

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ЭНЕРГООБЛОКОВ АЭС НА БАЗЕ РЕАКТОРНЫХ МОДУЛЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ И РЕАКТОРА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

А.А. Андрианов*, И.С. Купцов*, Т.А. Осипова*, О.Н. Андрианова**

** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ*

249040, г. Обнинск Калужской обл., Студгородок, 1

***АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

249033 Россия, г. Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1



Разработки и анализ возможных применений реакторов малой и средней мощности актуальны для электрических и неэлектрических применений как на ближайшую, так и на более отдаленную перспективу. Представлен сравнительный анализ инвестиционной привлекательности проекта по созданию энергоблока АЭС на базе реакторных модулей малой и средней мощности и реактора большой мощности, в том числе с учетом различных схем кредитования. Даны рекомендации по направлениям повышения инвестиционной привлекательности создания энергоблока АЭС на базе реакторных модулей малой и средней мощности. Анализ инвестиционной привлекательности проекта выявил, что по показателям полных или удельных дисконтированных затрат экономическая привлекательность модульной концепции компоновки АЭС отсутствует. По показателям чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности и срока окупаемости говорить о целесообразности концепции модульной компоновки АЭС можно в том случае, если прогнозируемый эффект обучения будет наблюдаться при сооружении модулей и масштабный фактор будет не менее 0.5. Тогда экономически целесообразным оказывается сооружение АЭС из небольшого количества модулей средней мощности. Если же масштабный фактор будет не менее 0.6, то можно говорить о целесообразности компоновки АЭС на базе реакторных модулей меньшей мощности. Анализ влияния различных схем кредитования продемонстрировал, что в относительном измерении изменения показателей экономической эффективности сопоставимы при реализации модульного принципа компоновки АЭС и реактора большой мощности.

Ключевые слова: реакторы малой и средней мощности, АЭС модульного типа, показатели экономической эффективности, экономический риск.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих регионах мира возобновился интерес к разработкам и анализу возможных применений реакторов малой и средней мощности (РМСМ). По классифика-

© А.А. Андрианов, И.С. Купцов, Т.А. Осипова, О.Н. Андрианова, 2018

ции МАГАТЭ реакторы с эквивалентной электрической мощностью до 300 МВт относят к маломощным, а от 300 до 700 МВт – к реакторам средней мощности. Они представляют интерес для электрических и неэлектрических применений как на ближайшую (обессоливание морской воды, централизованное отопление), так и на более отдаленную перспективу (производство водорода, конверсия органических топлив). На различных стадиях разработки находятся около 20-ти проектов перспективных РМСМ в Аргентине, Индии, Китае, России, США, Южной Корее [1 – 4].

Достоинства этой концепции хорошо известны: относительно небольшие абсолютные затраты на реализацию проектов и, как следствие, меньший финансовый риск; при модульной конструкции есть возможность постепенного наращивания мощностей и создания АЭС гибкой мощностной конфигурации; блоки с РМСМ могут располагаться ближе к потребителям; для некоторых малых реакторов возможна эксплуатация без перегрузки на площадке, что позволяет упростить обращение с ОЯТ и ВАО [5 – 7].

Обзору концепций и текущему состоянию дел в области РМСМ в мире посвящаются регулярно издаваемые публикации МАГАТЭ, доклады, подготовленные под эгидой Агентства по ядерной энергии ОЭСР [1 – 3]. В этих работах наравне с рассмотрением технических аспектов, анализом возможных ниш применения РМСМ значительное внимание уделяется вопросам их конкурентоспособности и экономической эффективности [5 – 7], а также развитию методического и программного инструментария для таких оценок. Потребность в развитии этих средств обусловлена тем, что в условиях либерализации энергетических рынков хозяйствующим субъектам предоставлена самостоятельность в принятии решений, приводящих к максимизации прибыли. Поэтому при оценке эффективности инвестиционных проектов в энергетике стали использоваться иные принципы и критерии, отличные от тех, которые применялись в централизованной экономике, где основным критерием эффективности был минимум общественно необходимых затрат [8 – 11]. Основной теорией выбора эффективных инвестиционных проектов стала теория денежных потоков, где критериями эффективности принимаемых решений являются чистая текущая стоимость, дисконтированные затраты, внутренняя норма доходности, сроки окупаемости инвестиций и ряд других [10, 11].

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭКОНОМИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ РМСМ

Главной причиной слабой экономики РМСМ является так называемый «эффект экономики на масштабе» (эффект масштаба), проявляющийся в том, что с уменьшением мощности блока без внесения в него принципиальных изменений происходит увеличение удельных капитальных затрат [5 – 7]. В то же время известны и факторы, позволяющие смягчить неблагоприятные последствия эффекта масштаба – прежде всего это возможное упрощение конструкции реактора. В ряде работ показано, что интегральная компоновка первого контура приводит к выигрышу в стоимости в 0.85 раз. Если на площадке будет установлено сразу несколько малых реакторов, то для них можно использовать некоторые не связанные с безопасностью общие системы, сократить затраты на лицензирование. Известен также и «эффект обучения» – строительство и эксплуатация каждого последующего блока будет обходиться дешевле, чем предыдущего. Оценки показывают, что на пятом – шестом реакторе можно ожидать уменьшения стоимости строительства на 25 – 30% по сравнению с первым блоком. Дополнительный выигрыш связан с более короткими сроками сооружения РМСМ, а также удешевлением АЭС при ее реализации в плавучем варианте [5 – 7].

Снижение инвестиционных рисков при модульной АЭС возможно, если строить процесс ввода мощностей по принципу «модуль за модулем», не дожидаясь достижения планируемой полной мощности АЭС. При этом требуемые инвестиции будут распределены во времени, иметь более привлекательный инвестиционный профиль, в то время

как для эквивалентного им по мощности большого блока деньги необходимы сразу. Постепенное наращивание мощностей снижает требуемые начальные инвестиции и уменьшает размер капитала, находящегося в риске [6, 7].

Для корректной оценки конкурентоспособности и экономической эффективности РМСМ требуется учет всей совокупности факторов, как положительно (мультимодульность, заводское изготовление модулей и др.), так и отрицательно (эффект масштаба) влияющих на их экономическую конкурентоспособность. Анализ концепций требует сбора данных по капитальным затратам на строительство, топливо, операционные расходы, а в случае проведения оценки с учетом внешнего энергетического и экономического окружения – данных о технологиях-конкурентах и внешней среде.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРОЕКТОВ РМСМ

Оценка конкурентоспособности и экономической эффективности РМСМ является комплексной задачей, включающей в себя проведение экономической оценки не только одной АЭС, но и сценариев развертывания с несколькими последовательно построенными станциями, в том числе с учетом внешнего энергетического и экономического окружения. Особое внимание следует уделить оценке влияния неопределенностей основных технико-экономических параметров на показатели экономической эффективности и инвестиционных рисков для повышения степени обоснованности заключений, а также учету многокритериального характера задачи [8 – 11].

В основе оценки конкурентоспособности и экономической эффективности РМСМ с использованием показателей экономической эффективности лежит методология оценки эффективности инвестиционных проектов, предполагающая расчет и сравнение объема предполагаемых инвестиций и будущих денежных поступлений [12]. Общая логика анализа с использованием формализованных показателей заключается в необходимости сравнивать величину требуемых инвестиций с прогнозируемыми доходами [13, 14].

Оценка экономической эффективности и конкурентоспособности проектов РМСМ, основанная на показателе удельных дисконтированных затрат – Levelized Cost (LC) [15, 16], получила наибольшее распространение в связи с ее простотой, обусловленной наименьшим объемом требуемых для ее проведения исходных данных. В частности, на основании данного показателя построена методология экономической оценки для систем четвертого поколения G4-ECONS [17]. В рамках данной методологии для количественной оценки экономической эффективности и ранжирования проектов используется показатель удельных дисконтированных затрат производства электроэнергии. Показатель LC определяет такой тариф на продаваемую электроэнергию, при котором суммарная дисконтированная выручка от продажи энергии точно равна сумме дисконтированных общих затрат (табл. 1 [18]).

При построении модели оценки конкурентоспособности и экономической эффективности РМСМ необходимо учитывать известные взаимосвязи между техническими характеристиками и стоимостными параметрами, отображающими особенности РМСМ (эффекты обучения и пр.). Основными показателями экономической эффективности являются чистый дисконтированный доход, дисконтированные затраты, внутренняя норма доходности, дисконтированный срок окупаемости, удельные дисконтированные затраты (см. табл. 1).

В зависимости от постановки задачи необходимо использовать тот или иной набор критериев эффективности. Так, например, в случае ориентации на внешнего инвестора главным показателем является чистый дисконтированный доход NPV , зависящий от неопределенного тарифа на электроэнергию. В случае ориентации на собственника (что характерно для современных экономических условий России, когда строительство АЭС, в основном, производится из средств государства), главным показателем оценки экономической эффективности проектов АЭС обычно принимаются интегральные дискон-

тированные затраты PV . В общем случае необходимо принимать во внимание весь спектр показателей эффективности, которые отражают различные аспекты проекта.

Таблица 1

Показатели экономической эффективности

Показатель эффективности	Расчетная формула
Чистый дисконтированный доход (NPV – Net Present Value)	$NPV = \sum_{t=T_1}^{T_2} \frac{D_t}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t}$
Дисконтированные затраты (PV – Present Value)	$PV = \sum_{t=0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t}$
Внутренняя норма доходности (IRR – Internal Rate of Return)	Процентная ставка, при которой дисконтированный доход (NPV) равен нулю
Дисконтированный срок окупаемости (DPP – Discounted Payback Period)	Период времени, за который доходы, генерируемые инвестициями, с учетом дисконтирования покроют затраты на инвестиции
Удельные дисконтированные затраты (LC – Levelized Cost)	$LC = \sum_{t=0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t} / \sum_{t=T_1}^{T_2} \frac{W_t}{(1+d)^t}$
D_t – текущие доходы в моменты времени t ; R_t – текущие денежные расходы в моменты времени t ; W_t – текущая энерговыработка; d – норма дисконтирования; T_1 – длительность строительства, лет; T_2 – длительность жизненного цикла проекта, лет; t – дискретное время	

Таблица 2

Исходные данные

Внешние условия	
Тариф на электроэнергию с шин АЭС, цент/кВт·ч	3,50
Цена ядерного топлива (долл. за кг U)	600
КИУМ	0,8
Норма дисконта, %	5
Ставка налога с прибыли, %	24
Технико-экономические параметры блока	
Установленная электрическая мощность, МВт	1200
Срок строительства T_c , лет	6
Удельная стоимость строительства, долл./кВт	1500
Постоянные расходы на эксплуатацию, ремонт, млн. долл. в год	30,00
Глубина выгорания топлива, МВт(т)сут/кгU	43,00
КПД установки	0,334
Капиталовложения постоянные по годам, %	16,7
Схема финансирования	
Доля в общих капиталовложениях, %	0 – 100
Срок возврата кредита, лет	15 – 20
Процентная ставка кредита, %	7 – 10

В таблице 2 приведен пример использования предложенного подхода для проведения сравнительного анализа инвестиционной привлекательности проекта по созданию

энергоблока АЭС на базе модулей РМСМ (модульный принцип компоновки АЭС) и реактора большой мощности с целью формулировки рекомендаций по направлениям повышения инвестиционной привлекательности создания энергоблока АЭС на базе реакторных модулей. Для решения этой задачи необходимо оценить показатели эффективности инвестиционного проекта по строительству АЭС с учетом характерных особенностей РМСМ и схемы его финансирования. Разработанные модели наряду с учетом основных факторов, влияющих на экономические показатели РМСМ, учитывают возможность финансирования проекта и с привлечением внешних кредитов.

Данный подход позволяет проводить анализ в многокритериальной оптимизационной постановке. Под этим подразумевается возможность выбора сценария развертывания системы РМСМ, обеспечивающего эффективность по совокупности показателей экономической эффективности и с учетом ограничений по другим. Необходимо определить мощность одного реакторного модуля и моменты ввода модулей в эксплуатацию.

СРАВНЕНИЕ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС НА БАЗЕ МОДУЛЕЙ РМСМ И РЕАКТОРА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Эффект экономии на масштабе, заключающийся в том, что с повышением мощности блока снижаются затраты на установленный киловатт, работает в том случае, если один реакторный проект подобно самому себе уменьшается или увеличивается по мощности. Установлена следующая корреляция между капитальными затратами и мощностью блока [5 – 7]:

$$\text{Капитальные_затраты}(P_1) = \text{Капитальные_затраты}(P_0) \cdot (P_1/P_0)^n,$$

где фактор масштаба n лежит в пределах от 0.4 до 0.7. Разные реакторные технологии характеризуются своим масштабным фактором. Отметим, что увеличение его значения вызывает снижение чувствительности затрат к мощности блока. В частности, при значении масштабного фактора, равного единице, будет отсутствовать эффект экономии на масштабе, и капитальные затраты перестанут зависеть от мощности блока. В работе [6] с учетом не прямых затрат рекомендуется значение 0.51.

Для иллюстрации на рис.1 показан типичный график чистой кумулятивной текущей стоимости на жизненном цикле инвестиционного проекта в миллионах долларов. Рассмотрены следующие сценарии развертывания системы реакторов: строительство одного блока мощностью 1200 МВт, двух блоков мощностью 600 МВт и четырех блоков мощностью 300 МВт. Последние два варианта строятся по принципу «модуль за модулем». Оценки сделаны в предположении, что $n = 0.6$ без учета эффекта обучения.

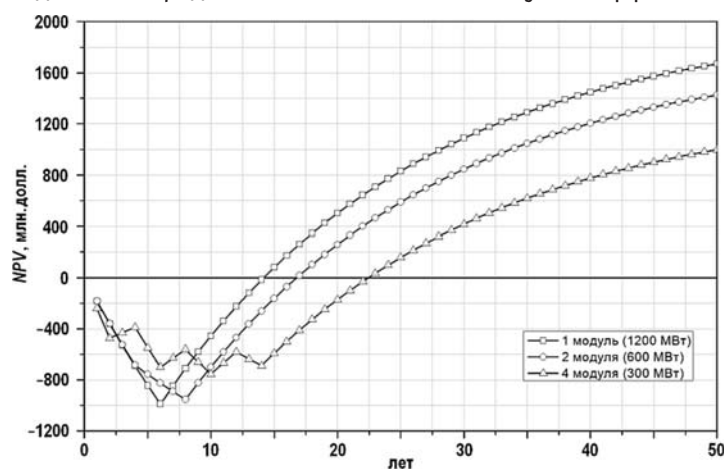


Рис.1. Изменение показателя NPV во времени

На рисунке 1 можно выделить два участка: поток накопленных капитальных вложений в строительство объектов при заданной длительности строительства и чистая кумулятивная текущая стоимость на участке эксплуатации объекта от начала эксплуатации объекта до конца жизненного цикла. Чистая кумулятивная текущая стоимость в 50-м году составит соответственно 1670, 1426, 997 млн. долл., что и определяет значение показателя NPV .

Из рисунка может быть определен срок окупаемости объекта (DPP) как точка пересечения накопленного потока с горизонтальной осью, где $NPV = 0$. Срок окупаемости соответствующих инвестиционных проектов составляет ~ 14, 17, 22 лет. Поскольку инвестор начнет получать доход от проекта только при временах больших, чем срок окупаемости, очевидно, что срок окупаемости должен быть меньше длительности жизненного цикла. Внутренняя норма доходности проекта IRR , т.е. процентная ставка, при которой $NPV = 0$, составляет для рассмотренных сценариев соответственно 11.7, 10.5 и 9.2%. Считается, что чем выше значение IRR и больше разница между ее значением и заданной ставкой дисконта, тем устойчивее данный проект.

Если инвестором является собственник, например, государство, то основным показателем экономической эффективности обычно служат дисконтированные затраты PV , которые для рассматриваемых инвестиционных проектов составляют соответственно 1609, 1825 и 1878 млн. долл. При этом показатель удельных дисконтированных затрат LC составит 1.38, 1.56 и 1.76 центов за кВт·ч.

Как видно из представленных оценок в рамках сделанных предположений, строительство одного блока мощностью 1200 МВт представляется в большей степени экономически привлекательным. Тем не менее, реализация модульной концепции сооружения АЭС на базе модулей РМСМ содержит резервы, способные повысить их конкурентоспособность за счет учета факторов, определяющих специфику РМСМ (дополнительно к традиционным сильным сторонам модульной концепции, к которым относят высокое качество изготовления и сборки основного оборудования непосредственно на заводе, короткие сроки изготовления, возможность железнодорожной транспортировки реакторных блоков и др.). Представляется целесообразным проведение вариантных расчетов, направленных на выявление областей, в которых реализация модульной концепции оказывается выгодной. Для решения этой задачи рассмотрены следующие варианты: возможность сооружения вплоть до 20-ти блоков, фактор масштаба n лежит в пределах от 0.4 до 0.7, оценки проводятся как с учетом (по методике работы [6]), так и без учета эффекта обучения, учтена возможность одновременного сооружения нескольких реакторных модулей.

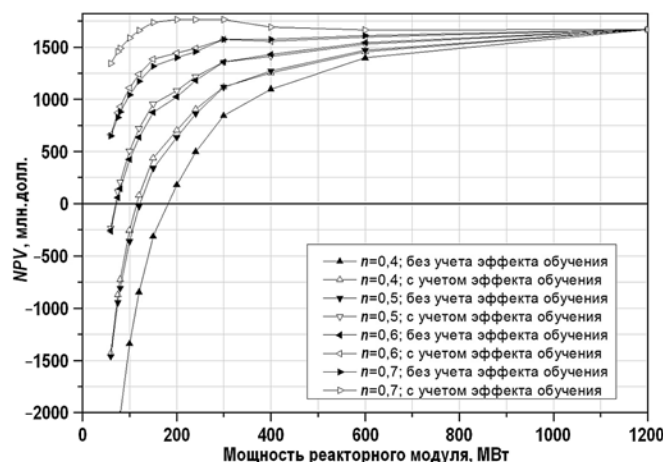


Рис. 2. Чистый дисконтированный доход

На рисунке 2 представлена зависимость чистого дисконтированного дохода от мощ-

ности реакторного модуля и различных предположений о величине фактора масштаба как с учетом, так и без учета эффекта обучения. Очевидно, что с увеличением фактора масштаба и при учете эффекта обучения чистый дисконтированный доход будет расти, поскольку снижаются капитальные затраты. Если дополнительно будет осуществляться одновременное возведение реакторных модулей, то чистый дисконтированный доход для системы РМСМ может оказаться выше, чем для реактора большой мощности (см. рис. 2). Это будет сопровождаться увеличением полных дисконтированных капитальных затрат.

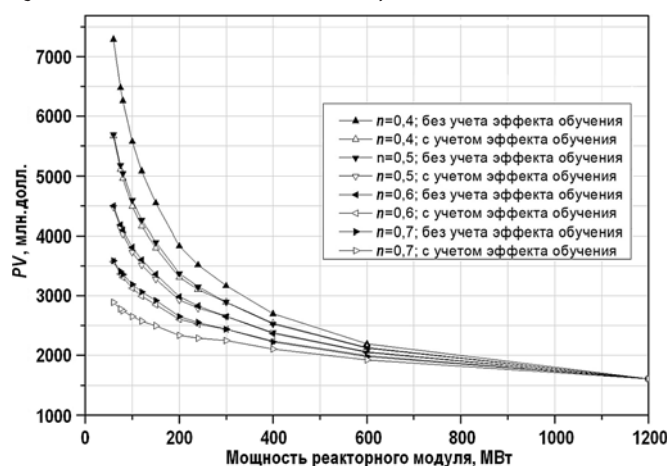


Рис. 3. Дисконтированные затраты

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость дисконтированных затрат от мощности реакторного модуля. В отличие от чистого дисконтированного дохода дисконтированные затраты при любом значении фактора масштаба снижаются при увеличении мощности блока и в пределе при факторе масштаба, равном единице, сравниваются со значением затрат для реактора большой мощности.

Отметим, что эффект обучения эквивалентен увеличению фактора масштаба на 0.1. Значения чистого дисконтированного дохода меньшего нуля, говорит об экономической непривлекательности соответствующего инвестиционного проекта.

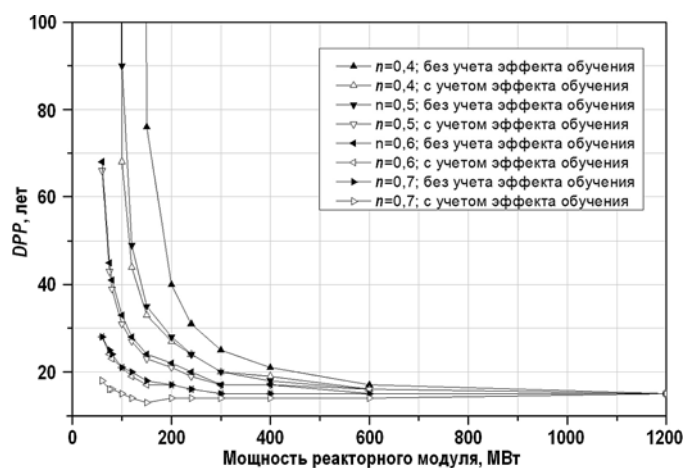


Рис. 4. Дисконтированный срок окупаемости

Предельные параметры проекта (дисконтированный срок окупаемости и внутренняя норма доходности), являющиеся важными дополнительными оценками его экономической эффективности и устойчивости, представлены соответственно на рис. 4 и 5 в зависимости от мощности модуля. Можно утверждать, что даже при низких значениях фак-

тора масштаба строительство АЭС с небольшим числом модулей (из двух – трех модулей) может быть по экономическому эффекту, определяемому данными параметрами, сопоставимым с сооружением одного реактора большой мощности. Увеличение фактора масштаба и эффект обучения делают экономически привлекательным дальнейшее уменьшение мощности модуля.

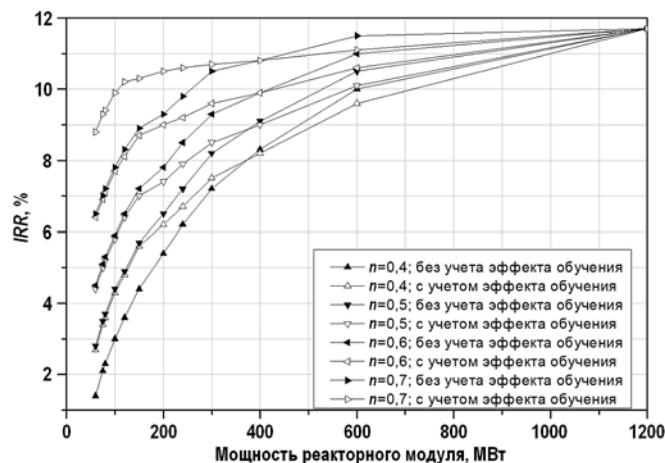


Рис. 5. Внутренняя норма доходности

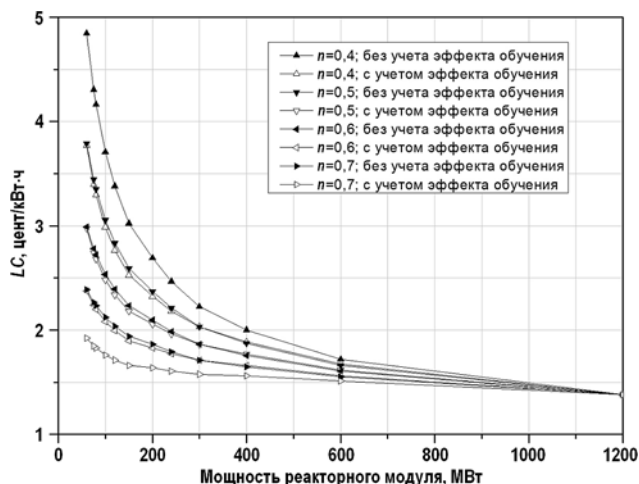
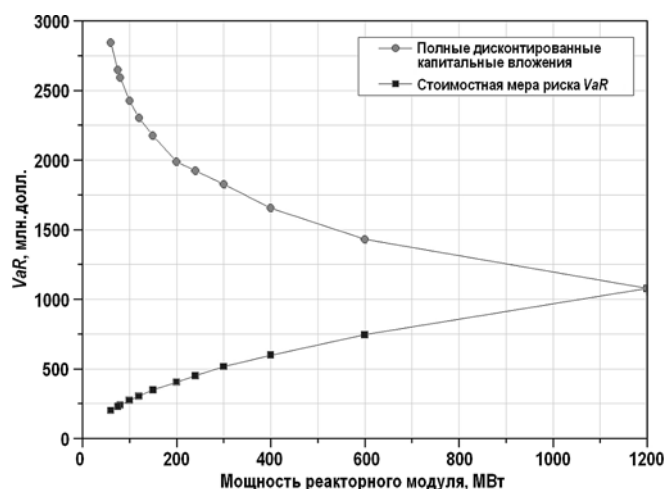


Рис. 6. Удельные дисконтированные затраты

Рисунок 6 иллюстрирует зависимость удельных дисконтированных затрат от мощности модуля. С ростом мощности блока удельные дисконтированные затраты снижаются и достигают наименьшего значения в 1,5 цента за один кВт·час для реактора мощностью 1200 МВт. Для модулей меньшей мощности значения индикатора возрастает до 5-ти центов за кВт·час. Как видно из рис. 3 и 6, показатели полных и удельных дисконтированных затрат не демонстрируют экономическую привлекательность модульной концепции во всей области возможных мощностей реакторных модулей – с ростом мощности реакторного модуля данные показатели монотонно убывают.

Одним из аргументов в пользу РМСМ является то, что развертывание ядерно-энергетических систем на их основе позволяет снизить риски, связанные с потерей капитальных вложений [3]. В качестве меры риска потери капитальных вложений может быть использована концепция стоимостной меры риска – Value at Risk (*Var*) [11]. *Var* – это выраженная в денежных единицах оценка величины убытков, которые не превысят ожидаемые потери с заданной вероятностью, равной уровню доверия α .

Рис. 7. Стоимостная мера риска – VaR

На рисунке 7 приведены в зависимости от мощности одного реакторного модуля величины убытков, которые при уровне доверия 99% не будут превышены (значение VaR), а также полные дисконтированные капитальные затраты. Оценки сделаны при условии, что ведется строительство по принципу «модуль за модулем», вероятность срыва сооружения одного модуля принята равной 0.01%. Расчеты демонстрируют, что показатель стоимостной меры риска VaR при низких вероятностях срыва сооружения модуля снижается при уменьшении его мощности.

По показателям затрат (полные или удельные дисконтированные затраты) экономическая привлекательность модульной концепции отсутствует. По показателю чистого дисконтированного дохода и предельным параметрам (внутренняя норма доходности, дисконтированный срок окупаемости) говорить о целесообразности концепции модульной компоновки АЭС можно в том случае, если прогнозируемый эффект обучения будет наблюдаться при сооружении модулей и масштабный фактор будет не меньше 0.5 (в [6] рекомендуется значение 0.51). В этом случае экономически целесообразным оказывается сооружение АЭС из небольшого количества модулей средней мощности. Если масштабный фактор будет не меньше 0.6, то можно говорить о целесообразности компоновки АЭС из реакторных модулей меньшей мощности.

Поскольку задача выбора оптимальной стратегии развертывания системы РМСМ (определение мощностей реакторных модулей и сроков их ввода в эксплуатацию) в общем случае является многокритериальной, то необходимо использовать для ее решения методы поддержки принятия решений при многих критериях [18]. В качестве основных критериев целесообразно использовать показатели чистого дисконтированного дохода NPV и стоимостной меры риска VaR . Решение задачи заключается в поиске компромиссных вариантов развертывания системы РМСМ, которые, с одной стороны, максимизировали бы чистый дисконтированный доход, с другой – минимизировали величину стоимостной меры риска VaR , с последующим выбором из этих вариантов наиболее приемлемого.

В связи с многообразием возможных вариантов реализации стратегии для их сокращения и выбора наиболее приемлемых необходим предварительный отбор компромиссных (недоминируемых) вариантов, для которых улучшение значения одного показателя будет достигаться ухудшением значения другого. «Северо-западная» граница облака точек в пространстве индикаторов NPV и VaR представляет собой кривую критериальных замещений, характеризующую меру потерь в значении од-

ного показателя за счет приобретения в значении другого, а соответствующие сценарии, лежащие на этой кривой, – компромиссные сценарии. Два крайних варианта ограничивают множество рассмотренных сценариев. Наибольший риск и при этом наибольший чистый дисконтированный доход может быть получен при сооружении реактора большой мощности (1077 и 1670 млн. долл. соответственно). Развертывание серии реакторов малой мощности (мощность модуля 60 МВт и сценарий последовательного запуска по два модуля) приводит к уменьшению чистого дисконтированного дохода до 670 млн. долл. (в 2.5 раза) при снижении рисков потерь инвестиций, характеризуемых показателем VaR , до уровня 200 млн. долл. (в 5.4 раза) по сравнению с вариантом на основе сооружения реактора большой мощности. Остальные компромиссные сценарии заключены между этими двумя предельными вариантами.

Окончательный выбор наиболее приемлемого варианта из набора компромиссных следует делать на основании анализа кривой критериальных замещений чистого дисконтированного дохода и стоимостной меры риска, принимая во внимание дополнительный анализ альтернатив с использованием других показателей эффективности и экспертных оценок, а также всего множества графической и атрибутивной информации и учётом результатов анализа на чувствительность. Подобного рода анализ позволит не только осуществить выбор сценария (мощность одного модуля и сроки ввода модулей в эксплуатацию), обеспечивающего приемлемое значение одного из показателей при заданном ограничении на другой, но и выработать рекомендации по направлениям повышения экономической эффективности системы.

Сопоставим влияние привлечения заемного капитала на значения показателей экономической эффективности для модульной АЭС на базе РМСМ и реактора большой мощности для следующих сценариев: строительство одного блока мощностью 1200 МВт, двух блоков мощностью 600 МВт и четырех блоков мощностью 300 МВт. Последние два варианта строятся по принципу «модуль за модулем». Оценки сделаны в предположении, что $n = 0.6$ и эффект обучения не учитывается. Рассмотрены три схемы финансирования инвестиционного проекта: из собственных средств без привлечения внешних инвесторов (нулевая доля внешнего кредита); финансирование по кредитной схеме (доля в общих капиталовложениях 100%); привлечение заемного капитала (доля в общих капиталовложениях от 10 до 90%). Срок возврата кредита составляет 15 – 20 лет, процентная ставка кредита 7 – 10%.

Выполненные расчеты показывают, что привлечение внешних инвесторов влечет ухудшение показателей. Так при реализации финансирования по кредитной схеме (доля в общих капиталовложениях 100%) чистый дисконтированный доход уменьшается на 15%, дисконтированные затраты возрастают на 28%, внутренняя норма доходности и срок окупаемости увеличиваются соответственно на 18 и 12%. Сопоставление влияния различных схем кредитования на показатели экономической эффективности при реализации модульного принципа компоновки АЭС и реактора большой мощности показывает, что изменения в обоих случаях сравнимы. Это не делает РМСМ более чувствительными к доле заемного капитала в общих капиталовложениях и существенно не ухудшает их приспособленности к финансированию с привлечением внешних кредитов по сравнению с реакторами большой мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сравнительный анализ инвестиционной привлекательности проекта по созданию энергоблока АЭС на базе модулей РМСМ и реактора большой мощности выявил, что по показателям полных или удельных дисконтированных затрат экономическая привлекательность модульной концепции компоновки АЭС отсутствует. По показателям чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доход-

ности и срока окупаемости говорить о целесообразности концепции модульной компоновки АЭС можно в том случае, если прогнозируемый эффект обучения будет наблюдаться при сооружении модулей и масштабный фактор будет не меньше 0.5. В этом случае экономически целесообразным оказывается сооружение АЭС из небольшого количества модулей средней мощности. Если масштабный фактор будет не меньше 0.6, то можно говорить о целесообразности компоновки АЭС на базе реакторных модулей меньшей мощности. Анализ влияния различных схем кредитования продемонстрировал, что в относительном измерении изменения показателей экономической эффективности сопоставимы при реализации модульного принципа компоновки АЭС и реактора большой мощности.

Литература

1. IAEA, Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005: Reactors with Con-ventional Refuelling Schemes, IAEA-TECDOC-1485, Vienna, Austria, 2006. – 703 p.
2. IAEA, Status of Small Reactor Designs without On-site Refuelling, IAEA-TECDOC-1536, Vienna, Austria, 2007. – 859 p.
3. IAEA, Design Features to Achieve Defence in Depth in Small and Medium Sized Reactors; IAEA: Vienna, Austria, 2009. – 264 p.
4. IAEA, Status of Small and Medium Sized Reactor Designs: A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS); IAEA: Vienna, Austria, 2011. – 82 p.
5. Kessides I., Kuznetsov V. Small Modular Reactors for Enhancing Energy Security in Developing Countries. // Sustainability. – 2012. – Iss. 4. – No. 8. – PP. 1806-1832. Электронный ресурс: <http://www.mdpi.com/2071-1050/4/8/1806> (дата доступа 20.01.2018).
6. NEA OECD. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, Nuclear Development, 2011. – 175 p.
7. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.7, Vienna, 2013. – 258 p.
8. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.2, Vienna, 2008). – 21 p.
9. NEA OECD, The Financing of Nuclear Power Plants, 2009. – 78 p.
10. IAEA, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4, Vienna, 2014. – 90 p.
11. Kuznetsov V., Barkatullah N. Approaches to Assess Competitiveness of Small and Medium Sized Reactors. / Proc. of the International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century, 27-30 October 2009, IAEA, Vienna, Austria, Paper 1501. – 13 p.
12. Belli P., Anderson J., Barnum H., Dixon J., Tan J.-P. Handbook on economic analysis of investment operations. / Operational Core Services Network Learning and Leadership Center. World Bank. – 1998. – 209 p.
13. Requirements and criteria for nuclear technologies. E-Learning educational module. Электронный ресурс: <http://lanpi.iate.obninsk.ru/course5> (дата доступа 20.01.2018).
14. Integrated Model for Competitiveness Analysis of Small and Medium Sized Reactors. Manual. Электронный ресурс: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/SMR/docs/INCAS-Manual.pdf> (дата доступа 20.01.2018)
15. Technical Reports Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants / IAEA, Series No 396. – Vienna, 2000. – 224 p.
16. Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook, Technical Reports Series No. 241, IAEA, Vienna. – 1984. – 642 p.
17. Cost estimating guidelines for GENERATION IV nuclear energy systems. / Generations IV International Forum. Revision 4.2, 2007. – 181 p.
18. Андрианов А.А., Коровин Ю.А., Купцов И.С., Мурогов В.М., Андрианова О.Н. К вопросу об учете экономических рисков при сравнительном анализе ядерных технологий различной степени зрелости. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 156-168.

Поступила в редакцию 01.02.2018 г.

Авторы

Андрианов Андрей Алексеевич, доцент, к.т.н.

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Купцов Илья Сергеевич, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Осипова Татьяна Андреевна, заместитель директора

E-mail: TAOsipova@mephi.ru

Андрианова Ольга Николаевна, с.н.с., к.т.н.

E-mail: oandrianova@ippe.ru

UDC 621.039.003

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INVESTMENT ATTRACTIVENESS
OF NUCLEAR POWER PLANT CONCEPTS BASED ON SMALL AND
MEDIUM SIZED REACTOR MODULES AND A LARGE NUCLEAR
REACTOR**

Andrianov A.A.*, Kuptsov I.S.*, Osipova T.A.*, Andrianova O.N.**

* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

**JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

It seems to be of current interest to consider and analyze possible electrical and non-electrical applications of small and medium sized reactors for both the nearest and more distant future. The paper presents a comparative analysis of the investment attractiveness of a nuclear power plant design based on small and medium sized reactor modules and a large sized reactor. The authors identify conditions for increasing the investment attractiveness of a nuclear power plant based on small and medium sized reactor modules. The performed analysis showed that, in terms of the total discounted and levelized costs, the nuclear power plant modular design concept has no economic attractiveness at all. Taking into account the net present value, internal rate of return and payback period, it is possible to speak about the feasibility of the nuclear power plant modular design concept if only the predicted learning effect is observed when the modules are constructed and the scale factor is no less than 0.5. In this case, it will be economically feasible to construct a nuclear power plant based on a small number of medium sized modules. If the scale factor is not less than 0.6, then we can talk about the feasibility of nuclear power plant designs based on reactor modules of lower power. The authors also analyze the impact of various debt financing schemes to show that, in relative terms, changes in the economic performance indicators are comparable in the implementation of the nuclear power plant modular design and a large sized reactor.

Key words: small and medium sized reactors, modular NPP, economic efficiency indicators, economic risk.

REFERENCES

1. IAEA, Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005: Reactors with Con-ventional Refuelling Schemes, IAEA-TECDOC-1485, Vienna, Austria, 2006. 703 p.

2. IAEA, Status of Small Reactor Designs without On-site Refuelling, IAEA-TECDOC-1536, Vienna, Austria, 2007. 859 p.
3. IAEA, Design Features to Achieve Defence in Depth in Small and Medium Sized Reactors; IAEA: Vienna, Austria, 2009. 264 p.
4. IAEA, Status of Small and Medium Sized Reactor Designs: A Supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS); IAEA: Vienna, Austria, 2011. 82 p.
5. Kessides I., Kuznetsov V. Small Modular Reactors for Enhancing Energy Security in Developing Countries. *Sustainability*. 2012, iss. 4, no. 8, pp. 1806-1832. Available at: <http://www.mdpi.com/2071-1050/4/8/1806> (accessed Jan 20, 2018).
6. NEA OECD, Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, Nuclear Development, 2011. 175 p.
7. IAEA, Approaches for Assessing the Economic Competitiveness of Small and Medium Sized Reactors, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.7, Vienna (2013). 258 p.
8. IAEA, Financing of New Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.2, Vienna (2008). 21 p.
9. NEA OECD, The Financing of Nuclear Power Plants, 2009. 78 p.
10. IAEA, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4, Vienna (2014). 90 p.
11. Kuznetsov V., Barkatullah N. Approaches to Assess Competitiveness of Small and Medium Sized Reactors. Proceedings of the International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century, 27-30 October 2009, IAEA, Vienna, Austria, Paper 1501. 13 p.
12. Belli P., Anderson J., Barnum H., Dixon J., Tan J-P. Handbook on economic analysis of investment operations, Operational Core Services Network Learning and Leadership Center, World Bank (1998).
13. Requirements and criteria for nuclear technologies. E-Learning educational module. Available at: <http://lannp.iate.obninsk.ru/course5> (accessed Jan 20, 2018).
14. Integrated Model for Competitiveness Analysis of Small and Medium Sized Reactors. Manual. Available at: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/SMR/docs/INCAS-Manual.pdf> (accessed Jan 20, 2018).
15. Technical Reports Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants/ IAEA, Series No 396. – Vienna, 2000. 224 p.
16. Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook, Technical Reports Series No. 241, IAEA, Vienna (1984). 642 p.
17. Cost estimating guidelines for GENERATION IV nuclear energy systems. Generations IV International Forum. Revision 4.2, 2007. 181 p.
18. Andrianov A.A., Korovin Yu.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M., Andrianova O.N. Comparative evaluation of nuclear reactor technologies of different maturity levels on economic risk measures. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 1, pp. 156-168 (in Russian).

Authors

Andrianov Andrei Alekseevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Nuclear Engineering)

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Kuptsov Ilya Sergeevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: kuptsov_ilia@list.ru

Osipova Tatiana Andreevna, Deputy Director

E-mail: TAOsipova@mephi.ru

Andrianova Olga Nikolaevna, Senior Researcher, Cand. Sci. (Nuclear Engineering)

E-mail: oandrianova@ippe.ru