

## УЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ СРАВНИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ЗРЕЛОСТИ

А.А. Андрианов\*, Ю.А. Коровин\*, И.С.Купцов\*,

В.М. Мурогов\*, О.Н. Андрианова\*\*

\*НИЯУ «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

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

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



Менее разработанные реакторные технологии характеризуются более высокой степенью неопределенности основных технико-экономических показателей по сравнению с более зрелыми вариантами из-за отсутствия подробной информации о конструкции, оперативных данных, информации о затратах и пр., но ожидаемая производительность таких систем, как правило, более привлекательна по сравнению с более зрелыми опциями. Очевидно, чем больше неопределенность, тем выше экономические риски, возникающие при реализации соответствующего проекта. Поэтому при проведении сравнительных оценок конкурентоспособности и эффективности реакторных технологий разной степени зрелости необходимо учитывать экономические риски, чтобы сбалансировать суждения относительно экономических показателей и ожидаемой производительности рассматриваемых вариантов. Надежной основой для этого является понятийный аппарат теории экономических рисков.

При оценке показателей риска необходимы расчеты характеристик вероятностных распределений индикаторов экономической эффективности и систематическое применение статистических подходов на основе методов Монте-Карло. Рассмотрены результаты демонстрационного анализа оценки показателей риска для различных индикаторов экономической эффективности на примере сравнительного анализа двух гипотетических легководяных реакторных технологий, которые должны быть приняты во внимание при выборе наиболее привлекательного варианта. Применение показателей экономического риска для сравнительной оценки реакторных технологий представляется полезным для лиц, принимающих решения, не знакомых с техническими характеристиками и показателями эффективности реакторных технологий, но информированных о концепциях теории экономических рисков. Такая методология может быть эффективно использована для интерпретации результатов ранжирования в рамках многофакторной сравнительной оценки менее и более зрелых реакторных технологий.

**Ключевые слова:** реакторные технологии, экономические риски, неопределенность, поддержка принятия решений.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Менее разработанным реакторным технологиям присуща более высокая степень неопределенности ключевых технико-экономических показателей, чем более зрелым опциями вследствие отсутствия детальной информации о конструкционных особенностях, эксплуатационных данных, затратах. Однако ожидаемая производительность таких технологий, как правило, представляется более привлекательной по сравнению с более зрелыми вариантами, но чем больше неопределенность, тем выше оказываются экономические риски, возникающие при развертывании соответствующей технологии.

В связи с этим при проведении сравнительной оценки конкурентоспособности и эффективности реакторных технологий разной степени зрелости необходимо учитывать экономические риски, чтобы сбалансировать суждения относительно экономических показателей и ожидаемой производительности рассматриваемых вариантов. Понятийный аппарат теории экономических рисков представляет собой надежную основу для суждений относительно потенциальных затрат, выгод и рисков при сравнении менее и более зрелых реакторных технологий для информирования лиц, принимающих решения и несущих ответственность по вопросам, связанным с развертыванием новых технологий, где необходимо четкое понимание соответствующих рисков, и их принятием.

Следует отметить, что несмотря на актуальность вопросов, связанных с оценкой экономических рисков, возникающих при проектировании, эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии и их компонентов в рамках крупнейших международных методологических усилий, направленных на оценку и сравнительный анализ систем и компонент ядерной энергетики, должное внимание данным вопросам не уделено [1 – 5]. В то же время рассмотрение соответствующих аспектов может изменить представление относительно сравниваемых опций. Так, например, одним из аргументов в пользу реакторов малой и средней мощности является то, что развертывание систем ядерной энергетики на их основе позволяет снизить риски, связанные с потерей капитальных вложений [6]. Корректная оценка экономических рисков, возникающих при развертывании новых реакторных технологий, может привести к заключению о целесообразности предварительного снижения сопутствующих неопределенностей (в том числе посредством дополнительных НИОКР) прежде чем перейти к их реализации [7].

Для оценки показателей риска (таких как стоимостная мера риска, ожидаемые убытки, «хвост» стоимостной меры риска и др.) необходимы расчеты характеристик вероятностных распределений индикаторов экономической эффективности (чистая приведенная стоимость, текущая стоимость, внутренняя норма прибыли, дисконтированный срок окупаемости, тариф безубыточности и др.) и систематическое применение статистических подходов на основе методов Монте-Карло.

На примере сравнительного анализа двух гипотетических легководяных реакторных технологий (менее и более зрелые опции) представлены результаты демонстрационного анализа оценки ряда показателей экономических рисков для различных индикаторов экономической эффективности с целью демонстрации применимости соответствующих экономических концепций для сравнительного анализа объектов использования атомной энергии, а также возникающих противоречий между показателями экономической эффективности и рисков, которые должны быть приняты во внимание при рассмотрении вопросов, связанных с выбором наиболее привлекательного варианта реакторной технологии для развертывания [8 – 10].

## **КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ В УСЛОВИЯХ РИСКА И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

При оценке эффективности проектов в энергетике в условиях либерализации энергетических рынков, где хозяйствующим субъектам, в новых условиях стремя-

щимся к максимизации прибыли, предоставлена самостоятельность в принятии решений, стали широко использоваться принципы и критерии, отличные от тех, которые применялись в централизованной экономике, где основным критерием эффективности был критерий минимума общественно необходимых затрат [11 – 12]. Здесь в качестве основной теории выбора эффективных проектов служит теория денежных потоков, где основными критериями эффективности принимаемых решений являются критерии чистой текущей стоимости, дисконтированных затрат, внутренней нормы доходности, срока окупаемости инвестиций и ряд других (табл. 1) [13 – 14].

Таблица 1

**Показатели экономической эффективности**

Показатель эффективности	Расчетная формула
Чистый дисконтированный доход ( <i>NPV</i> – 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 ( <i>PV</i> – Present Value)	$PV = \sum_{t=0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t}$
Внутренняя норма доходности ( <i>IRR</i> – Internal Rate of Return)	Процентная ставка, при которой дисконтированный доход ( <i>NPV</i> ) равен нулю
Дисконтированный срок окупаемости ( <i>DPP</i> – Discounted Payback Period)	Период времени, за который доходы, генерируемые инвестициями, с учетом дисконтирования покрывают затраты на инвестиции
Удельные дисконтированные затраты ( <i>LC</i> – Levelized Cost)	$LC = \sum_{t=0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t} / \sum_{t=T_1}^{T_2} \frac{W_t}{(1+d)^t}$
<i>D<sub>t</sub></i> – текущие доходы в моменты времени <i>t</i> ; <i>R<sub>t</sub></i> – текущие денежные расходы в моменты времени <i>t</i> ; <i>W<sub>t</sub></i> – текущая энерговыработка; <i>d</i> – норма дисконтирования; <i>T<sub>1</sub></i> – длительность строительства, лет; <i>T<sub>2</sub></i> – длительность жизненного цикла проекта, лет; <i>t</i> – дискретное время	

На основании данных показателей проводят многофакторную оценку экономической эффективности и конкурентоспособности проектов развертывания систем и компонент энергетики. В зависимости от постановки задачи используют тот или иной набор показателей эффективности. 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) главными показателями оценки экономической эффективности проектов АЭС обычно принимаются интегральные дисконтированные затраты (*PV*). В общем случае необходимо принимать во внимание весь спектр показателей эффективности, которые отражают различные аспекты проекта.

Поскольку риск – категория вероятностная, обусловленная неопределенностью знания будущего, то при оценке показателей риска широко используют вероятностные методы. Неопределённые параметры условий реализации проекта и технико-экономические характеристики проекта определяют результирующую неопределенность в значениях упомянутых показателей экономической эффективности, для каждого из которых могут быть оценены статистические показатели риска. Критерии, которые могут применяться для поддержки принятия решений в условиях риска, характеризуют альтернативы, учитывают особенности соответствующих статис-

тических распределений, что определяет область применения критериев. Ниже перечислены наиболее часто используемые критерии (показатели риска) для сравнения альтернатив в ситуации риска и неопределенности [15 – 16].

- Критерий ожидаемого значения ( $ME$ ), по которому варианты оценивают по величине математического ожидания (данный показатель может быть рассмотрен как мера экономической эффективности).
- Критерий наиболее вероятного значения ( $MP$ ), по которому оценкой является вариант, имеющий наибольшую вероятность (данный показатель может быть рассмотрен как еще одна мера экономической эффективности).
- Критерий стоимостной меры риска ( $VaR$ , Value at Risk) – это выраженная в денежных единицах оценка величины убытков, которые не превысят ожидаемые потери с заданной вероятностью, равной уровню доверия  $\alpha$ . Следовательно, в  $1 - \alpha$  случаях убыток составит величину, большую, чем  $VaR$ . Таким образом, можно утверждать с вероятностью  $\alpha$ , что потери не превысят  $VaR$  единиц.
- Критерий ожидаемых убытков ( $ES$ , Expected Shortfall) оценивает «хвост» распределения, отсекаемый некоторой заданной границей, и представляет собой математическое ожидание «хвоста» распределения, характеризующего убытки.
- Критерий ( $tVaR$ , Tail Value at Risk) используется при оценке рисков недостаточности капитала и равен показателю  $ES$ , для которого в качестве границы взято значение  $VaR$ .

Существуют и другие меры риска (критерии вариабельности, предельного значения и пр.), используемые для сравнения альтернатив в ситуации риска и неопределенности.

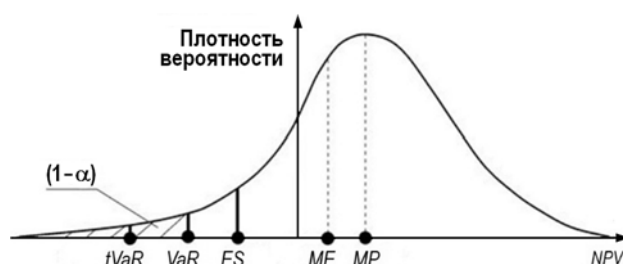


Рис. 1. Взаимное расположение оценок риска по различным показателям

Рисунок 1 на примере распределения показателя  $NPV$  представляет расположение оценок по различным критериям риска (отрицательные значения показателя – это убытки, положительные значения – прибыль). Отметим, что рассмотрение ограничено только неопределенностью в значениях технико-экономических параметров системы, и не учтены крупные катастрофические риски, которые еще в большей степени растягивают распределение в область убытков. На модельном примере рассмотрены упомянутые пять критериев.

Одним из популярных в последнее время подходов к анализу неопределенностей является применение статистических методов, предполагающих задание исходных неопределенностей в виде случайных величин с известным законом распределения (методы Монте-Карло) [17]. Статистические методы широко используются для количественной оценки показателей рисков.

Данная методика основана на реализации следующего алгоритма (рис. 2): определение набора входных параметров, влияющих на неопределенность результирующего функционала, формирование наборов исходных входных данных путем случайного выбора значений входных параметров, выполнение расчетов интересующих функционалов, статистическая обработка результатов расчетов и определение оценок статистических характеристик распределений результирующих функционалов.

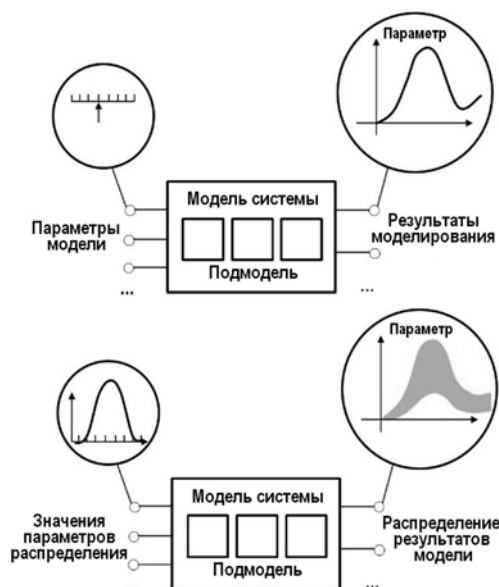


Рис.2. Схематическое изображение статистического подхода к оценке неопределенностей

Согласно формуле Уилкса [18], при отсутствии информации о функции распределения можно определить доверительный интервал результирующего функционала

$$P \left[ \int_{L_1}^{L_2} f(y) dy \geq \beta \right] = \alpha ,$$

где  $\alpha$  – уровень доверительной вероятности;  $\beta$  – вероятность содержания;  $L_1, L_2$  – границы толерантного предела.

Минимальное необходимое число расчетов  $N$ , начиная с которого все значения случайной величины будут лежать внутри двухстороннего толерантного предела, определяется по формуле  $1 - \beta^N - N \cdot (1 - \beta) \cdot \beta^{N-1} = \alpha$ .

Двухсторонний толерантный предел означает, что с вероятностью, например, 95%, не менее 95% всех возможных реализаций случайной величины  $y$  будет лежать в интервале  $(L_1, L_2)$ . Поскольку вероятность нахождения случайной величины  $y$  в этом интервале есть  $0.95 \times 0.95 \approx 0.90$ , то полученный интервал можно отождествить с 90%-ым доверительным интервалом.

Число необходимых расчетов, необходимых для построения доверительных интервалов результатов расчета при трех типичных уровнях доверительной вероятности, определяется согласно формуле Уилкса (табл. 2) [19].

Таблица 2

**Необходимое количество расчетов для обеспечения уровня надежности**

Уровень надежности	Односторонний толерантный интервал			Двухсторонний толерантный интервал		
	0.90	0.95	0.99	0.90	0.95	0.99
0.90	22	45	230	38	77	388
0.95	29	59	299	46	93	473
0.99	44	90	459	64	130	662

## ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим две гипотетические легководяные реакторные технологии (условно, одна из них менее, другая более зрелая) с целью демонстрации процедуры оценки показателей риска для различных индикаторов экономической эффективности и применимости соответствующих экономических концепций для сравнительного анализа объектов использования атомной энергии, а также противоречий между показателями экономической эффективности и рисков.

Исходными данными являются внешние условия (тариф на электроэнергию с шин АЭС, цена ядерного топлива, КИУМ, норма дисконта, ставка налога с прибыли) и технико-экономические параметры блока (установленная электрическая мощность, срок строительства, удельная стоимость строительства, постоянные расходы на эксплуатацию и ремонт, глубина выгорания топлива, КПД установки, доля капитальных вложений по годам). Базовый набор исходных данных представлен в табл. 3. Предполагается, что все значения параметров распределены равномерно в указанных в таблице границах.

Таблица 3

### Исходные данные

Параметр	Более зрелая технология	Менее зрелая технология
<i>Внешние условия</i>		
Тариф, цент/кВт ч	8	
Ставка дисконтирования, %	7	
Ставка налога с прибыли, %	0	
<i>Характеристики системы</i>		
Установленная мощность, МВт(э)	1200	
Время эксплуатации, лет	60	
Сроки строительства, лет	6 – 8	4 – 9
Удельные капитальные затраты, \$/кВт(э)	5000 – 6000	4000 – 7000
Постоянные расходы на эксплуатацию и ремонт, млн. долл. в год	30 – 40	20 – 50
Выгорание, МВт(т) дней/кг U	45 – 50	50 – 55
КПД, %/100	0.33 – 0.34	0.34 – 0.35
КИУМ, %/100	0.8 – 0.85	0.85 – 0.9
Стоимость ядерного топлива, \$ за кг U	600 – 700	500 – 900

На основании данных таблицы рассчитываются ежегодные капитальные затраты, расходы на топливо, текущие затраты, что позволяет оценить показатели эффективности инвестиционного проекта по строительству АЭС на базе соответствующей реакторной технологии. При оценке вероятных значений показателей экономической эффективности методом Монте-Карло при различных наборах исходных параметров для обеспечения статистической значимости получаемых результатов генерируется 10000 вариантов. Показатель уровня доверия  $\alpha$  для расчета  $VaR$  выбран равным 95%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 представлены трубка неопределенности и средние значения чистой кумулятивной текущей стоимости ( $NPV$ ) на жизненном цикле инвестиционного проекта в миллионах долларов для рассматриваемых двух вариантов технологий. Традиционно можно выделить два участка: поток накопленных капитальных вложений в строитель-

ство объектов при заданной длительности строительства и чистая кумулятивная текущая стоимость на участке эксплуатации объекта от начала эксплуатации объекта до конца жизненного цикла.

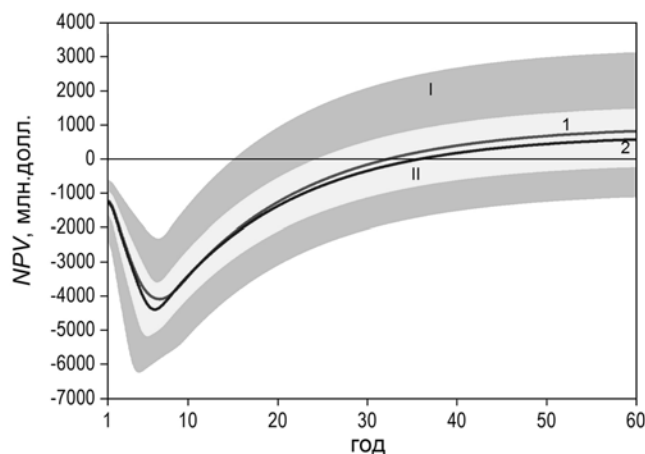


Рис. 3. Трубка неопределенности и средние значения чистого дисконтированного дохода (NPV): 1 – среднее значение NPV для менее зрелой технологии; 2 – среднее значение NPV для более зрелой технологии; I – неопределенность в значениях NPV для менее зрелой технологии; II – неопределенность в значениях NPV для более зрелой технологии

Ожидаемые (средние) значения показателя чистой кумулятивной текущей стоимости в 60-м году составят 596 и 840 млн. долл. для более и менее зрелой технологий соответственно. Верхняя и нижняя границы трубки неопределенности составляют –210, 1473 и –1072, 3153 млн. долл. для более и менее зрелой технологий соответственно. Как видно, ожидаемое (среднее) значение NPV выше для менее зрелой технологии, но при этом и разброс возможных значений данного показателя оказывается большим, что и приводит к более высоким значениям показателей риска.

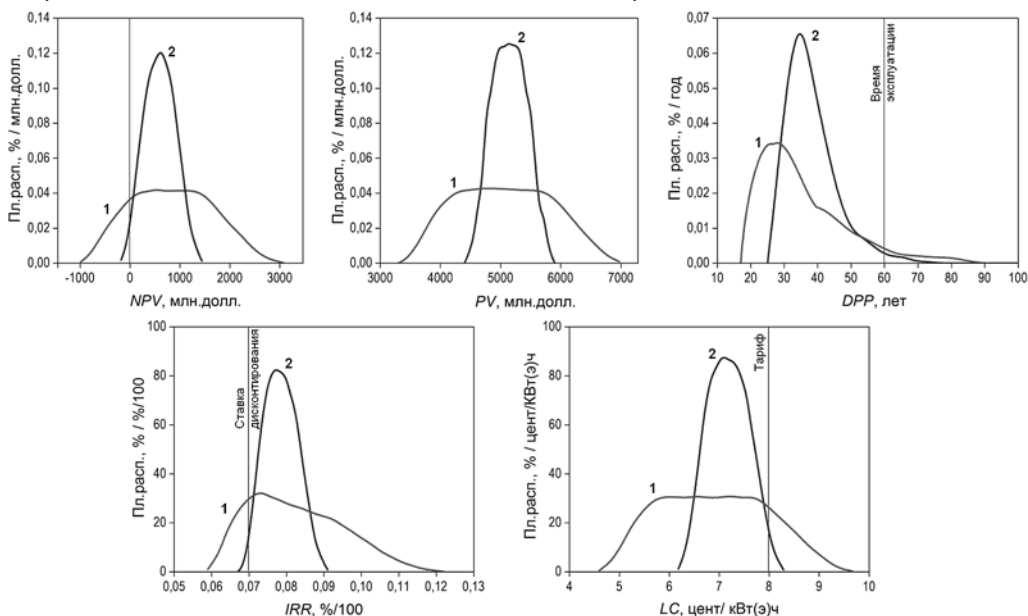


Рис. 4. Плотность распределения вероятности показателей экономической эффективности: 1 – менее зрелая технология; 2 – более зрелая технология

Плотности распределения вероятности показателей экономической эффективно-

сти на 60-й год приведены на рис. 4, где также указаны граничные значения показателя, при которых проект становится убыточным.

- Срок окупаемости объекта (*DPP*) определяется как точка пересечения накопленного потока с горизонтальной осью, где значение *NPV* равно нулю. Поскольку инвестор начнет получать доход от проекта только при временах больших, чем срок окупаемости, очевидно, что срок окупаемости должен быть значительно меньше длительности жизненного цикла.
- Внутренняя норма доходности проекта (*IRR*) – это процентная ставка, при которой *NPV* равен нулю. Считается, что чем выше значение *IRR* и больше разница между ее значением и заданной ставкой дисконта, тем устойчивее данный проект.
- Показатель удельных дисконтированных затрат *LC* (иное название – тариф безубыточности) должен быть меньше, чем установленный тариф; в этом случае проект можно считать прибыльным.
- Если инвестором является собственник, например, государство, то основным показателем экономической эффективности будут дисконтированные затраты (*PV*), которые необходимо минимизировать.

На основании данных статистических распределений с учетом требования безубыточности проекта могут быть определены значения показателей рисков. Значения рассмотренных пяти показателей ожидаемой экономической эффективности и рисков для показателя *NPV* приведены для обеих опций на рис. 5.

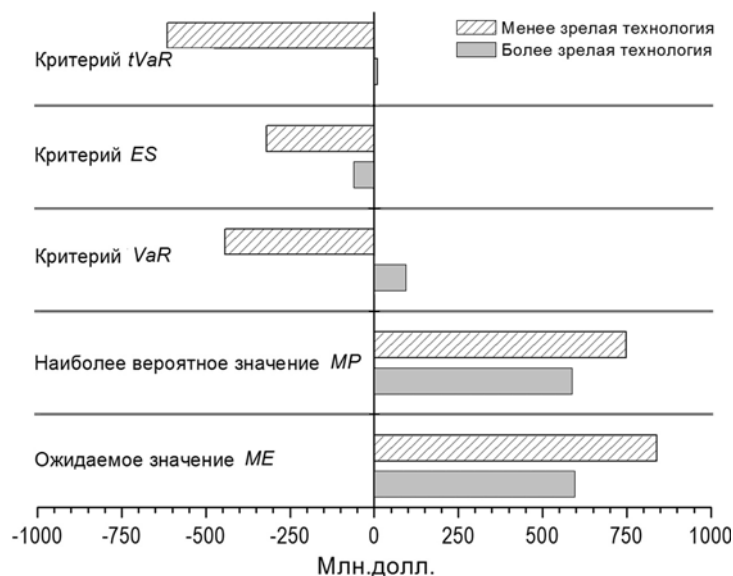


Рис. 5. Значения показателей экономических рисков

Данные результаты говорят о том, что несмотря на более привлекательную по сравнению с более зрелой опцией ожидаемой экономической эффективности (по критериям *ME*, *MP*) для менее зрелой технологии, все рассмотренные показатели экономических рисков (*tVaR*, *ES*, *VaR*) для менее зрелой технологии оказываются существенно выше (по модулю) соответствующих значений для более зрелого варианта в связи с более высокой степенью неопределенности их основных технико-экономических показателей. Так, например, ожидаемое значение *NPV* у менее зрелой опции в 1.4 раза выше соответствующего значения более зрелой, однако при этом и все показатели риска оказываются выше у менее зрелой опции: 4.6, 5.2 и 61.4 соответственно для показателей *VaR*, *ES* и *tVaR*. Следует отметить, что показатели *VaR* и *tVaR* оказываются положительными для более зрелой опции, что говорит о



том, что более зрелая опция в состоянии принести прибыль, на которую можно рассчитывать с заданным уровнем уверенности, даже в случае реализации неблагоприятных условий, в то время как менее зрелая опция при той же степени уверенности принесет убытки, которые придется покрывать за счет собственных средств. Представленные результаты демонстрируют, что принятие во внимание показателей экономических рисков может изменить представление о привлекательности реакторных технологий: ожидаемое улучшение производительности может быть несопоставимо с возрастанием рисков, связанных с реализацией нового технологического решения.

Очевидно, что представленный анализ не может лечь в основу реальных управленческих решений ввиду того, что он носит демонстрационный качественный характер, и информационная база исследования ограничена. Также остается открытым вопрос о выборе наиболее подходящих показателей экономической эффективности и рисков, который в каждом конкретном случае должен решаться с учетом специфики ситуации, наличия необходимых данных для оценки, сопутствующих неопределенностей и пр. Упомянутые пункты – это те аспекты, которые необходимо принимать во внимание в том случае, если возникнет потребность использовать подобный подход для выработки реальных ориентированных на риск управленческих решений в части поиска наиболее целесообразной сбалансированной по различным затратам, выгодам и рискам технологической опции для последующего развертывания.

Для повышения степени обоснованности результатов анализа и уровня доверия к ним необходима организация экспертизы с привлечением пропонентов и оппонентов разных технических концепций для выработки единого набора показателей экономической эффективности и рисков для оценки, а также фиксации всех сценарных и модельных предположений, неопределенностей. Для выбора окончательного решения полезными могут явиться формальные методы поддержки принятия решений (в том числе с учетом неопределенности) – методы дискретного анализа решений, которые получили широкое распространение для выработки решений в разных предметных областях и позволяющие провести агрегацию противоречивых показателей эффективности (в данном случае показателей экономической эффективности и экономических рисков) с учетом суждений и предпочтений экспертов и лиц, принимающих решения. В случае реализации такой экспертизы может быть выполнена объективная, основанная на количественном анализе, оценка затрат, выгод и рисков, связанных с каждым из вариантов, что способствует поиску и обоснованию наиболее взвешенного из них.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Показано, что применение показателей экономического риска для сравнительной оценки реакторных технологий представляется полезным для коммуникации с лицами, принимающими решения, которые не знакомы с техническими характеристиками и показателями эффективности реакторных технологий, но информированы о концепциях теории экономического риска. Терминология на основе показателей риска может быть эффективно использована для интерпретации результатов ранжирования в рамках многофакторной сравнительной оценки менее и более зрелых реакторных технологий. Представленный гипотетический пример продемонстрировал основные тенденции, связанные с влиянием неопределенности при сравнительной оценке менее и более зрелых реакторных технологий, и позволил указать направления, как подобного рода анализ может быть учтен в рамках работ по сравнительной оценке объектов использования атомной энергии и их компонентов.

**Литература**

1. Technical Reports Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants, IAEA Series No 396. – Vienna, 2000. – 224 p.
2. Cost estimating guidelines for GENERATION IV nuclear energy systems, Revision 4.2. September 26, 2007. Available at: [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg\\_guidelines.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg_guidelines.pdf).
3. IAEA. Financing of New Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.2, Vienna, 2008. Available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1345\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1345_web.pdf).
4. NEA OECD. The Financing of Nuclear Power Plants. June 2009. Available at: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2009/financing-plants.pdf>.
5. IAEA. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4, Vienna, 2014, Available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1653\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1653_web.pdf).
6. NEA OECD. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, Nuclear Development, June 2011. Available at: <http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf>.
7. *Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M.* Towards sustainable nuclear power development. // *International journal for nuclear power*. – 2014. – Vol. 59. – Iss. 5. – PP. 287-293.
8. *Andrianov A.A., Kanke V.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M.* Reexamining the Ethics of Nuclear Technology. // *Science and Engineering Ethic*. – 2015. – Vol. 21. – Iss. 4. – PP. 999-1018. DOI 10.1007/s11948-014-9578-0.
9. *Andrianov A., Kuznetsov V., Kuptsov I., Fesenko G.* INPRO activities on development of advanced tools to support judgement aggregation for comparative evaluation of nuclear energy systems. // *Science and Technology of Nuclear Installations*. – 2014. – Vol. 2014. Article ID 910162, 15 pages. DOI: 10.1155/2014/910162.
10. *Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I.* Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. // *Energies*. – 2015. – Vol. 8. – PP. 3679-3719.
11. Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook. Technical Reports Series No. 241. – 1984, IAEA, Vienna.
12. *Silvennoinen P.* Nuclear Fuel Cycle Optimization: Methods and Modelling Techniques. – Pergamon Press, 1982, New York.
13. *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, 1998, World Bank.
14. *Daniel K.* Net Present Value (NPV) Definition. Investopedia, 2003. Available at: <http://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp>.
15. *Holton Glyn A.* Value at Risk: Theory and Practice. – Academic Press, 2003. ISBN-10: 0123540100, ISBN-13: 978-0123540102.
16. *Artzner P.; Delbaen F.; Eber J. M.; Heath D.* Coherent Measures of Risk. // *Mathematical Finance*. – 1999. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 203. DOI:10.1111/1467-9965.00068.
17. *Vose D.* Risk Analysis, A Quantitative Guide (Third ed.). – John Wiley & Sons, 2008.
18. *Wilks S.S.* Determination of sample sizes for setting tolerance limits. // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1941. – Vol. 12. – No. 1. – PP. 91-96.
19. *Glaeser H.* GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications. // *Science and Technology of Nuclear Installations*. – 2008. – Vol. 2008. – 7 pages. – Article ID 798901. DOI:10.1155/2008/798901.

Поступила в редакцию 01.12.2016 г.

**Авторы**

Андрянов Андрей Алексеевич, доцент, к.т.н.  
E-mail: [andreyandrianov@yandex.ru](mailto:andreyandrianov@yandex.ru)

Коровин Юрий Александрович, проф., д.ф.-м.н.,  
E-mail: [korovinyu@mail.ru](mailto:korovinyu@mail.ru)

Купцов Илья Сергеевич, доцент, к.ф.-м.н.  
E-mail: kuptsov\_ilia@list.ru

Мурогов Виктор Михайлович, д.т.н., проф.  
E-mail: victor\_murogov@mail.ru

Андрианова Ольга Николаевна, с.н.с., к.т.н.  
E-mail: oandrianova@ippe.ru

UDC 621.039.003

## **COMPARATIVE EVALUATION OF NUCLEAR REACTOR TECHNOLOGIES OF DIFFERENT MATURITY LEVELS ON ECONOMIC RISK MEASURES**

Andrianov A.A.\*, Korovin Yu.A.\*, Kuptsov I.S.\*,  
Murogov V.M.\*, Andrianova O.N.\*\*

\* NRNU «МЭФТИ»,

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

\*\*JSC «SSC RF – Institute for Physics and Power Engineering»

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

### ABSTRACT

Less mature nuclear reactor technologies are characterized by a greater uncertainty due to insufficient detailed design information, operational data, cost information, etc., but the expected performance characteristic of the less mature options are usually more attractive in comparison with the more mature ones. The greater uncertainty is, the higher economic risks associated with the project realization will be. In this regard, within a competitiveness comparative evaluation of less and more mature nuclear reactor technologies, it is necessary to apply economic risk measures to balance judgments regarding economic performance of less and more mature options. The economic risk terminology provides a good basis for judgments regarding risks-benefits associated with less and more mature nuclear reactor technologies to inform a decision-maker whose decisions should be responsible with a clear recognition of the risks and risks acceptance.

An evaluation of any risk metrics (such as, Value-at-Risk, expected shortfalls, tail Value-at-Risk) assumes calculations of different characteristics of probability distributions of associated economic and financial performance indicators (net present value, present value, internal rate of return, discounted payback period, levelized cost) and requires application of a Monte-Carlo based statistical analysis. An examination of applicability of statistical risk measures for different economic and financial performance indicators including uncertainty treatment techniques is presented in the report within a trial case study on a comparative evaluation of less and more mature unspecified LWRs. Based on the case study, it was possible to demonstrate a contradiction between the risks and performance for a set of economic efficiency indicators.

It is shown that application of economic risk metrics for nuclear reactor technology assessments and comparative evaluations seems useful to communicate with decision makers who are not familiarized with technical features and performance indicators but

informed about economic risk concepts. The risk-based terminology may be effectively used to provide an interpretation of ranking results within a comparative evaluation of less and more mature nuclear reactor options. The presented simple case study has demonstrated the main trends associated with uncertainties incorporated into a comparative evaluation of less and more mature nuclear reactor technologies and lessons learned from the study should be further worked out for their accounting within comparative evaluation endeavors.

**Key words:** economic risks, decision-making, comparative evaluation, reactor technologies, uncertainty.

#### REFERENCES

1. Technical Reports Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants, IAEA Series No 396. – Vienna, 2000. – 224 p.
2. Cost estimating guidelines for GENERATION IV nuclear energy systems, Revision 4.2. September 26, 2007. Available at: [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg\\_guidelines.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg_guidelines.pdf).
3. IAEA. Financing of New Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.2, Vienna, 2008. Available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1345\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1345_web.pdf).
4. NEA OECD. The Financing of Nuclear Power Plants. June 2009. Available at: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2009/financing-plants.pdf>
5. IAEA. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4, Vienna, 2014, Available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1653\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1653_web.pdf)
6. NEA OECD. Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, Nuclear Development, June 2011. Available at: <http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf>
7. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M. Towards sustainable nuclear power development. *atw: International journal for nuclear power*. 2014, v. 59, iss. 5, pp. 287-293.
8. Andrianov A.A., Kanke V.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M. Reexamining the Ethics of Nuclear Technology. *Science and Engineering Ethic*. 2015, v. 21, iss. 4, pp. 999-1018. DOI: 10.1007/s11948-014-9578-0.
9. Andrianov A., Kuznetsov V., Kuptsov I., Fesenko G. INPRO activities on development of advanced tools to support judgement aggregation for comparative evaluation of nuclear energy systems. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2014, v. 2014, 15 p. DOI: 10.1155/2014/910162.
10. Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I. Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. *Energies*. 2015, v. 8, pp. 3679-3719.
11. Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook. Technical Reports Series No. 241, 1984, IAEA, Vienna.
12. Silvennoinen P. Nuclear Fuel Cycle Optimization: Methods and Modelling Techniques. Pergamon Press, 1982, New York.
13. 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, 1998, World Bank.
14. Daniel K. Net Present Value (NPV) Definition. Investopedia, 2003. Available at: <http://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp>.
15. Glyn A. Holton. Value at Risk: Theory and Practice. Academic Press; 1-st edition (March 12, 2003), ISBN-10: 0123540100, ISBN-13: 978-0123540102.
16. Artzner P., Delbaen F., Eber J. M., Heath D. Coherent Measures of Risk. *Mathematical Finance*. 1999, v. 9, iss. 3, 203. DOI: 10.1111/1467-9965.00068.
17. Vose D. Risk Analysis, A Quantitative Guide (Third ed.), 2008, John Wiley & Sons.
18. Wilks S.S. Determination of sample sizes for setting tolerance limits. *Annals of*

*Mathematical Statistics*. 1941, v. 12, no. 1, pp. 91-96.

19. Glaeser H., GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2008, v. 2008, Article ID 798901, 7 pages. DOI: 10.1155/2008/798901.

**Authors**

Andrianov Andrey Alekseevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Korovin Yuri Aleksandrovich., Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department

E-mail: korovinyu@mail.ru

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

E-mail: kuptsov\_ilia@list.ru

Murogov Victor Michailovich., Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: victor\_murogov@mail.ru

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

E-mail: oandrianova@ippe.ru