

УДК 621.039.003

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Бор С.М., Благовещенский А.Я., Логинов И.Н.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения многоцелевых модульных реакторных установок. Проанализированы варианты применения разных типов установок в качестве базовой энергоустановки, с точки зрения технических и экономических аспектов. Рассмотрен экономический эффект при применении многоцелевых модульных реакторных установок.

Ключевые слова: модульные реакторные установки, атомная электростанция, серийность, окупаемость.

В данной статье произведем анализ технических и экономических аспектов возможности применения модульных реакторных установок для объектов различного назначения. В настоящее время перспектива развития ядерной энергетики связана с АЭС большой мощности. Тем не менее, значительно вырос интерес к реакторным установкам (РУ) малой мощности. В Российской Федерации этот интерес обусловлен, главным образом, необходимостью обеспечения электроэнергией районов, обладающих природными ресурсами и находящихся вне зон централизованного электроснабжения [1]. За рубежом разработка реакторных установок малой мощности вызвана стремлением уменьшить рост затрат на создание атомных электростанций большой мощности. При этом такие реакторные установки могут использоваться в качестве модулей, в совокупности обеспечивающих получение большой мощности.

По данным Массачусетского технологического института, удельные капитальные затраты на сооружение электростанций с 2002 до 2009 года возросли с 2000 долл./кВт до 4000 долл./кВт. Существующие тенденции свидетельствуют о том, что стоимость будет продолжать расти [2]. Разработки проектов реакторных установок малой мощности ведутся в Японии, Индии, Республике Корея и др. [1].

Снижение затрат на реакторную установку возможно за счет:

- увеличения объема серии;
- строительства модульных атомных реакторных установок относительно небольшой мощности.

Зависимость для определения коэффициента уменьшения затрат на изготовление при увеличении объема серии имеет следующий вид:

$$k_1 = \sum_{i=1}^n i^{-0,25} / n, \quad (1)$$

где i – номер образца в серии, n – число образцов в серии.

В таблице 1 приведены значения коэффициента снижения затрат в зависимости от объема серии. Как следует из таблицы, при объеме серии равном 30, дальнейшее увеличение объема практически не приводит к снижению стоимости. Согласно работе [3], при серии из 8 блоков АЭС стоимость снижается на 20%, что в определенной степени согласуется с приведенными в таблице 1 данными и подтверждает возможность принципиально одинакового подхода к определению влияния серийности при рассмотрении АЭС и реакторных установок.

Таблица 1 – Коэффициент снижения затрат в зависимости от объема серии

Объем серии	5	10	15	20	30	40	50	70	100
Коэф. снижения затрат	0.8	0.7	0.64	0.6	0.58	0.57	0.56	0.56	0.558

Целесообразность строительства модульных реакторных установок для АЭС обусловлена, наряду с более низкими капитальными затратами, также тем, что сроки до начала получения дохода от атомных электростанций большой мощности значительные (на строительство требуется примерно пять лет, а на период возврата капиталовложений и процентов еще 10-20 лет). В настоящее время период строительства АЭС с реакторными установками большой мощности равный 48–54 месяцам является типичным проектным сроком [4].

Увеличение объема серии возможно за счет использования одного типа установок для объектов различного назначения. При выборе вариантов многоцелевых РУ целесообразно использовать критерий эффективность – стоимость. Он предполагает оптимизацию экономического показателя при ограничении величины комплексного показателя эффективности.

$$\text{Min } Z(X); \text{Э}(Y) \geq \text{Этр}, \quad (2)$$

где Z – затраты, Э – показатель эффективности, Этр – требуемый показатель эффективности, X – характеристики установки, Y – требования, предъявляемые объектами.

В качестве экономического показателя принимаются приведенные затраты в течение всего жизненного цикла. В общем случае они включают затраты на проектирование, на подготовку производства и изготовление РУ, эксплуатацию, включая стоимость ядерного топлива, выгрузки (загрузки), хранение и транспортировку активных зон к месту переработки, обслуживание, базовое обеспечение и ремонт, снятие РУ с эксплуатации и утилизацию. Использование многоцелевых РУ позволяет, в основном, снизить затраты на изготовление за счет увеличения объема серии, при этом могут возрасти затраты, связанные с обеспечением

требований, предъявляемых объектами, для которых ранее не предназначалась разрабатываемые РУ.

Существуют различные данные, позволяющие оценить влияния объема серии на затраты. В частности известны работы [5]-[7], где показано, что стоимость серийных ЯЭУ снижается по сравнению с головной на 30-35%, а по отдельному оборудованию до 50%. В нормативных материалах по определению предельной стоимости строительства АЭС, при выполнении оценок, предлагается снизить затраты при числе блоков равном 4, на 37,5%. В настоящей статье использовалась зависимость, полученная на основании статистической обработки данных по различному оборудованию.

Изменение затрат за счет увеличения объема серии при использовании многоцелевых РУ в общем случае может быть представлено следующей зависимостью:

$$\Delta Z = \sum_{i=1}^{n_1} i^{-0,25} / n_1 - \sum_{i=1}^{n_2} i^{-0,25} / n_2 + Z_{пр}, \quad (3)$$

где n_1, n_2 – число образцов в серии для объектов одного назначения и различного назначения; $Z_{пр}$ – затраты на доработку ЯЭУ в связи с применением блоков для объектов различного назначения.

Сравнение результатов расчета согласно зависимости (3) с данными работ [5]-[7] показывает, что используемые величины затрат в зависимости от объема серии меньше полученных в указанных работах, что свидетельствует о консерватизме результатов оценок. В тоже время следует отметить, что в этих работах не приведены данные по снижению затрат при больших сериях.

В качестве показателя эффективности используют комплексный критерий. Этот критерий может быть представлен в виде функций единичных (групповых) показателей эффективности. Такими функциями являются различные свертки единичных (групповых) показателей. В качестве групповых показателей эффективности могут быть приняты показатели надежности, безопасности, живучести, маневренности, экологической безопасности.

Задача выбора предпочтительного варианта многоцелевой РУ состоит в определении той установки, затраты за жизненный цикл которой будут минимальны при условии обеспечения технических требований (показателей эффективности).

Для определения объема серии рассмотрим данные по количеству действующих реакторных установок различного назначения.

В России в настоящее время работают десять атомных электростанций, имеющих 33 энергоблока с реакторами разных типов. В их числе 17 энергоблоков с водо-водяными реакторами типа ВВЭР, 11 – с канальными реакторами типа РБМК, 4 – с канальными реакторами типа ЭГП-6 и один энергоблок с реактором на быстрых нейтронах типа БН-600 [8].

При оценках использования многоцелевых РУ рассматриваются установки с

корпусными реакторами, число которых 17. В составе судов предусмотрено 15 реакторных установок [9]. Расчетное количество эксплуатируемых в России стационарных и транспортных реакторных установок с корпусными реакторами примем равным 101.

Применение многоцелевых РУ при условии, что ядерные энергетические установки будут далее создаваться на основе РУ АЭС, приведёт в перспективе, при принятом допущении, к увеличению объема серии на 84 единиц, на основе судовых РУ – на 86. Эти данные позволяют оценить снижение затрат при применении многоцелевых РУ. Для определения потерь, связанных с доработкой РУ необходимо оценить перечень основных опытно-конструкторских работ, которые должны быть произведены при изменении подхода к проектированию ядерных установок. К ним, в частности, при использовании в качестве базовой РУ АЭС, могут быть отнесены работы по активным зонам.

Учитывая, что широко распространенным ядерным топливом для РУ атомных электростанций является диоксид урана, представляется целесообразным в перспективе перейти на это ядерное топливо. Об этом свидетельствует опыт проектирования ядерной установки для плавучей АЭС. Недостатком UO_2 является низкая теплопроводность, что приводит к повышению температуры в центре ТВЭЛ и может повлиять на качество переходных процессов. С целью улучшения теплопроводности ВНИИНМ предложено использовать силумин в качестве наполнителя ТВЭЛ [10].

Конкурентоспособность ядерного топлива определяется в первую очередь радиационной стойкостью конструкционных материалов и ураноемкостью. Лучшие мировые и российские показатели топлива активных зон РУ рассмотрены в работе [7].

При использовании в качестве базовой судовой РУ потребуются ОКР по доработке РУ АЭС в части, касающейся технологии изготовления корпусных конструкций, активной зоны и парогенератора. Что касается работ по корпусным конструкциям, то накопленный опыт, как показано в работе ОКБМ по РУ ВБЭР-300, позволяет считать, что масштабный фактор при определенном ограничении мощности не окажет существенного влияния на технологию изготовления. Оценку затрат на ОКР можно провести на основании опыта создания транспортных энергетических установок с использованием органического топлива, поскольку при их создании накоплен опыт использования установок различного назначения. Создание энергетических установок различного назначения при наличии базовой установки позволяет, по опыту разработки двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок, снизить затраты на ОКР примерно в два раза. В таблице 2 приведены данные, необходимые для оценки эффективности различных вариантов многоцелевых РУ.

Таблица 2 – Данные для оценки эффективности различных вариантов многоцелевых РУ

Тип РУ	Количество базовых установок	Возможное увеличение объема серии	Относительное снижение стоимости одной установки за счет увеличения объема серии, %

На базе РУ АЭС	17	84	9.2
На базе РУ судов	15	86	9.2

Таким образом, проведенный анализ показывает, что с точки зрения затрат, обусловленных изменением объема серии и необходимостью проведения дополнительных ОКР, различия между базовыми установками при практическом сохранении используемой технологии незначительно, если считать, что многоцелевые установки являются продолжением серии уже изготовленных. В этом случае в качестве базовой может быть принят любой вариант РУ. Однако экономический эффект при создании новой многоцелевой установки может быть, как показывает опыт дизеле- и газотурбостроения, существенно больше. Если рассматривать, что будет создаваться новый тип многоцелевой ядерной реакторной установки с объемом серии соответствующим современным потребностям (101 РУ), то затраты на одну установку при использовании в качестве аналога, например, транспортной РУ, снизятся до 56 % от стоимости головной РУ, предназначенной для использования в составе одного из рассматриваемых объектов.

Следует иметь в виду и другие факторы, которые не поддаются численной оценке. К их числу относятся необходимость загрузки производственной базы, возможность расширения числа научно-исследовательских и проектных организаций, привлекаемых к работе по совершенствованию реакторных установок. Наиболее приемлемым представляется создание базовой модульной РУ на основе технических решений, принятых при создании транспортных РУ. Эти установки достаточно хорошо отработаны. Они имеют возможность широкого использования естественной циркуляции теплоносителя, что повышает безопасность РУ.

Необходимо отметить, что работы по применению установок различного назначения выполняются ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО ОКБ «Гидропресс», ОАО «НИКИЭТ» и другими организациями, имеющих большой опыт в создании транспортных реакторных установок.

ОАО «ОКБМ Африкантов» разработан проект реакторной установки ВБЭР-300, имеющей тепловую мощность 917МВт и электрическую 325 МВт [11]. При разработке проекта использовались технические решения, отработанные при создании транспортных установок. Продолжительность строительства головного блока составляет 4 года. Такая установка вполне может использоваться в качестве базовой для объектов различного назначения. Тем более, что проектантом предлагается разработка на основе базовой установки мощностного ряда электрической мощностью от 150 до 600 МВт. ОАО «Гидропресс», на основе 40-летнего опыта разработки и эксплуатации транспортных установок с жидкометаллическим теплоносителем, выполнен проект установки электрической мощности 100МВт [12].

Кроме рекомендаций, появившихся в России, по созданию АЭС небольшой мощности на базе транспортных ЯЭУ известны предложения зарубежных фирм по строительству

модульных АЭС средней мощности. Создание модуля электростанции, как уже отмечалось, требует меньших затрат финансов и времени. В то же время затраты на строительство последующих модулей будут окупаться за счет генерируемой электроэнергии введенных в действие модулей. Электрическая мощность модуля (Nэл) может составлять около 300–500 МВт. Эта мощность согласуется с мощностью разрабатываемых в России модульных АЭС и выбирается из следующих соображений:

1. Удельная стоимость капитальных затрат для разных электростанций с реакторами большой мощности (от 954 до 1650 МВт), как уже отмечалось, значительная, и, по данным строительства электростанций, колеблется от 56 до 211 тыс.руб./кВт [4]. В среднем полная стоимость АЭС, мощностью превышающей 1000 МВт, может составлять от 290 до 360 млрд. руб. Данные по модульным реакторам малой мощности (Проект Westinghouse SMR) приведены в работе [13]. Для реакторов малой мощности принималось, что их основные свойства соответствуют свойствам реакторов AP-1000, включая пассивные системы безопасности.

2. Полная стоимость АЭС мощностью 225 МВт составляет 35–70 млрд. руб.

3. Удельные капитальные затраты АЭС с реакторами AP-1000 составляют 120 тыс.руб./кВт (т.е. находятся в области значений отмеченных выше).

4. Удельные капитальные затраты АЭС мощностью 225 МВт (оценка) – 67 тыс.руб./кВт

5. Срок строительства АЭС с реакторами мощностью 225 МВт – 3 года.

6. Срок строительства АЭС с реакторами мощностью 1000-1200 МВт – 4 года.

Переходя к рассмотрению затрат на атомные электростанции необходимо учитывать, что стоимость реакторной установки составляет около 20% от стоимости АЭС. Однако тенденции, связанные с зависимостью стоимости реакторных установок от объема серии сохраняются и для АЭС, что подтверждается данными работы [3]. Данные из источников, представленные в иностранной валюте, пересчитаны по текущему курсу и представлены в рублях.

Рассмотрим вопрос об окупаемости электростанций с реакторами малой и большой мощности, используя для сравнения РУ AP-1000 и ее аналог малой мощности. Необходимо иметь в виду, что стоимость электроэнергии установок малой мощности будет выше, чем большой. Однако, это не приведет к значительному снижению эффекта от применения модульных РУ.

Зависимость для определения времени окупаемости капитальных затрат может быть представлена в следующем виде:

$$T_o = \frac{C \sum_{i=1}^n i^{-0,25}}{8760N (1+E)^{\tau} \text{КИУМ} (c_p - c_c)}, \quad (4)$$

где T_o – время окупаемости, лет, N – мощность, кВт, C – капитальные затраты, E – коэффициент дисконтирования, τ – период между моментом начала и завершением

строительства, КИУМ – коэффициент использования установленной мощности, c_c , c_p – себестоимость и рыночная стоимость электроэнергии, руб./кВт.ч.

Капитальные затраты на рассматриваемую АЭС большой мощности составят 120 млрд. руб., на АЭС малой мощности – 15 млрд. руб. Сроки строительства соответствуют указанным выше. Коэффициент дисконтирования принят 5%. Величина КИУМ принята равной 0.95.

Для определения срока окупаемости необходимы данные по рыночной стоимости и себестоимости электроэнергии.

Себестоимость электроэнергии в 2010г. на АЭС большой мощности составляла от 1,14 до 2,47 руб./кВт час с учетом дисконтирования затрат. Самая низкая стоимость – в Чешской Республике, самая высокая – в Японии. Среднюю цену примем равной 1,8 руб./кВт час. По оценкам [14] и [15] себестоимость электроэнергии установок малой мощности может составить при оптимистическом подходе 3,24 руб./кВт.час. Цена зависит от обогащения, срока службы, КИУМ, вида топлива (МОХ или несмешанное).

Рыночная стоимость электроэнергии также колеблется в широких пределах и существенно зависит от района потребления, времени потребления. Среднюю рыночную стоимость по данным департамента энергетики США за 2007-2008г. примем, отнеся ее к 2010 году, равной 4,32 руб./кВт час.

Если поставлена задача значительного увеличения мощности АЭС и определены реальные сроки решения этой задачи, то строительство АЭС должно осуществляться без учета сроков окупаемости каждого блока. При этом должны учитываться сроки окупаемости всех вновь строящихся блоков. Учет сроков окупаемости каждого блока АЭС приводит к существенному увеличению сроков строительства.

На основании приведенной зависимости время окупаемости капитальных затрат составит для АЭС большой мощности – 6 лет, для станции малой мощности – 7 лет.

Предположим, необходимо построить АЭС общей мощностью 10000 МВт (10 атомных станций мощностью 1000 МВт каждая или 40 станций мощностью 225 МВт). Для упрощения оценок примем, что 4 АЭС малой мощности эквивалентны одной АЭС большой мощности.

Если принять сценарий, при котором строительство каждой новой АЭС мощностью 1000 МВт или 4х блоков мощностью по 225 МВт осуществляется после окупаемости капитальных затрат (сценарий 1), то каждый новый блок мощностью 1000 МВт должен вводиться через 10 лет, соответственно новые блоки мощностью 225 МВт – также примерно через 10 лет. При этом серийность АЭС большой мощности не обеспечивается, а объем серии АЭС малой мощности составляет 4 АЭС. Серийность рассматривается применительно к непрерывному производству.

Рассмотрим второй сценарий, при котором строительство каждого нового блока мощностью 1000 МВт происходит после окупаемости капитальных затрат и накопления средств для строительства каждого последующего блока. Такой же сценарий примем для четырех модульных станций.

При принятом сценарии для АЭС большой мощности потребуются только первоначальные капитальные затраты в сумме 120 млрд. руб. Для модульных реакторов капитальные затраты для создания АЭС той же суммарной мощности составят 60 млрд. руб. Срок создания АЭС мощностью 1000 МВт составит 16 лет, малой мощности – 17 лет.

При сопоставлении сроков окупаемости не учитывалось преимущество АЭС малой мощности заключающееся в том, что объем серии составляет в рассматриваемых случаях 4 блока. Согласно работе [7] снижение затрат при этом составляет 37%. Соответственно и сроки окупаемости снижаются на эту величину и будут составлять при первом сценарии 7 лет и при втором сценарии 12 лет, т.е. меньше чем при строительстве реакторов большой мощности.

Таким образом, применение модульных реакторов позволит (при наличии мощностного ряда) использовать многоцелевые реакторные установки, увеличит объем серии таких установок, снизить капитальные затраты и сроки окупаемости реакторных установок. Косвенными результатами широкого внедрения модульных реакторов является повышение их надежности и безопасности, упрощение проектных работ и отработки, а также повышение рентабельности заводов – изготовителей.

При анализе экономической предпочтительности модульных реакторов необходимо учитывать не только капитальные затраты, но и затраты на эксплуатацию. При этом сроки окупаемости АЭС возрастают. По имеющимся данным, период возврата капиталовложений составляет 10 – 20 лет [4]. Непосредственные расходы на сооружение АЭС составляют 60-70% от общих затрат [3]. Капитальные затраты включают несколько составляющих. Чистая стоимость АЭС обычно включает затраты на инжиниринговые работы, заказ оборудования и строительство [3].

Годовые эксплуатационные расходы для АЭС большой мощности могут составлять в среднем 1980 млн. руб., для АЭС малой мощности – 610 млн. руб. (стоимость топливного цикла без учета затрат на обращение с РАО и персонал) [3].

Доход в год при разности между рыночной ценой и себестоимостью 2,52 руб./кВт.ч составит 21 млрд.руб. для АЭС большой мощности, для АЭС малой мощности (при разности между рыночной ценой и себестоимостью 1,08 руб. на кВт) – 2 млрд.руб. С учетом затрат на эксплуатацию доход в год составит в среднем 18,9 млрд.руб. для АЭС большой мощности, для АЭС малой мощности в среднем 1,4 млрд.руб.

При указанной цене за кВт час срок окупаемости АЭС большой и малой мощности в среднем будут составлять около 20 лет. Полученные данные по срокам окупаемости соотносятся с данными, приведенными выше.

Выводы

1. Применение многоцелевых реакторных установок, позволяет увеличить объем серии с соответствующим снижением затрат, повысить надежность, безопасность АЭС и рентабельность заводов – изготовителей.

2. В качестве базовых многоцелевых реакторных установок могут быть использованы

модульные реакторы, разрабатываемые с использованием технических решений, реализованных при создании транспортных реакторных установок.

3. Расширение использования модульных реакторов позволит снизить капитальные затраты и сократит сроки строительства АЭС. Это даст возможность осуществлять более быстрый ввод в действие источников электроэнергии постепенно наращивая их мощность.

4. При необходимости значительного увеличения мощности АЭС в ограниченные сроки следует учитывать окупаемость всего комплекса вновь вводимых электростанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Саркисов А.А.** Новое направление развития – ядерная энергетика малой мощности. —Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 5, с. 243—245.
2. **John M. Deutch.** Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power An Interdisciplinary MIT Study.— Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
3. **Соколова И.Д.** Оценка стоимости производства электроэнергии на новых АЭС.— Атомная техника за рубежом, 2011, №12, с. 12—24.
4. **Соколова И.Д., Блинова И.В.** Стоимость и финансирование новых АЭС.— Атомная техника за рубежом, 2011, №11, с. 11—24.
5. **Митенков Ф.М.** Экономический анализ опыта серийного изготовления и эксплуатации транспортных ЯЭУ.— В сб.: Третья межотраслевая конференция «КРУ-2006». Обнинск, 2006. с. 214—217.
6. **Митенков Ф.М., Авербах Б.А., Антюфеева И.Н.** Экономический эффект при создании и эксплуатации серийных транспортных ЯЭУ.—Атомная энергия, 2007, т. 102, вып. 1, с. 39—43.
7. **Петрунин В.В. Гуреева Л.В., Лепехин А.Н., Удалищев С.В.** Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности.— В сб.: Международная конференция «Атомные станции малой мощности – актуальное направление развития атомной энергетике». Москва, 2013, с 48—56.
8. **Воронин Л.М.** Перспективы развития атомной энергетике России в XXI веке.— Теплоэнергетика, 2000, №10, с. 14—18.
9. **Панов Ю.К., Полуничев В.И., Залугин В.И., Шаманин И.Е.** Об улучшении технических параметров энергетических установок перспективных атомных ледоколов. —Судостроение, 2005, №1, с.48—54 .
10. **Солонин М.И.** Состояние и перспективы развития ядерного топливного цикла мировой и российской ядерной энергетике.—Атомная энергия, 2007, т. 98, вып. 6, с. 448—460.
11. **Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Гуреева Л.В., Скородумов С.Е.** Реакторные установки разработки ОАО «ОКБМ Африкантов» для атомных станций малой и средней мощности. —Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 5, с. 285—290.
12. **Тошинский Г.И., Комлев О.Г., Мартвнов П.Н. и др.** СВБР для региональной энергетике.—Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 5, с. 290—293.
13. **Р. Феттерман.** Проект Westinghouse SMR.— Пер. с англ. Ю. П. Елагина. Атомная техника за рубежом, 2012, № 6, с.25—32 .
14. **Щепетина Т.Д.** Система АЭС малой мощности, как фактор безопасности национальной безопасности России.— Атомная стратегия -2009,№5, с.15—21.

15. Митенков Ф.М. К вопросу актуальности малой атомной энергетики для перспективного развития прибрежной Арктики и Дальневосточного региона.— Арктика экология и экономика, 2011, №4, с.18—21 .

Дата поступления статьи: 18 апреля 2016 года.