров газовой индустрии и инфраструктуры.

Запасы угля в России значительны, и они оцениваются более, чем четыре триллиона тонн. В начале 2008 года ее доказанные запасы считались вторыми в мире и равнялись 272 миллиардов тонн, или 19% от мировых запасов. Россия занимает пятое место в мире по добыче угля с 5% от общемирового производства. Текущее и прогнозируемое производство углеводородного топлива России представлено в таблице 1.

Таблица 1. Российское производство углеводородного топлива в 2009 году (реальное) и в 2020 году (оценка)⁴.

| | 2009 | 2020 |
|---------------------------------------|------|------|
| Нефть (миллионов тонн) | 488 | 476 |
| Природный газ (миллиардов кубометров) | 664 | 638 |
| Уголь (миллионов тонн) | 326 | 300 |

Согласно документу «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» энергетический экспорт будет критичным для экономики России, но ожидается, что его важность будет уменьшаться. Таблица 2 показывает, что экспорт угля и нефти уже вышел на плато, и ожидается, что экспорт природного газа выйдет на плато к 2030 году⁵.

Таблица 2. Реальные (2008 год) и прогнозируемые объемы будущего экспорта российского углеводородного топлива до 2030 года.

| | 2008 | 2015 | 2020 | 2030 |
|---------------------------------------|------|---------|---------|---------|
| Нефть (миллионов тонн) | 43 | 243–244 | 240–252 | 222–248 |
| Природный газ (миллиардов кубометров) | 241 | 270–294 | 332–341 | 349–368 |
| Уголь (миллионов тонн) | 70 | 72–74 | 74–75 | 69–74 |
| Электроэнергия (миллиардов кВт·час) | 17 | 18–25 | 35 | 45–60 |

В документе «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» прогнозируется:

- Некоторое уменьшение доли природного газа вв внутреннем потреблении энергии с 52% в 2005 году до приблизительно 47% в 2030 году.
- Рост доли источников энергии от не ископаемого топлива с 11% до 13–14%.
- Существенное уменьшение (в 2,1–2,3 раза) улучшения энергетической эффективности и сектора производства энергии.

Электроэнергия

Производство электроэнергии в 2011 году в России составило 1040,4 миллиарда киловатт-часов. Рост внутреннего спроса на электроэнергию и экспорта, прогнозируемого в документе «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» представлен в таблице 3.

Таблица 3. Спрос на электроэнергию в России (в миллиардах киловатт-часов)⁴.

| | 2015 | 2020 | 2030 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Внутреннее потребление | 1041–1218 | 1315–1518 | 1740–2164 |
| Экспорт | 18–25 | 75 | 45–60 |
| Всего | 1059–1243 | 1390–1593 | 1785–2224 |

Двумя главными проблемами в удовлетворении внутреннего спроса России на электроэнергию являются:

- Ухудшение состояния существующей инфраструктуры (включая комплекс производства электроэнергии).
- Сильная зависимость от природного газа, доля которого в поставке топлива для тепловых электростанций (то есть, не включающих гидроэлектростанции) примерно равна 70%.

По этой причине энергетическая стратегия России стремится к сокращению зависимости производства

электроэнергии от природного газа. Реальные значения (на 2008 год) и оценки будущей доли ископаемого топлива для сжигающих топливо электростанций представлены в таблице 4.

Таблица 4. Реальные значения (на 2008 год) и оценки до 2030 года доли природного газа и угля (в процентах) для сжигающих топливо электростанций. Остаточная доля приходится на нефть, торф и древесину⁴.

| | 2008 | 2015 | 2020 | 2030 |
|---------------|------|-------|-------|-------|
| Природный газ | 70,3 | 70–71 | 65–66 | 60–62 |
| Уголь | 26 | 25–26 | 29–30 | 34–36 |

Уменьшение доли газа на сжигающих топливо электростанциях должно будет компенсироваться увеличением доли угля, а также ростом производства электроэнергии на атомных электростанциях и гидроэлектростанциях. В целом к 2030 году доля производства электроэнергии без сжигания ископаемого топлива должна будет увеличиться с примерно 32% до по крайней мере 38% (таблица 5).

Таблица 5. Реальные значения (на 2008 год) и оценки до 2030 года доли производства энергии (в процентах) без сжигания ископаемого топлива⁴.

| 2008 | 2015 | 2020 | 2030 |
|------|------|------|------|
| 32,5 | 34 | 35 | 38 |

Рост производства электроэнергии будет сопровождаться модернизацией инфраструктуры генерации. Планируется, что в 2030 году основными средствами производства электроэнергии станут электростанции комбинированного цикла на природном газе с эффективностью преобразования от 53 до 55%. Для угольных электростанций приоритет будет отдаваться строительству новых станций с использованием современной технологии паровых котлов с эффективностью преобразования от 46 до 55%. Планы для установленных мощностей производства электроэнергии в России до 2030 года представлены в таблице 6⁶.

Таблица 6. Реальные (на 2008 год) и планируемые установленные мощности производства электроэнергии до 2030 года (в ГВт (эл.)).

| | 2008 | 2015 | 2020 | 2030 |
|------------------------------|-------|---------|---------|---------|
| Всего | 224,9 | 239–267 | 275–315 | 355–445 |
| Вклад атомных электростанций | 23,8 | 28–33 | 37–41 | 52–62 |

В энергетической стратегии России приоритет в мощности производства принадлежит атомной энергии. Доказанные и потенциальные ресурсы природного урана, накопленные резервы очищенного природного и обогащенного урана, переработанного урана и российские мощности обогащения предоставляют гарантированную топливную базу для стабильного развития атомной энергетики. Но, наряду с планируемым сооружением реакторов ВВЭР текущего поколения, стратегия включает разработку и внедрение технологий следующего поколения. В частности, реакторы на быстрых нейтронах и замкнутый цикл ядерного топлива, который основан на убеждении, что атомная энергетика может и должна порождать свое собственное расщепляющееся топливо в течение длительного периода.

ЭКОНОМИКА АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Увеличение капитальных затрат

Атомные электростанции (АЭС) характеризуются высокими капитальными затратами и относительно невысокими эксплуатационными расходами. Капитальные затраты на атомную энергетику значительно возросли в Соединенных Штатах и Западной Европе, и похоже, что то же самое происходит и в России.

Конечные стоимости блока № 3 Калининской АЭС (2005 год), блока № 2 Ростовской АЭС (2010 год), и блока № 4 Калининской АЭС (все реакторы – ВВЭР-1000)⁷, строительство которых началось еще в советский период, соответственно равнялись 29,7, 57,6 и 91,1 миллиарда рублей⁸.

Оцениваемые затраты на строительство первого и второго блоков на Ново-Воронежской АЭС № 2 более, чем удвоились. Программа 2008 выделяла 111,53 миллиарда рублей на постройку этих двух блоков, но, согласно заявлению главы Росатома Сергея Кириленко, капитальные затраты составят примерно 240 миллиардов рублей, или 3,33 доллара США на киловатт (эл.)⁹. Задержки в строительстве обеих блоков с 2012 и 2013

года до 2014 и 2016 года соответственно могут привести к дополнительному увеличению расходов.

Согласно Программе 2008, затраты на строительство двух первых блоков с реакторами ВВЭР-1200 на Ленинградской АЭС-2 с полезной установленной мощностью в 1,085 ГВт (эл.) для каждого, составляют 133 миллиарда рублей. Однако, по текущим оценкам российских экспертов, реальные затраты на строительство этих двух блоков будут равны 244 миллиардам рублей (около 8 миллиардов долларов)¹⁰. Задержки строительства дополнительно увеличат расходы на 20%, что приведет к конечным затратам на строительство, превышающим 4,000 доллара США на киловатт (эл.).

Федеральный бюджет выделил 50,4 миллиарда рублей (1,65 миллиарда долларов) на строительство БН-800 на Белоярской АЭС¹¹. Однако, согласно экспертам, реальные капитальные затраты на этот реактор составят 160 миллиардов рублей, или 6,600 долларов США на киловатт (эл.)¹². Следовательно, стоимость одного киловатта мощности реактора на быстрых нейтронах сегодня в 1,5 раза больше, чем на один киловатт мощности реактора ВВЭР.

Тот факт, что затраты на строительство атомных электростанций в России значительно увеличились, признается большинством известных экспертов по атомной энергетике в России¹³. Оценки расходов показывают, что атомная энергетика будет конкурентоспособной с блоками сжигания природного газа с комбинированным циклом, если капитальные затраты не будут превышать 2,500 доллара США на киловатт (эл.)¹⁴. Опыт России показывает, что преобразование тепловых электростанций с паротурбинного цикла на комбинированный цикл, что затраты на конверсию не превышают 1,000 доллара США на киловатт (эл.). Кроме того, эффективность конвертированных блоков увеличивается с 35 до 55,5%, что приводит к увеличению генерирующей мощности на 60% и сокращению потребления газа на киловатт-час на 40%. Следовательно, расходы на один киловатт установленной мощности в новой электростанции комбинированного цикла будут намного ниже, чем у атомной электростанции.

Тот факт, что стоимость электроэнергии, генерируемой на атомных электростанциях, намного больше, чем на электростанциях с комбинированным циклом, показывает, что рост доли атомной энергетики в производстве электроэнергии с 16 до 25%, предлагаемый в энергетической стратегии до 2030 года, не оправдан экономически и мотивируется другими факторами.

Буксующие планы России по строительству новых реакторов

Россия занимает четвертое место в мире по генерирующей мощности атомных электростанций (25,2 ГВт (эл.) в 2012 году), предоставляемой 33 коммерческими реакторами на 10 электростанциях. Семнадцать реакторов ВВЭР, одиннадцать реакторов РБМК-1000 с графитовым замедлителем и водяным охлаждением, и прототип реактора-размножителя на быстрых нейтронах с натриевым охладителем БН-600, работающих со средним коэффициентом использования 81,2%, произвели в 2011 году 172,7 миллиарда киловатт-часов, или приблизительно 16,6% от общего производства электроэнергии в стране¹⁵. В таблице 7 рост атомной энергетики в России с 1992 года и с прогнозом до 2015 года.

Таблица 7. Реальный и прогнозируемый рост атомной энергетики России с 1992 по 2015 год (Энергетическая стратегия России на период до 2030 года⁴ и Программа 2008²).

| | 1992 | 2000 | 2005 | 2012 | 2015* |
|--|------|------|------|------|-------|
| Полная генерирующая мощность, ГВт (эл.) | 20,3 | 21,3 | 23,3 | 25,3 | 33,0 |
| Средний коэффициент использования (%)** | 80 | 65 | 72,3 | 81,2 | 85 |
| Производство электроэнергии (10 ⁹ кВт-час)*** | 118 | 132 | 150 | 186 | 234,4 |
| Доля от общего производства электроэнергии (%) | 11,8 | 14,8 | 15,8 | 16,6 | 18,6 |
| * Прогноз. | | | | | |
| ** Б. Нигматулин, М. Козырев, «Атомная энергетика России. Время упущенных возможностей», ProAtom, 6 мая 2008 года. | | | | | |
| *** Производство электроэнергии на АЭС в России, основано на «Социально-экономические индикаторы Российской Федерации в 1991 – 2010 годах», Федеральная государственная статистическая служба, 2012. | | | | | |

После 2006 года было принято несколько правительственных программ, продвигающих атомную энергетику. В октябре 2006 года правительство утвердило амбициозную «Федеральную целевую программу (ФЦП) № 605 «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007–2010 годы и на перспективу до 2015 года» (Программа 2006)», которая призывала к увеличению доли атомной энергетики к генерирующей мощности с 16% в 2006 году до 25% в 2030 году¹⁶.

Для оправдания принятия этой ФЦП использовались несколько логических обоснований. Возможно, основным из них была замена углеводородного топлива для производства электроэнергии для внутренних потребителей. Это поддержало бы устойчивый экспорт природного газа и нефти, которые являются стратегическими

экспортными товарами России. Другим мотивом могло быть мнение о том, что развитие атомной энергетики может помочь подъему модернизации российской промышленности и обеспечить значительную поддержку развития науки и образования в стране.

Однако, в сентябре 2008 года Программа 2006 была заменена на программу «О Программе деятельности Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" на долгосрочный период (2009 - 2015 годы)» (Программа 2008)¹⁷. Задачи этой программы включали:

- Обеспечение стабильности комплекса ядерного оружия.
- Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных установок и внедрение международных стандартов по безопасности ядерных операций и практике охраны здоровья и радиационной безопасности.

В отношении роста производственных мощностей Программа 2008 поручала:

- Увеличить сроки службы существующих атомных электростанций.
- Завершить сооружение шести строящихся блоков (БН-800, Ростов-2 и Калинин-4, Курск-5, Балаково-5 и 6).
- Начать серийное строительство новых блоков на существующих и новых площадках.

Первый этап программы продолжался с 2009 по 2011 год, а второй должен был проходить с 2012 по 2015 год. В соответствии с программой суммарная мощность российских атомных электростанций должна была увеличиться с 23,2 ГВт (эл.) в 2008 году до 33 ГВт (эл.) в 2015 году. Это должно было быть обеспечено строительством и сдачей в эксплуатацию пяти реакторов на легкой воде с мощностью 1 ГВт (эл.) у каждого, и одного реактора-размножителя на быстрых нейтронах (БН-800) с мощностью 0,8 ГВт (эл.). Помимо завершения шести строящихся блоков, программа предусматривала начало строительства двух блоков на Нововоронежской АЭС-2 и двух новых блоков на Ленинградской АЭС-2, которое планировалось завершить между 2012 и 2013 годами, и между 2013 и 2014 годами соответственно. Также планировалось, что одна плавучая электростанция (с двумя реакторами КЛТ-40С) должна быть разработана и построена в 2014 году. Программа предусматривала также, что после ее завершения в 2015 году Росатом будет за свой собственный счет завершать строительство новых мощностей атомных электростанций не менее, чем по 2 ГВт (эл.) в год. Для поддержки этой стратегии программа предусматривала выделение 1,154 триллиона рублей (приблизительно 38 миллиардов долларов) между 2009 и 2020 годами: 605,7 миллиардов рублей (приблизительно 20,2 миллиардов долларов) из федерального бюджета и 548,3 миллиардов рублей (приблизительно 17,8 миллиардов долларов) от Росатома¹⁸. Однако, программа начала пробуксовывать.

В 2009 году Росатом решил временно приостановить строительство 5-го и 6-го блоков Балаковской АЭС из-за замедления роста спроса на электроэнергию в регионе и недостаточной пропускной способности существующих сетей¹⁹. Кроме того, в начале 2012 года Росатом отказался от завершения строительства 5-го блока Курской АЭС (последнего из реакторов РБМК-1000 чернобыльского типа с графитовым замедлителем и водяным охлаждением), которое было завершено на 70%. Это решение было мотивировано новыми требованиями к безопасности энергетических реакторов, появившимися после аварии на японской атомной электростанции в Фукусиме²⁰. Завершение строительства реактора на быстрых нейтронах БН-800 было перенесено с 2012 на 2014 год²¹. До сих пор было завершено строительство и ввод в эксплуатацию только 2 из 6 реакторов, строившихся в 2008 году: блок № 2 Ростовской АЭС (2010 год) и блок № 4 Калининской АЭС (2012 год).

Новое строительство по сравнению с Программой 2008 также отстает. В настоящее время строятся только БН-800, восемь больших реакторов ВВЭР и два небольших плавучих блока (смотрите таблицу 8)²².

Завершение строительства первого и второго блоков Нововоронежской АЭС-2 было соответственно перенесено на 2014 и 2016 годы²³. Как отмечалось выше, глава Росатома Сергей Кириенко объявил, что капитальные затраты на строительство обоих блоков более чем удвоились и достигли почти 240 миллиардов рублей, или 3,333 миллиарда долларов США на киловатт (эл.).

Строительство Ленинградской АЭС-2 также отстает от запланированных сроков и страдает от перерасхода средств. По Программе 2008 первый блок должен был вступить в строй в 2013 году, но, по состоянию на конец 2012 года ожидалось, что это произойдет в декабре 2014 года²⁴. В июле 2011 года произошел отрыв слоя арматуры защитного корпуса блока № 1 (рисунок 1)²⁵. Требуемые изменения конструкции еще более увеличат стоимость строительства.

Запуск третьего блока Ростовской АЭС, который по Программе 2008 был запланирован на 2014 год, был отложен до 2015 года²⁶. Согласно последней информации Росатом может пересмотреть планы строительства Балтийской АЭС. Вместо двух блоков ВВЭР-1200 Росатом может рассмотреть строительство двух блоков мощностью 680 МВт (эл.)²⁷.

Плавучую атомную электростанцию первоначально планировалось построить в 2012 году, однако в конце 2012 года Сергей Кириенко объявил, что завершение может быть отложено по крайней мере на полтора–два года²⁸. Финансовое мошенничество привело к банкротству Балтийского судостроительного завода, на котором строилась плавучая электростанция²⁹. Недавно было объявлено, что атомная плавучая электростанция вступит в строй в 2016 году³⁰.

Эти задержки и связанные с ними увеличения расходов на строительство показывают, что российская атомная промышленность страдает от многих проблем, характерных для Западной Европы и Соединенных Штатов³¹.

Таблица 8. Ядерные энергетические реакторы, строившиеся в России в конце 2012 года (Росатом).

| Название | Тип реактора | Площадка | Мощность, МВтэл | План подсоединения к сети | |
|---------------------------|--------------|--------------|-----------------|---------------------------|------------|
| | | | | Программа 2008 | Конец 2012 |
| Белоярская 4 | БН-800 | Белоярск | 800 | 2014 | 2014 |
| Балтийская 1 ¹ | ВВЭР-1200 | Неман | 1200 | 2016 | |
| Балтийская 2 | ВВЭР-1200 | | 1200 | 2018 | |
| Ленинградская АЭС-2 1 | ВВЭР-1200 | Сосновый Бор | 1200 | 2013 | 2014 |
| Ленинградская АЭС-2 2 | ВВЭР-1200 | | 1200 | 2014 | |
| Нововоронежская АЭС-2 1 | ВВЭР-1200 | Нововоронеж | 1200 | 2012 | 2014 |
| Нововоронежская АЭС-2 2 | ВВЭР-1200 | | 1200 | 2013 | 2016 |
| Ростовская 3 | ВВЭР-1000 | Волгодонск | 1000 | 2014 | 2015 |
| Ростовская 4 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 2016 | |
| Ломоносов | 2 x КЛТ-40с | Вилючинск | 2 x 35 | 2012 | 2015 |

¹ «Подготовка площадки Балтийской АЭС ведется в соответствии с графиком», Nuclear.ru, 8 декабря 2011 года.



Рисунок 1. Сложившаяся арматурная сетка в строящемся корпусе блока № 1 Ленинградской АЭС-2.

ОБРАЩЕНИЕ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Ежегодная выгрузка и запасы отработавшего топлива

Ежегодно из одиннадцати российских реакторов РБМК-1000 выгружается около 550 тонн отработавшего топлива. Отработавшее топливо хранится в прилегающих к реакторам бассейнах и в отдельных бассейнах на площадке. Общая первоначальная проектная вместимость бассейнов для хранения отработавшего топлива РБМК равнялась примерно 6 000 тонн, посредством установки стеллажей для хранения с высокой плотностью она была увеличена вдвое. Сейчас на российских атомных электростанциях хранится более 13 000 тонн отработавшего топлива РБМК. Поскольку бассейны на электростанциях с РБМК заполнены почти до предела, на Горно-химическом комбинате в Железногорске строится сухое хранилище отработавшего топлива. Степень выгорания отработавшего топлива РБМК и содержание плутония в нем ниже, чем у топлива реакторов с легкой водой. До сих пор не было никаких планов его переработки³².

Одиннадцать блоков с реакторами ВВЭР-1000 ежегодно производят 230 тонн отработавшего топлива. После хранения от трех до пяти лет в бассейнах охлаждения, прилегающих к площадкам реакторов, отработавшее топливо перевозится на централизованное мокрое хранилище в ГЧХК в Железногорске в Сибири рядом с Красноярском. В целом на начало 2012 года из реакторов ВВЭР-1000 было выгружено 6 170 тонн отработавшего топлива, и около 5 000 тонн этого топлива в настоящее время хранится в мокром хранилище ГЧХК.

Из шести блоков ВВЭР-440 ежегодно выгружается около 87 тонн отработавшего топлива. После охлаждения в бассейнах хранения реактора от трех до пяти лет топливо направляется для переработки на завод РТ-1 производственного объединения «Маяк» в Озерске около Челябинска на Урале. Сборки отработавшего топлива ВВЭР-440 сравнительно невелики, в них содержится всего 115 кг урана по сравнению с 390 кг в топливной сборке ВВЭР-1000.

Топливо охлаждаемого натрием реактора БН-600 содержит высокообогащенный уран; из реактора ежегодно выгружается 3,7 тонны отработавшего топлива и 2,5 тонны бланкета, в которых содержится 0,36 тонны плутония. Отработавшее топливо охлаждается на площадке реактора в течение трех лет, после чего оно посылается на завод РТ-1 для переработки.

За время жизни четырех реакторов ЭГП-6 мощностью 11 МВт (эл.) с графитовым замедлителем и водяным охлаждением в Билибино на арктическом побережье России, вступившими в строй между 1974 и 1976 годами, было выгружено около 140 тонн отработавшего топлива. Все 140 тонн отработавшего топлива хранятся на площадке.

Централизованное хранение и переработка

Для обращения с отработавшим топливом Росатом использует три центральных хранилища:

1. Проектная мощность перерабатывающего завода РТ-1 в Озерске составляет 400 тонн в год. Однако, в течение последних десятилетий на нем в течение года никогда не перерабатывалось более 100 тонн отработавшего топлива различных типов³³. На заводе имеется хранилище отработавшего топлива емкостью 2 500 тонн. На заводе перерабатывается отработавшее топливо ВВЭР-440, БН-600, военно-морских и исследовательских реакторов. Извлеченный уран разбавляется до уровня обогащения 2,6% для изготовления топливных сборок для реакторов РБМК. Высокоактивные отходы от переработки преобразуются в стекловидную форму и помещаются в хранилище. В конце 2011 года было объявлено, что, начиная с 2013 года, на заводе РТ-1 будут также перерабатываться дефектные сборки отработавшего топлива РБМК-1000³⁴. В настоящее время в бассейнах хранения РБМК находится около 650 тонн такого отработавшего топлива. Планируется, что завод РТ-1 будет ежегодно перерабатывать 50 тонн такого топлива.
2. Первоначальная проектная вместимость бассейна центрального мокрого хранилища отработавшего топлива на ГЧХК в Железногорске составляет 13 416 топливных сборок ВВЭР-1000 (6 000 тонн). Вместимость хранилища была увеличена до 8 600 тонн за счет установки стеллажей для хранения с высокой плотностью и строительства дополнительного бассейна, которое было закончено в ноябре 2011 года³⁵.
3. Полная плановая вместимость центрального хранилища отработавшего топлива в сухих контейнерах составляет 37 785 тонн, в том числе 26 510 тонн отработавшего топлива РБМК-1000 и 11 275 тонн отработавшего топлива ВВЭР-1000. Первый блок этого хранилища емкостью в 1000 контейнеров (8 129 тонн топлива РБМК) вступил в строй в конце 2011 года; второй блок емкостью 8 000 тонн в настоящее время строится³⁶. 5 апреля 2012 года первый поезд доставил 16 тонн отработавшего топлива с Ленинградской АЭС³⁷. Двадцать девять контейнеров (232 тонны отработавшего топлива РБМК) были доставлены с этой АЭС в

сухое хранилище в конце июня 2013 года.

Направление развития атомной энергетики и обращения с топливом

Российское сообщество экспертов по атомной энергетике давно и почти единогласно поддерживало точку зрения, согласно которой будущее развитие атомной энергетики в стране должно базироваться на коммерциализации реакторов-размножителей на быстрых нейтронах с использованием замкнутого топливного цикла (то есть с повторным использованием плутония и урана). Поэтому Росатом разработал стратегию, направленную на разработку инновационных технологий переработки отработавшего топлива, и на разработку и строительство реакторов-размножителей. Эта работа получила поддержку в ряде федеральных и корпоративных целевых программ.

Федеральная программа «Ядерная и радиационная безопасность на период с 2008 до 2015 года», утвержденная правительством 13 июля 2007 года, предлагает, среди прочего, создание инфраструктуры для обращения с отработавшим ядерным топливом, включая строительство хранилищ и мероприятия по транспортировке и переработке. Ее полный бюджет составляет 145,3 миллиарда рублей (4,7 миллиарда долларов), включая 131,2 миллиарда рублей из федеральных источников. Приоритеты программы включают:

- Реконструкцию мокрого хранилища и строительство нового сухого хранилища для отработавшего ядерного топлива с общей вместимостью 38 тысяч тонн в ГХК в Железногорске.
- Строительство опытного завода по переработке отработавшего топлива в ГХК (известного как опытный демонстрационный центр или ОДЦ).
- Создание площадки для окончательного захоронения высокоактивных отходов в Нижнеканском гранитном массиве (Красноярский край).

В январе 2010 года российское правительство приняло другую федеральную программу (Программа 2010) с полным бюджетом в 131,5 миллиарда рублей (4,2 миллиарда долларов), из которых 110,4 миллиарда рублей (3,6 миллиарда долларов) должны будут поступить из федерального бюджета³⁸. Задача Программы 2010 состоит в разработке прототипов конкурентоспособных и безопасных реакторов на быстрых и тепловых нейтронах с замкнутыми топливными циклами. Двумя из целей данной программы на период с 2009 до 2020 год являются увеличение эффективности использования природного урана в ядерном топливном цикле на 31,8% и сокращения объема хранящегося отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов на единицу мощности атомных электростанций на 31%.

Для того, чтобы обеспечить выполнение ключевых задач Программы 2010, генеральный директор Росатома утвердил в ноябре 2011 года корпоративный проект «Прорыв» для разработки новых экспериментальных энергетических реакторов на быстрых нейтронах, технологий переработки отработавшего ядерного топлива, и технологий производства смешанного оксидного (МОХ) уран-плутониевого топлива³⁹.

Разработка новых экспериментальных энергетических реакторов на быстрых нейтронах

В настоящее время наиболее разработанной технологией реакторов на быстрых нейтронах в России является технология реакторов с натриевым охлаждением. Однако, по мнению разработчиков Программы 2010, возможность возгорания натрия, высокая радиоактивность натрия при нейтронном облучении, и локальный натриевый пустотный эффект реактивности в случае кипения не внушают уверенности в безопасности натриевых реакторов на быстрых нейтронах. Вместо этого будет исследована альтернативная стратегия развития, основанная на реакторах на быстрых нейтронах со свинцовым охлаждением с использованием плотного нитридного топлива.

Согласно его сторонникам, применение негорючего и слабо активируемого свинца предоставляет возможность перейти к реактору с высоким уровнем естественной конвективной циркуляции охладителя и исключить риск пожаров и взрывов охладителя. Они также выступают в поддержку использования нитридного топлива с высокой плотностью и высокой теплопроводностью, и компактных электрохимических технологий переработки, которые позволяют совместное извлечение и повторное использование урана, плутония и других трансураниевых элементов.

На реализацию этих исследований и разработок было выделено финансирование в 109,7 миллиарда рублей (3,6 миллиарда долларов), включая 101,3 миллиарда долларов из федерального бюджета. На проектирование и строительство опытного демонстрационного реактора на быстрых нейтронах со свинцовым охлажде-

нием «БРЕСТ» федеральный бюджет выделил 25,7 миллиарда рублей. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ) отвечает за проект, а Сибирский химический комбинат в окрестностях Томска в Сибири был выбран в качестве площадки для реактора «БРЕСТ»⁴⁰. Пуск реактора намечен на 2020 год. В физико-энергетическом институте (ФЭИ) в Обнинске была запущена большая жидкометаллическая испытательная установка «СПРУТ» для моделирования и экспериментальной проверки парогенератора реактора «БРЕСТ»⁴¹.

Однако, свинец при высоких температурах исключительно коррозионный, и некоторые российские эксперты полагают, что разработка технологии свинцового реактора столкнется с очень большими трудностями. Без создания реактора и научно-исследовательской базы для материалов нельзя будет отработать проект реактора на малых испытательных установках. С этой точки зрения «БРЕСТ» может оказаться рискованным проектом и может привести к неоправданным затратам финансовых ресурсов⁴².

Учитывая этот риск, разработчики Программы 2010 включили в нее параллельные усилия для разработки реакторов на быстрых нейтронах с натриевым и свинцово-висмутовым охладителем.

Росатом и частная компания «Иркутскэнерго» организовали совместное предприятие для строительства экспериментального свинцово-висмутового реактора на быстрых нейтронах СВБР-100 с мощностью 100 МВт (эл.)⁴³. Планируемая стоимость проекта составляет 13,2 миллиарда рублей, из которых 9,5 миллиарда приходятся на частные источники. ФЭИ отвечает за разработку технических требований в конце 2012 года⁴⁴. Генеральный проектировщик реактора – ВНИПИЭТ, конструктор реактора – ОКБ «Гидропресс». Реактор СВБР-100 будет построен на площадке Научно-исследовательского института атомных реакторов (НИИАР) в Димитровграде; планируется, что он начнет работу в 2017 году.

И, наконец, 5,366 миллиардов рублей в Программе 2010 было выделено на проект большого реактора на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением БН-1200⁴⁵. Проект реактора, разрабатываемого в ОКБМ, планировалось завершить в 2014 году⁴⁶. Одной из задач проекта было приведение стоимости строительства БН-1200 к величине, сравнимой со стоимостью строительства ВВЭР аналогичной мощности. В качестве площадки для БН-1200 была выбрана Белоярская АЭС. При условии получения финансирования строительство предполагалось закончить в 2019 году. Ядерное предприятие «Росэнергоатом» уже начало оценку влияния строительства и эксплуатации этого блока на окружающую среду⁴⁷.

Разработка инновационных технологий переработки отработавшего топлива

По федеральной программе «Ядерная и радиационная безопасность на период с 2008 до 2015 года» строительство опытного предприятия по переработке отработавшего топлива (опытный демонстрационный центр, ОДЦ) ведется на ГХК в Железногорске⁴⁸. Центр прежде всего предназначен для разработки инновационной водной радиохимической технологии для отработавшего топлива ВВЭР. Одним из проектных требований является уменьшение объема высокоактивных отходов от текущего уровня в 1 кубометр на тонну до уровня в 0,075 кубометра на тонну отработавшего ядерного топлива. Ожидается, что этот уровень может быть достигнут при совместном извлечении урана, плутония и других актинидов во время переработки, и их перевода в производство МОХ-топлива для сжигания в реакторах на быстрых нейтронах⁴⁹. Первоначально проектная производительность опытного завода равнялась 100 тоннам в год, а стоимость строительства оценивалась в 8,4 миллиарда рублей. Позднее было решено увеличить производительность до 250 тонн в год, и оцениваемая стоимость его строительства увеличивалась до 20,7 миллиарда рублей (0,67 миллиарда долларов)⁵⁰. Технология, разрабатываемая для ОДЦ, и испытанная на нем, должна была впоследствии использоваться при проектировании полномасштабного завода РТ-2. По плану опытный демонстрационный завод должен был вступить в строй в 2015 году.

Одновременно в НИИАР в Димитровграде создавался многофункциональный радиохимический исследовательский комплекс для разработки технологий переработки отработавшего топлива для замкнутого топливного цикла реакторов на быстрых нейтронах. На его создание было выделено 4,695 миллиарда рублей из федерального бюджета. Была запущена первая составляющая, пиротехническая установка К-16 для переработки отработавшего МОХ-топлива реакторов БОР-60 и БН-600, с производительностью 100–150 килограммов отработавшего топлива в год.

Параллельно российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ в Снежинске был выбран для разработки, испытаний и демонстрации инновационных пиротехнических технологий для переработки отработавшего нитридного топлива. Продолжается реконструкция и модернизация лабораторных установок. Планируется использовать эти технологии в качестве основы для ядерного топливного цикла на площадке, в котором переработка и изготовление свежего топлива будет проводиться на площадках реакторов на быстрых нейтронах. Программа

2010 включает в себя разработку и экспериментальное подтверждение технологии, вместе с проектными решениями, относящимися к полномасштабному блоку в период между 2015 и 2020 годами⁵¹.

Одним из заявленных преимуществ ядерного топливного цикла на площадке было увеличение безопасности ядерных материалов⁵². Для переработки облученного нитридного топлива в хлоридных солях будут использованы пиро-электрохимические методы. Плутоний не будет отделяться от других трансурановых элементов. Присутствие других актинидов, а также некоторых продуктов деления в переработанном топливе, вместе с отсутствием транспортировки ядерных материалов за пределами площадки сокращает риск диверсии субнациональными группами. Недавно было объявлено, что топливный цикл на площадке будет реализован на площадке Сибирского химического комбината (СХК) в Северске в 2020 году⁵³. В Программе 2010 для этой цели выделено 2,4 миллиарда рублей (таблица 9).

Таблица 9. Российские проекты переработки.

| Технология | Проектная производительность (тонн тяжелого металла в год) | Местоположение |
|---------------|--|---------------------|
| Водная | 250 (топливо ВВЭР) | ГХК, Железногорск |
| Пирообработка | 0,1–0,15 (топливо реакторов на быстрых нейтронах) | НИИАР, Димитровград |
| Пирообработка | Масштабы лаборатории | ВНИИТФ, Снежинск |
| Пирообработка | Масштабы опытного завода | СХК, Северск |

Разработка технологии и производство смешанного уран-плутониевого топлива

МОХ-топливо для реактора на быстрых нейтронах БН-800 будет производиться на площадке ГХК в Железногорске из плутония как реакторного, так и оружейного качества. Строительство завода уже началось. Гранулированный порошок МОХ будет изготавливаться по технологии вихревого смешивания «Гранат»⁵⁴. Проектная производительность завода составляет 400 топливных сборок или 12,5 тонн в год; завод строится там, где ранее располагался подземный комплекс выделения плутония оружейного качества из урана, облученного на промышленных реакторах Железногорска⁵⁵. Проектная стоимость завода равна 11,7 миллиарда рублей. По Программе 2010 строительство должно быть завершено в 2014 году⁵⁶. МОХ-топливо для БН-800 будет также изготавливаться в НИИАР (Димитровград) с применением технологии вибрационной упаковки.

Параллельно будет вестись проектирование и строительство линии для опытного производства смешанного нитридного топлива. Для этой цели лабораторный комплекс во ВНИИТФ в Снежинске с цепочкой горячих камер с инертной атмосферой будет переконструирован и переоборудован для исследований и разработок⁵⁷. Производство нитридного топлива опытного масштаба на СХК в Северске уже начато, и ожидается, что экспериментальные топливные элементы для испытательного облучения в реакторах на быстрых нейтронах БОР-60 и БН-600 будут изготовлены в конце 2012 года⁵⁸. Две первых экспериментальных сборки нитридного топлива, таблетки и стержни для которых были изготовлены во ВНИИИМ и собраны в НИИАР, уже загружены для испытательных облучений в активную зону реактора БН-600⁵⁹. Федеральная Программа 2010 выделила 18,164 миллиарда рублей для разработки технологий производства плотного нитридного топлива для реакторов на быстрых нейтронах (таблица 10)⁶⁰.

Таблица 10. Проекты изготовления трансуранового топлива.

| Технология | Проектная производительность (тонн тяжелого металла в год) | Местоположение |
|--|--|---------------------|
| МОХ-таблетки для БН-800 | 12,5 | ГХК, Железногорск |
| Вибрационно-упакованное МОХ для БН-800 | 1,9 | НИИАР, Димитровград |
| Нитридное топливо | Для испытаний топлива | СХК, Северск |
| Нитридное топливо | НИР для производства | ВНИИТФ, Снежинск |

Использование легководных реакторов для замыкания топливного цикла

До недавнего времени российская стратегия развития атомной энергетики не предусматривала использования МОХ-топлива в реакторах ВВЭР. Именно поэтому, при отсутствии 100% иностранного финансирования Россия решила не участвовать в первоначальном варианте (2000 год) Соглашения между Россией и США по обращению с плутонием и его утилизации (СОУП) для утилизации избыточного плутония оружейного качества в МОХ-топливе для легководных реакторов. В 2010 году стороны подписали протокол к соглашению, по которому Россия использовала бы свои реакторы на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800 для утилизации 34 тонн

избыточного плутония оружейного качества.

Однако, в начале 2012 года появились сообщения о предложении Росэнергоатома, отделения Росатома, эксплуатирующего российские атомные электростанции, использовать МОХ-топливо в новом реакторе ВВЭР-ТОИ⁶¹. ВВЭР-ТОИ – это реактор ВВЭР с мощностью 1,255 ГВт (эл.), проектирование которого предполагалось завершить в конце 2012 года⁶². Первый блок ВВЭР-ТОИ должен был быть построен на площадке Нижненовгородской АЭС.

Новое предложение Росэнергоатома состоит в том, чтобы использовать МОХ-топливо в 35% активной зоны ВВЭР-ТОИ и в реакторе на быстрых нейтронах БН-1200⁶³. Предлагается построить реакторы ВВЭР-ТОИ с общей мощностью 27 ГВт (эл.) и шесть блоков БН-1200, а также создать к 2020 году заводы, производящие МОХ-топливо для ВВЭР-ТОИ и БН-1200 с годовой производительностью 150 тонн и 50 тонн соответственно. Плутоний, первоначально загружаемый в эти заводы, мог бы быть накопленным в России выделенным плутонием реакторного качества и избыточным плутонием оружейного качества для МОХ-топлива. Одиночным реакторам БН-1200 и ВВЭР-ТОИ ежегодно потребуется топливо, содержащее 2,1 и 0,6 тонны плутония соответственно. Если планы Росэнергоатома будут реализованы, то количество ежегодно облучаемого плутония составит 25 тонн.

Однако, реализация такого крупномасштабного расширения использования МОХ-топлива в России кажется невероятным. Напротив, такое предложение по использованию МОХ-топлива в легководных реакторах может быть указанием на понимание операторами российских АЭС того, что рост мощности российских реакторов, достаточно быстрый для поглощения плутония от крупномасштабной переработки топлива ВВЭР, маловероятен.

Размещение геологического хранилища радиоактивных отходов

Ведется подготовка к геологической утилизации высокоактивных остеклованных и долгоживущих радиоактивных отходов, образующихся при переработке отработавшего ядерного топлива. Запланировано создание подземной лаборатории на глубине 500 метров в Нижнеканском гранитном массиве на площадке «Енисей» (Красноярский край). Лаборатория будет исследовать геологические характеристики гранитного массива в течение девяти лет для определения его пригодности перед окончательным решением о строительстве предприятия по утилизации⁶⁴. Проект был поддержан местными жителями во время публичных слушаний в конце июля 2012 года⁶⁵.

ВЫВОДЫ

Устойчивое и долговременное развитие атомной энергетики зависит от способности решить проблемы, связанные с распоряжением возрастающим количеством отработавшего ядерного топлива. В этом контексте усилия России по поиску решения для управления отработавшим топливом полностью оправданы. Однако, трудно понять, как многочисленные правительственные программы относятся друг к другу. Программы, требующие триллионы рублей из государственного бюджета, принимались без публичного обсуждения и без отзывов от экспертного научного сообщества. «Программа деятельности Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" на долгосрочный период (2009 - 2015 годы)», первоначально принятая в 2006 году и обновленная в 2008 году, столкнулась с задержками и перерасходом средств. Перспективы для федеральной программы 2010 могут быть еще более худшими. Ее направленность на параллельное развитие трех различных типов реакторов на быстрых нейтронах (с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым охлаждением) и трех различных топливных циклов (МОХ-топливо и нитридное топливо для реакторов на быстрых нейтронах и МОХ-топливо для реакторов ВВЭР) указывает на большую неопределенность в перспективах успеха замкнутого топливного цикла, базирующегося на реакторах на быстрых нейтронах.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом».
2. Федеральная целевая программа № 605, «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007–2010 годы и на перспективу до 2015 года», <<http://docs.cntd.ru/document/902009169>> была заменена на программу «О Программе деятельности Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" на долгосрочный период (2009 - 2015 годы)» (Программа 2008), <<https://base.garant.ru/193915/>>; и Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года» в редакции от 3 января 2011, № 135, принятая решением правительства РФ от

- 3 февраля 2010 года № 50 (Программа 2010), <https://base.garant.ru/197428/>.
3. British Petroleum Company, *BP Statistical Review of World Energy* (London: British Petroleum Co, 2012).
 4. «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года». Утверждено решением Правительства Российской Федерации № 1715-р от 13 ноября 2009 года.
 5. «Энергетическая стратегия России», (ссылка 4).
 6. «Энергетическая стратегия России», (ссылка 4).
 7. Суффикс 1000 обозначает полную генерирующую мощность в МВт (эл.). Полезная производительность по данным МАГАТЭ равна 950 МВт (эл.), <<http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=RU>>.
 8. Б. Нигматулин, «Атомная энергетика России. Реальность, вызовы и иллюзии», ПроАтом, 14 февраля 2012 года, <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3572>. Булат Нигматулин – бывший заместитель директора «Росатома» (1998–2002). С 2015 года – генеральный директор Института проблем энергетики.
 9. «Сроки ввода энергоблоков Нововоронежской АЭС перенесены на 2014 и 2016 годы», Nuclear.ru, 14 февраля 2012 года.
 10. Б. Нигматулин, «Атомная энергетика России. Реальность, вызовы и иллюзии», (ссылка 8).
 11. «О Программе деятельности Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" на долгосрочный период (2009 - 2015 годы)» (Программа 2008), (ссылка 2).
 12. Б. Нигматулин, «Атомная энергетика России. Реальность, вызовы и иллюзии», (ссылка 8).
 13. Е.О. Адамов и др. «Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе в XXI веке», Изд-во ОАО «НИКИЭТ», Москва, 2012.
 14. Б.И. Нигматулин, «Электроэнергетика России. Мифы и реальность», ПроАтом, 16 мая 2011 года, <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=3011>.
 15. V.G. Asmolv, «Experience of exploitation NPP. Ensuring safety and increasing efficiency of Russia's nuclear power industry», Proceedings, Eighth international conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power," 23–25 May 2012, Moscow.
 16. Федеральная целевая программа № 605, «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007–2010 годы и на перспективу до 2015 года», (ссылка 2).
 17. «О Программе деятельности Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" на долгосрочный период (2009 - 2015 годы)» (Программа 2008), (ссылка 2).
 18. «О Программе деятельности Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" на долгосрочный период (2009 - 2015 годы)» (Программа 2008), Приложение 3, (ссылка 2).
 19. «С. Кириенко. Все основные мероприятия по реорганизации атомной отрасли близятся к завершению.» Nuclear.ru, 3 июня 2009 года.
 20. «С. Кириенко. Пятый энергоблок Курской АЭС с реактором РБМК достраиваться не будет.» Nuclear.ru, 1 марта 2012 года.
 21. «О. Сараев. Физический пуск реактора БН-800 запланированы на сентябрь 2013 года.» Nuclear.ru, 6 декабря 2011 года.
 22. «Производство электроэнергии», Государственная корпорация «Росатом».
 23. «Сроки ввода энергоблоков Нововоронежской АЭС-2 перенесены на 2014 и 2016 годы», Nuclear.ru, 14 февраля 2012 года.
 24. «Г. Нагинский. Проект строительства Ленинградской АЭС-2 отстает от графика на девять месяцев», Nuclear.ru, 2 апреля 2012 года.
 25. «Безумная авария на АЭС под Питером», Новая газета, № 79, 22 июля 2011 года.
 26. «Физпуск третьего энергоблока Ростовской АЭС запланирован на конец 2014 года», Nuclear.ru, 19 июля 2012 года.
 27. Сергей Козловский, «Полураспад атома», Lenta.ru, <lenta.ru/articles/2013/05/28/plant/>.
 28. «С. Кириенко: Плавучая АЭС может быть сдана не раньше, чем через 1,5 – 2 года». Nuclear.ru, 30 ноября 2012 года.
 29. «Росэнергоатом отрицает причастность к ситуации на Балтийском заводе», Nuclear.ru, 1 сентября 2011 года.
 30. «World's First Floating Nuclear Power Plant to Begin Operating in Russia in 2016», RT.com, 7 July 2013, <<http://rt.com/news/floating-nuclear-plant-russia-759>>.
 31. Б.И. Нигматулин, «Отличить поражение от победы», ПроАтом, 29 марта 2010 года, <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2252>.
 32. Данные в этом параграфе являются оценками, основанными на работах В.И. Калинкина и др. «Хранение

- отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов», препринт ВНИПИЭТ, Санкт-Петербург, 2009, <<http://www.gvniipiet.ru/Images/obzor.pdf>>; и «Second National Report of the Russian Federation on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management», Moscow 2009.
33. E. Kudryavtsev, A. Khaperskaya, «Development of Spent Nuclear Fuel Management Infrastructure in the Russian Federation», presentation at the IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, Vienna, Austria, 31 May to 4 June 2010.
 34. «С 2013 года на Маяке начнется переработка облученного топлива реакторов РБМК», Nuclear.ru, 1 ноября 2011 года.
 35. «Приемка реконструкции «мокрого» хранилища ОЯТ на ГХК запланирована на октябрь», Nuclear.ru, 18 августа 2011 года.
 36. «Подписан акт о завершении строительства СХОЯТ на Горно-химическом комбинате», Nuclear.ru, 20 декабря 2011 года; «Темпы разделки ОТВС на ЛАЭС к концу года должны возрасти до 9,6 в сутки», Nuclear.ru, 2 июля 2013 года.
 37. «На ФГУП «Горно-химический комбинат» началась эксплуатация «сухого» хранилища ОЯТ», Nuclear.ru, 6 апреля 2011 года.
 38. Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года» в редакции от 3 января 2011, № 135, принятая решением правительства РФ от 3 февраля 2010 года № 50 (Программа 2010), (ссылка 2).
 39. Константин Пукемов, «Росатом создает реакторы, работающие на отработанном топливе», Известия, 6 августа 2012 года.
 40. «Опытно-демонстрационный реактор БРЕСТ-300 будет размещен на площадке СХК», Nuclear.ru, 28 сентября 2012 года; А.Г. Глазов. «Реактор БРЕСТ – ядерный топливный цикл на площадке предприятия», Атомная энергия, 103, (2007), 1; V. V. Orlov et al., «Fuel Cycle of BREST Reactors. Solution of the Radwaste and Non-proliferation Problems», in *Proc. 11th Int. Conf. on Nucl. Engng, ICONE-11*, 2003; A. I. Filin et al., «Design Features of BREST Reactors and Experimental Work to Advance the Concept of BREST Reactors», (2001), https://www.etde.org/etdeweb/details_open.jsp?osti_id=20161947.
 41. «В ФЭИ пущен жидкометаллический стенд СПРУТ», AtomInfo.ru, 22 ноября 2011 года.
 42. Б. Нигматулин, «Атомная энергетика России. Реальность, вызовы и иллюзии», (ссылка 8).
 43. «Росатом – глобальный технологический лидер», пресс-релиз, 7 июня 2012 года, департамент коммуникаций Росатома.
 44. «В Рачков: Опытно-промышленный энергоблок с реактором СВБР-100 будет построен в НИИАР», Nuclear.ru, 29 октября 2010 года.
 45. «РФ может построить референтный энергоблок на быстрых нейтронах в 2019 году», AtomInfo.ru, 11 ноября 2009 года.
 46. «Технический проект реакторной установки БН-1200 будет завершен в 2014 году», Nuclear.ru, 6 декабря 2011 года.
 47. «Началась процедура ОВОС по строительству энергоблока № 5 Белоярской АЭС», Nuclear.ru, 12 мая 2012 года.
 48. «Проект ОДЦ по переработке ОЯТ будет направлен на госэкспертизу в начале декабря этого года», Nuclear.ru, 30 октября 2009 года.
 49. P. Gavrilov, «Technological Perspectives of Nuclear Fuel Cycle Closure», presentation at the Vth international conference, AtomEco-2011, Moscow, October 31–November 1, 2011.
 50. «На ГХК начинается очередной этап испытаний по обкатке оборудования для ОДЦ», Nuclear.ru, 8 июня 2012 года.
 51. Программа 2010, (ссылка 2).
 52. «Прорваться в будущее», Страна Росатом, 07(52), Март 2012 года, стр. 8-9.
 53. «СХК перечислено 250 млн. рублей в рамках создания нитридного топлива», Nuclear.ru, 23 октября 2012 года.
 54. Nuclear Fuels, Continuous Process of Powder Production For MOX Fuel Fabrication According to "Granat" Technology, (Part 2), Morkovnikov, V.E., Raginskiy L. S., Pavlinov A.P., Chernov V.A., Revyakin V.V., Varykhanov V.S., Revnov V.N. SSC RF VNIINM, Russia, Plutonium Futures–The Science: Topical Conference on Plutonium and Actinides, AIP Conference Proceedings, Vol. 532, (2000), Summary <<http://www.atalante2004.cea.fr/home/liblocal/docs/atalante2000/P6-06.pdf>>.
 55. «ГХК: Последняя партия облученных урановых блоков отправлена на переработку», Nuclear.ru, 6 марта 2012 года.

56. Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов», (ссылка 2).
57. «Прорваться в будущее», Страна Росатом, 07(52), Март 2012 года, стр. 8-9.
58. «Топливная компания ТВЭЛ подтвердила намерения по развитию ОАО СХК», Компания ТВЭЛ, <http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite/presscentre/news/213b91804bd675cb928edf02617a3aa0>.
59. Частное сообщение от Валентина Иванова, директора ВНИИНМ, июнь 2013 года.
60. Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов», (ссылка 2).
61. V. Asmolov, "VVER LWR Should be Ready for MOX Usage," presentation at the Eighth International Conference «Safety, Efficiency and Economy of Nuclear Power», 23–25 May 2012, Moscow.
62. Генеральным проектировщиком является «Атомэнергопроект», но в работах участвуют также «Гидропресс», проектное отделение «Росэнергоатома», и Курчатowski институт. «Типовой проект ВВЭР-ТОИ будет представлен на мировом рынке в 2013 году», Nuclear.Ru, 23 января 2012 года.
63. O. Saraev, "Perspective of the Development and Implementation of the Closed Fuel Cycle," presentation at the Eighth International Conference "Safety, Efficiency and Economy of Nuclear Power," 23–25 May 2012 Moscow.
64. E. Kudryavtsev, A. Khaperskaya, and V. Smirnov, "Development of the Spent Fuel Management Infrastructure in the Russian Federation", (ссылка 33).
65. «В Железногорске состоялись слушания по созданию подземной лаборатории РАО», Nuclear.ru, 30 июля 2012 года.

Приложение А. Действующие российские атомные электростанции на август 2013 года.

| Название | № блока | Тип реактора | Положение | Мощность, МВт | Включение в сеть |
|-----------------|---------|--------------|---------------|---------------|------------------|
| Балаковская | 1 | ВВЭР-1000 | Балаково | 1000 | 1985 |
| | 2 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 1987 |
| | 3 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 1988 |
| | 4 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 1993 |
| Белоярская | 3 | БН-600 | Заречный | 600 | 1980 |
| Билибинская | 1 | ЭГП-6 | Билибино | 12 | 1974 |
| | 2 | ЭГП-6 | | 12 | 1974 |
| | 3 | ЭГП-6 | | 12 | 1975 |
| | 4 | ЭГП-6 | | 12 | 1976 |
| Калининская | 1 | ВВЭР-1000 | Удомля | 1000 | 1984 |
| | 2 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 1986 |
| | 3 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 2004 |
| | 4 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 2011 |
| Кольская | 1 | ВВЭР-440 | Полярные зори | 440 | 1973 |
| | 2 | ВВЭР-440 | | 440 | 1974 |
| | 3 | ВВЭР-440 | | 440 | 1981 |
| | 4 | ВВЭР-440 | | 440 | 1984 |
| Курская | 1 | РБМК-1000 | Курчатов | 1000 | 1976 |
| | 2 | РБМК-1000 | | 1000 | 1979 |
| | 3 | РБМК-1000 | | 1000 | 1983 |
| | 4 | РБМК-1000 | | 1000 | 1985 |
| Ленинградская | 1 | РБМК-1000 | Сосновый бор | 1000 | 1973 |
| | 2 | РБМК-1000 | | 1000 | 1975 |
| | 3 | РБМК-1000 | | 1000 | 1979 |
| | 4 | РБМК-1000 | | 1000 | 1981 |
| Смоленская | 1 | РБМК-1000 | Десногорск | 1000 | 1982 |
| | 2 | РБМК-1000 | | 1000 | 1985 |
| | 3 | РБМК-1000 | | 1000 | 1990 |
| Нововоронежская | 3 | ВВЭР-440 | Нововоронеж | 417 | 1971 |
| | 4 | ВВЭР-440 | | 417 | 1972 |
| | 5 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 1980 |
| Ростовская | 1 | ВВЭР-1000 | Волгодонск | 1000 | 2001 |
| | 2 | ВВЭР-1000 | | 1000 | 2010 |