

УДК 621.039.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАКТОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Поспелов В.А., Бакланов В.В., Коровиков П.Г.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

pospelov@nnc.kz

В Казахстане продолжительное время ведутся работы по обоснованию возможности использования атомной энергии для индустриального развития страны. В данной статье приводится обзор проделанной работы по разработке маркетингового раздела технико-экономического обоснования строительства атомной станции в Республике Казахстан, в части касающейся сравнительного анализа имеющихся на рынке реакторных технологий. Анализ проектов реакторов для потенциально возможного строительства в Республике Казахстан проводился по разработанной специалистами РГП «Национальный ядерный центр РК» системе критериев оценки. В ходе проведенной оценки были предложены наиболее перспективные проекты реакторов для возможного строительства в Республике Казахстан.

Ключевые слова: атомная энергетика, АЭС, реактор, поколение III, III+, технико-экономическое обоснование (ТЭО), маркетинговый раздел, критерии выбора реактора, референтность.

ВВЕДЕНИЕ

В 2018–2019 годах Научно-техническим центром безопасности ядерных технологий (НТЦ БЯТ) на основании договора с АО «Казахстанские атомные электрические станции» был разработан «Маркетинговый раздел технико-экономического обоснования строительства атомной станции в Республике Казахстан» (МР ТЭО АЭС). Разработка маркетингового раздела ТЭО была осуществлена в рамках Плана первоочередных мероприятий по строительству атомных электростанций в Республике Казахстан [1]. Целью разработки МР ТЭО АЭС являлось определение условий, при которых возможно сооружение атомной электростанции в Республике Казахстан, с определением установленной мощности АЭС, единичной мощности блоков, района размещения, а также с выбором реакторной технологии.

Для выполнения данной работы был организован консорциум из трех участников, в который вошли ТОО «Energy System Researches» (ТОО ESR), НТЦ БЯТ и РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан (РГП НЯЦ РК).

ТОО ESR проводило работы по анализу современного состояния и прогнозу развития электроэнергетики Республики Казахстан, по определению мощности АЭС, балансов мощности и электрической энергии с учетом строительства АЭС. НТЦ БЯТ провел оценку готовности к строительству АЭС с точки зрения законодательной и регулирующей основы в Республике Казахстан, рассмотрел вопрос обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом при эксплуатации АЭС, выполнил анализ существующих проектов малых модульных реакторов, а также координировал работу консорциума и готовил итоговый вариант маркетингового раздела. РГП НЯЦ РК провел оценку потенциальных районов размещения АЭС: поселка Улькен Жамбылского района Алматинской области и города Курчатова Восточно-Казахстанской области, а также вы-

полнил сравнительный анализ имеющихся на рынке реакторных технологий.

По разделу, относящемуся к реакторным технологиям, были направлены соответствующие запросы, проведены совещания и видеоконференции с представителями ведущих мировых поставщиков (вендоров) реакторных технологий и получены материалы по предполагаемым проектам реакторов с предварительными предложениями и условиями вендоров.

Компаниями, проявившими интерес к предоставлению информации по реакторным технологиям, а также, в целом, к возможному проекту строительства АЭС в Республике Казахстан, выступили: EDF Group / Mitsubishi Heavy Industries Ltd. (Франция, Япония) с реактором АТМЕА1; Росатом (Россия) с реакторами ВВЭР-1200; NuScale Power (США) с модульным реактором малой мощности NuScale; CGN (Китай) с реактором HPR-1000; Westinghouse/Toshiba (США, Япония) с реактором AP-1000; КЕРСО (Южная Корея) с реактором APR-1400. Наряду с представленными технологиями были также рассмотрены другие проекты реакторов (ВВЭР-600, ВБЭР-600, ВВРХ-300, CNP-1000 и др.).

ПРЕДПОСЫЛКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ МАРКЕТИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненные маркетинговые исследования были продолжением работ по обоснованию строительства АЭС в Республике Казахстан. В конце 1990-х годов были проведены работы по проекту опытно-демонстрационной атомной станции малой мощности (на базе лодочного реактора АБВ-6М) на КИР «Байкал-1» РГП НЯЦ РК, а также разработано обоснование инвестиций в строительство АТЭС малой мощности на базе корабельных реакторных установок типа КЛТ-40 для энергоснабжения Лениногорского комбината и города Риддера Восточно-Казахстанской области [2]. В составе АТЭС рассматривалось строительство двух энергоблоков с наземным и подзем-

ным вариантом размещения. В 2000-ых годах планировалось создание ядерного энерготехнологического комплекса в составе технопарка «Парк ядерных технологий» в городе Курчатове. Этот реакторный комплекс представлял собой атомную станцию малой мощности, которая должна была быть построена по проекту, разработанному с участием казахстанских организаций и предприятий.

В 1997 году было разработано технико-экономическое обоснование строительства АЭС мощностью 640 МВт в районе поселка Улькен, вблизи озера Балхаш [3], однако решение о строительстве не было принято. В 2006 году было разработано технико-экономическое обоснование «Строительство атомной станции с реакторными установками ВВЭР-300 в Мангистауской области» [4]. ТЭО прошло установленные законодательством согласования и заключения, включая государственную экологическую экспертизу. В дальнейшем работы по проекту также были приостановлены.

В течение последних трех десятилетий в Республике Казахстан системно проводились исследования по определению оптимальных характеристик реакторных технологий для внедрения в стране в случае строительства АЭС. В частности, в 1999–2003 годах в рамках Республиканской целевой научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Казахстане» под руководством профессора Батырбекова Г.А. была проведена работа по сопоставительному анализу проектов ядерных топливных циклов разных стран с целью разработки рекомендаций для совершенствования Концепции создания атомной энергетики Республики Казахстан [5]. В данной работе было проведено исследование состояния и перспектив развития ядерного топливного цикла в странах мира и рассмотрены возможные пути развития ядерного топливного цикла в Республике Казахстан. В результате выполненной работы была разработана методология выбора энергетических реакторов на тепловых нейтронах на основе сравнительного анализа с применением системы критериев.

В 2008-2009 годах специалистами РГП НЯЦ РК в процессе выполнения совместных с японскими специалистами из Japan Atomic Power Company (JAPC) технико-экономических исследований [6] и разработки варианта казахстанских требований эксплуатирующих организаций к проекту АЭС (URD – Utility Requirement Document) – документа [7], аналогичного действующим в Европе, США и ряде других стран, – был разработан подход в определении оптимальных реакторных характеристик для Республики Казахстан.

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И ВЫБОР РЕАКТОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Как показывает мировой опыт, в настоящее время и в период до 2030 года в мире строятся и планируются к строительству АЭС с водо-водяными реакторами III и III+ поколения. Выбор проектов реактор-

ных установок для строительства АЭС следующего поколения показывает, что во всем мире предпочтение отдается эволюционному направлению развития реакторной техники с учетом требований эксплуатирующих организаций. Реакторы III поколения были впервые разработаны в 1990-х годах, некоторые из них в настоящее время сооружаются [8]. В их числе: EPR (Evolutionary Pressurized Reactor) производства компании AREVA, строящиеся в Финляндии, Франции и Китае; AP-1000 производства Toshiba-Westinghouse в Китае; ВВЭР-1200 (проект «АЭС-2006», разработанный ОКБ «ГИДРОПРЕСС») в России, и APR-1400 (Advanced Power Reactor) производства KEPSCO в Абу-Даби. Проекты реакторов поколения III+ решают проблему дальнейшего повышения безопасности, надежности реактора и удешевления производимой энергии, повышения конкурентоспособности АЭС. Это достигается путем максимального использования внутренне присущих свойств безопасности: высокой устойчивости и саморегулируемости благодаря отрицательному температурному коэффициенту реактивности, применению пассивных защитных мер, повышающих безопасность, упрощающих и удешевляющих реактор, а также интегральной компоновке оборудования первого контура в корпусе реактора, исключающей большие течи при аварии с потерей теплоносителя и существенно снижающей размеры и последствия аварии. Но главной особенностью этих реакторов является практическое устранение возможности аварий с разрушением активной зоны еще на стадии проектирования, то есть реализуется концепция «устранение аварии при проектировании» [9].

В настоящем маркетинговом исследовании с целью сравнительной оценки проектов реакторов для возможного строительства в Республике Казахстан была разработана система критериев оценки. Данные критерии учитывают рекомендации, полученные при ранее проведенных исследованиях, наиболее актуальные показатели и характеристики атомных станций среди предложений на рынке атомных технологий, а также международные требования к безопасности АЭС.

Разработанные критерии оценивались как количественными, так и качественными показателями. Как уже отмечалось ранее, предпочтительным типом реактора должен быть водоводяной реактор мощностью от 600 до 1200 МВт. С точки зрения управления режимами, пропускной способности сети, обеспечения наиболее надежного послеварийного режима, рекомендуемая величина блока АЭС для Казахстана составляет не более 1200 МВт. В то же время с экономической точки зрения не целесообразно рассматривать блоки мощностью менее 600 МВт из-за возрастающих удельных капиталовложений на 1 кВт мощности при строительстве реакторов малой и средней мощности. В итоге оптимальным вариантом для рассмотрения проектов реакторов был выбран

диапазон от 600 МВт (проекты реакторов средней мощности) до 1200 МВт (проекты реакторов большой мощности). Коэффициент использования установленной мощности реактора (КИУМ) должен составлять не менее 85%, что соответствует показателям современных проектов реакторов. Срок службы реактора не менее 60 лет. Более длительный срок эксплуатации в 60 лет по сравнению с реакторами предыдущего поколения в конечном итоге отражается на экономических показателях проекта АЭС. В реакторе должно использоваться топливо с низким обогащением менее 20% по U-235, с максимальным выгоранием не менее 50 МВт·сут/кгU [7]. Период между перегрузками топлива должен составлять 18–24 месяца. Также в систему критериев включены критерии, характеризующие безопасность реактора, такие, как наличие двойной защитной оболочки, принципиально устраняющей возможность осушения активной зоны при аварии с потерей теплоносителя и выход радиоактивных веществ в окружающую среду, расчет на максимальное землетрясение не менее 6 по шкале MSK-64 (12-балльная шкала интенсивности землетрясений Медведева – Шпонхойера – Карника), установленного в соответствии с рассматриваемыми потенциальными районами размещения в Казахстане, результаты вероятностного анализа безопасности, находящиеся в рамках вероятностей, предписываемых МАГАТЭ для вновь проектируемых станций, период автономности АЭС без внешних источников электропитания не менее 72 часов [7], учет при проектировании защиты от внешних воздействий природного (смерчи, наводнения, пожары и т.п.) и техногенного характера (падение самолета), требования к целевым показателям по радиационной безопасности населения и персонала при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях. Также включены критерии наличия необходимых систем безопасности: систем останова реактора, включающие две независимые системы – стержни СУЗ, жидкий поглотитель, что соответствует рекомендуемому подходу разнопринципности, независимости и физического разделения; активных и пассивных систем безопасности, при этом использование пассивных системы безопасности рекомендуется использовать там, где это является обоснованным и направлено на пользу общей безопасности, резервного энергоснабжения – источников постоянного и переменного тока; систем управления тяжелой аварией – ловушки расплава, системы удержания расплава, система контроля концентрации водорода и т.п.

Кроме того, проект реактора должен быть лицензирован в стране, где был разработан. Проект реактора должен иметь референтность, т. е. технологии, опробованные на практике в течение длительного времени. Одним из важных критериев является характеристика поставщика технологий, заключающаяся в

общем опыте реакторостроения, количестве построенных и строящихся блоков, наличии научно-технической и производственной базы. В качестве дополнительных критериев при анализе ядерных технологий были рассмотрены вопросы, связанные с передачей технологий, возможностью организации производства топлива на территории Республики Казахстан, обращением с РАО и ОЯТ, обучением персонала, а также с экономическими и финансовыми показателями. Разработанные критерии направлены на выявление наиболее проработанных и референтных проектов реакторов и наиболее актуальных ядерных технологий, отвечающих принципам безопасности и функциональности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При проведении сравнительного анализа рассматривались проекты усовершенствованных реакторов, находящиеся в базе реакторов, рекомендованных МАГАТЭ, а также проекты реакторов, вендоры которых проявили заинтересованность в предоставлении информации и возможному строительству АЭС в Республике Казахстан. Из перечня реакторов базы МАГАТЭ [10] для дальнейшего рассмотрения были исключены проект французско-германского реактора с водой под давлением EPR (1750 МВт(э)), разработанных компаниями «Сименс» и «Фраматом», а также проект японского усовершенствованного реактора с водой под давлением APWR (1530 МВт(э)), разработанного компаниями JAPC, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, Японии, Westinghouse Electric Company, США. Данные проекты реакторов не рассматривались в связи с большой мощностью, что затрудняет их использование в энергосистеме Республики Казахстан и незаинтересованностью потенциальных поставщиков. В случае возможного строительства энергоблока с одним из представленных реакторов потребуется проведение дополнительного сетевого строительства, требующего больших затрат, либо проработка дуплексной схемы турбогенератора, что также потребует дополнительных исследований и финансовых затрат.

Основным критерием для отбора проектов реакторов являлась референтность технологий [11]. Стоит отметить, что многие проекты и предложения реакторов, относящихся к поколению III и III+ (ATMEA1, HPR-1000, ESBWR, проекты реакторов средней мощности и малые модульные реакторы), не имеют референтности. Относительно этих проектов реакторов можно говорить только о референтности технологий, на базе которых они разрабатывались. К референтным проектам реакторов можно отнести только проекты AP-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-1000, APR-1400, CNP-1000 и ABWR. В ближайшем будущем, после окончания строительства, к отработанным технологиям можно будет отнести проект реактора HPR-1000, строительство которого ведется в Китае.

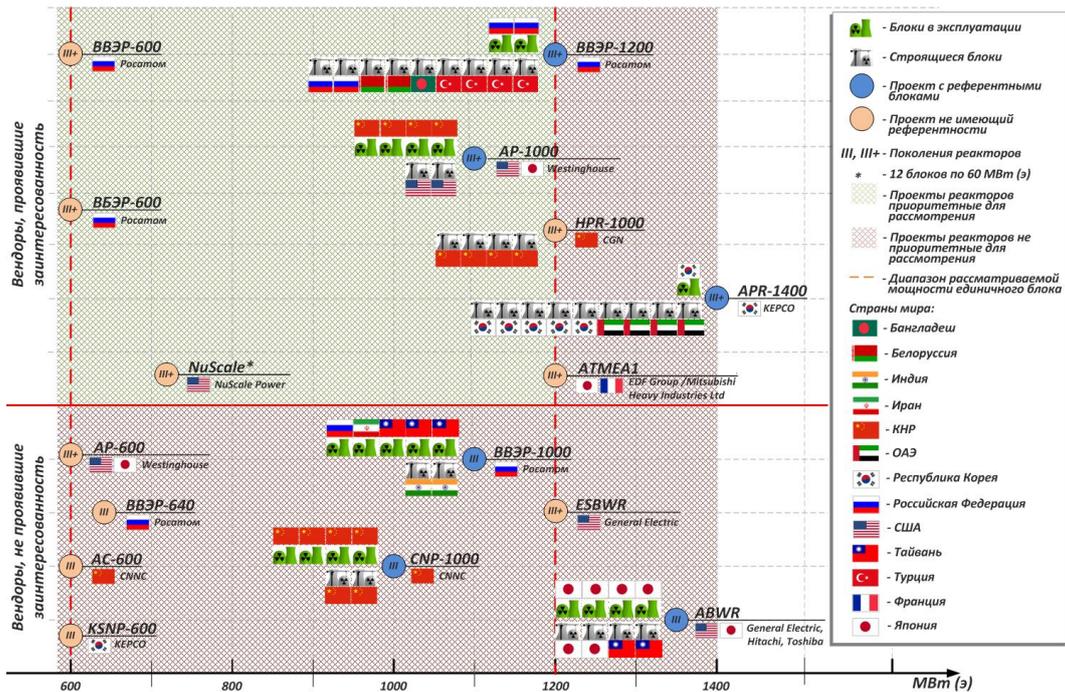


Рисунок. Реакторные технологии

В итоге, для более детального рассмотрения, были отобраны проекты реакторов, представленные на рисунке.

Проведенный анализ показал, что наибольшие показатели соответствия разработанным критериям среди реакторов большой мощности у проектов ВВЭР-1200, ВВЭР-1000, а также AP-1000. Высокие показатели проектов ВВЭР обусловлены наличием эксплуатируемых блоков. На сегодняшний день в мире строится и эксплуатируется около 20 блоков ВВЭР. Проекты имеют хорошие показатели по соответствию критериям. Перспективным проектом представляется реактор AP-1000, высокие показатели которого обеспечиваются результатами вероятностного анализа, высокой сейсмостойкости и КИУМ. После запуска в 2018 году первых блоков в Китае у проекта AP-1000 появился референтный блок. Китайские поставщики реакторных технологий (CNP-1000, HPR-1000) на сегодняшний день не имеют опыта строительства своих реакторов за рубежом, строительство блоков производится только в Китае. Проект французского реактора ATMEA1 также ранее не реализовывался за рубежом и на сегодняшний день не имеет референтных блоков.

Среди проектов реакторов средней мощности наилучшие показатели у проектов AP-600, ВВЭР-640, ВВЭР-600 и ВБЭР-600. Данные проекты реакторов лицензированы, за исключением реакторов ВВЭР-600 и ВБЭР-600, проекты которых не завершены по причине отсутствия потенциального заказчика и, следовательно, финансирования. По заявлению вендора, при появлении заказчика проекты ВВЭР-600 и ВБЭР-600 могут быть доработаны и лицензированы для реализации за 2–3 года. Несмотря

на готовность проекта реактора AP-600 к внедрению, ни инвесторы, ни сам разработчик не проявляют к нему интереса. Так же обстоят дела и с проектом ВВЭР-640, который до сих пор не нашел применения. Первый энергоблок с таким реактором предполагалось построить по проекту СПбАЭП в качестве расширения Ленинградской АЭС, однако предпочтение было отдано блокам ВВЭР-1200. На сегодняшний день в мире не реализован ни один проект реактора средней мощности поколений III и III+.

Проекты малых реакторов (NuScale) в настоящий момент не построены и не лицензированы ни в одной из стран, предлагающих эти решения, и относятся к наиболее дорогим предложениям в расчете на единицу мощности.

В дальнейшем, при выборе реакторной технологии, необходимо учитывать, что в случае выбора реакторной технологии, проект которой не завершён и не лицензирован, затраты на завершение проекта могут быть покрыты за счёт средств заказчика, а при возникновении любых проблем с реактором затраты по их разрешению полностью лягут на страну, в которой он построен. При выборе отработанной реакторной технологии у реактора, находящегося в эксплуатации, ожидается меньше сложностей при замене оборудования, поиске запасных частей, поставке топлива.

Выводы

Создание атомной энергетики является масштабной, дорогостоящей и очень сложной задачей для любого государства вне зависимости от имеющегося в стране научно-технического потенциала. В этой связи не вызывает сомнений целесообразность подхода,

при котором странами, начинающими процесс создания атомной энергетики, в максимальной степени учитывается предшествующий международный опыт.

Мировой опыт вступления разных стран в атомную энергетику примерно одинаков. Подход к внедрению атомной энергетики начинается с изучения мирового опыта в разработке и эксплуатации АЭС, последующего выбора на альтернативной основе наиболее продвинутых, максимально безопасных и экономически выгодных АЭС. В дальнейшем, после приобретения опыта и уверенности, последующее развитие и совершенствование проектов АЭС производилось собственными специалистами этих стран, с максимальным использованием в проектах самых передовых реакторных технологий.

На сегодняшний день в Казахстане имеются все объективные предпосылки для создания и развития атомной отрасли, а именно:

- наличие значительного количества разведанных запасов урана, развитой уранодобывающей и ураноперерабатывающей промышленности, предприятий производства топлива и конструкционных материалов для ядерных энергетических реакторов;

- наличие атомной науки с базовыми экспериментальными установками, включая исследовательские реакторы, способной решать задачи мирового уровня по направлениям развития атомной энергетики и обеспечения условий ее безопасного применения, выполнять исследования в области ядерной физики, физики и техники ядерных реакторов;

- наличие начального кадрового потенциала высококвалифицированных специалистов как в атомной промышленности, так и в атомной науке;

- наличие опыта ликвидации, консервации и рекультивации объектов геологоразведочной, уранодобывающей и ураноперерабатывающей деятельности, а также ликвидации последствий испытаний оружия массового поражения на испытательных ядерных полигонах.

Учитывая вышесказанное и уверенный курс Республики Казахстан на индустриальное развитие экономики, создание атомной энергетики в стране является не только обоснованным, но и крайне необходимым шагом для гармоничного и безопасного развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Премьер-Министра Республики Казахстан от 4 мая 2014 года № 60-р «Об утверждении Плана первоочередных мероприятий по строительству атомных электростанций в Республике Казахстан» (с изменениями от 02.11.2016 г.).
2. Обоснование инвестиций (1-ый этап) проекта «Строительства АТЭЦ малой мощности с РУ типа КЛТ-40 в Республике Казахстан». – Государственное предприятие нижегородский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт Атомэнергопроект, Нижний Новгород, 1997, инв.№ А-62651.
3. Балхашская АЭС. Техничко-экономическое обоснование строительства. – Министерство РФ по атомной энергии, С.-П. НИПКИ «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ», С.-Петербург, 1997.
4. Техничко-экономическое обоснование инвестиционного проекта «Строительство атомной станции с РУ ВБЭР-300 в Мангистауской области». – АО «КРКАС», Актау, 2008.
5. Батырбеков Г.А. Системный сопоставительный анализ проектов современных энергетических ядерных реакторов с водой под давлением (PWR, ВВЭР) и кипящей (BWR). Современные технологии безопасности АЭС и ядерные топливные циклы разных стран. – ИЯФ НЯЦ РК, Алматы, 2013.
6. Васильев Ю.С., Вурим А.Д., Колодешников А.А., Левин А.Г., Витюк В.А. и др. Основные результаты ТЭИ. – Отчет о выполнении мероприятий по программе «Проведение технико-экономических исследований в обоснование строительства атомных электростанций в Республике Казахстан», инв. №48 от 02.04.2009 г., ИАЭ НЯЦ РК, Курчатов, 2009.
7. Проект Технических требований эксплуатирующей организации Республики Казахстан к АЭС (RKURD), РГП НЯЦ РК, Курчатов, 2009.
8. WANO 2004. World Nuclear Association. Advanced Nuclear Power Reactors. (November) <http://www.world-nuclear.org>.
9. Д.П. Белозоров, Л.Н. Давыдов. Современные проблемы ядерной энергетики: усовершенствованные реакторы III и III+ поколения. – Институт теоретической физики им. А.И. Ахиезера, ННЦ ХФТИ, Харьков, 2007.
10. The Power Reactor Information System (PRIS). <https://pris.iaea.org/pris/>.
11. A report by the International Nuclear Safety Group «Nuclear safety infrastructure for a national nuclear power programme supported by the IAEA fundamental safety principles», INSAG-22. – IAEA, Vienna, 2008.

РЕАКТОРЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

В.А. Поспелов, В.В. Бакланов, П.Г. Коровиков

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Қазақстанда елімізді индустриялық дамыту үшін атом энергиясын пайдалану мүмкіндіктерін негіздеу бойынша жұмыстар ұзақ уақыттар бойына жүргізілуде. Осы мақалада Қазақстан Республикасында атом станциясы құрылысын технико-экономикалық негіздеудің маркетинг бөлімін әзірлеу бойынша, әсіресе реакторлық технологиялар нарығында бар салыстырмалы талдауларға қатысты жасалған жұмыстарға шолу келтірілген. Қазақстан Республикасындағы потенциалды мүмкін болатын құрылысқа арналған реакторлар жобасын талдау «ҚР Ұлттық ядролық орталығы» РМК мамандарымен әзірленген бағалау критерилері жүйесі бойынша жүргізілді. Жүргізілген бағалау барысында Қазақстан Республикасындағы потенциалды мүмкін болатын құрылысқа арналған реакторлардың неғұрлым перспективті жобалары ұсынылған болатын.

Кілт сөздер: атом энергетикасы, АЭС, реактор, III, III+ буын, технико-экономикалық негіздеме (ТЭН), маркетинг бөлімі, реакторды таңдау критеріі, референттілік.

COMPARATIVE ANALYSIS OF REACTOR TECHNOLOGIES

V.A. Pospelov, V.V. Baklanov, P.G. Korovikov

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

In Kazakhstan, for a long time, work has been underway to justify the possibility to use atomic energy for industrial development of the country. This article provides an overview of the work done to develop the marketing section of the feasibility study for the construction of a nuclear power plant in the Republic of Kazakhstan, regarding the comparative analysis of the reactor technologies available on the market. Analysis of reactor designs for potential construction in the Republic of Kazakhstan was carried out according to a system of evaluation criteria developed by specialists of the RSE National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. In the course of the assessment, the most promising reactor designs for possible construction in the Republic of Kazakhstan were proposed.

Keywords: Atomic Energy, NPP, Reactor, III, III+ Generation, Feasibility Study (FS), Marketing Section, Criteria for Reactor Selection, Reference.