

## Предложения по формированию критериев выбора проектов новых энергоблоков АЭС Украины

На основании практики выполнения оценки энергоблоков АЭС с использованием критериев EUR (European Utility Requirements) и методологии МАГАТЭ INPRO (Innovation Nuclear Reactors and Fuel Cycle) разработаны критерии оценки предлагаемых к реализации в Украине проектов АЭС различных поставщиков с присвоением балльной оценки. Определен алгоритм получения сводной оценки, характеризующей приемлемость энергоблока АЭС для строительства в Украине.

Ключевые слова: INPRO, АЭС, критерии оценки.

**М. І. Власенко, О. В. Годун, В. Я. Шендерович**

### Пропозиції щодо формування критеріїв вибору проектів нових енергоблоків АЕС України

На підставі практики виконання оцінки енергоблоків АЕС з використанням критеріїв EUR (European Utility Requirements) та методології МАГАТЭ INPRO (Innovation Nuclear Reactors and Fuel Cycle) розроблено критерії оцінки пропонованих проектів АЕС різних постачальників з присвоєнням кількісної оцінки. Визначено алгоритм отримання загальної оцінки, яка характеризує прийнятність енергоблока АЕС для будівництва в Україні.

Ключові слова: INPRO, АЕС, критерії оцінки.

Атомная энергетика в соответствии с Энергетической стратегией Украины на период до 2030 года [1] является одним из определяющих направлений производства электроэнергии. Работа по усовершенствованию Энергетической стратегии продолжается, однако во всех рассматриваемых ее вариантах сохраняется значимость атомной энергетики в общем балансе энергетики Украины в настоящее время и на среднесрочную перспективу. При этом, несмотря на приоритетность продления сроков эксплуатации действующих энергоблоков, в будущем безусловно потребуются сооружение новых энергоблоков, включая замещающие энергоблоки взамен снимаемых с эксплуатации с учетом продления.

В настоящее время существует ряд признанных в мире критериев выбора типа энергоблоков для дальнейшего строительства исходя из национальных требований. Однако имеющиеся методологии, например методология МАГАТЭ INPRO, предлагают общую оценку ядерно-топливного цикла с учетом типа реактора, а методология EUR — значительное количество критериев, что затрудняет интегральную оценку и возможность получения достоверной информации по каждому из оцениваемых критериев. Таким образом, с целью упрощения процедуры оценки новых энергоблоков стоит задача разработки алгоритма сравнительной оценки на основе значимых критериев с учетом национальных требований Украины. Разработка критериев оценки новых проектов энергоблоков АЭС для возможного строительства в Украине и подходы к формированию критериев выбора АЭС с учетом аспектов ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) одобрены протоколами заседания научно-технического совета ГП НАЭК «Энергоатом» от 22.04.2015 и 02.09.2015.

Учитывая сложный и длительный процесс проектирования и лицензирования новых энергоблоков, необходимо готовиться к процедуре выбора типа энергоблока АЭС, строительство которого возможно в условиях Украины, уже в ближайший период. При этом нужно учитывать направление строительства конкретного энергоблока: энергоблок будет замещать выводимые из эксплуатации АЭС; энергоблок будет строиться на новых площадках или при расширении действующих АЭС (если такая возможность будет подтверждена); предполагается строительство однотипных энергоблоков на одной площадке.

Анализ энергоблоков АЭС с применением критерияльной сравнительной оценки — составная часть проекта МАГАТЭ по инновационным топливным циклам и реакторным установкам (INPRO). В проекте INPRO участвует более 40 стран, которые являются владельцами и пользователями технологий ЯТЦ и которые предполагают развитие собственного ЯТЦ. Первый опыт оценки различных типов энергоблоков АЭС применительно к Украине получен в рамках так называемой национальной оценки ядерно-энергетических систем [2].

Подходы к формированию критериев разработаны на основе принципов, изложенных в документе МАГАТЭ [3], с учетом:

- а) опыта использования документа [3] для сравнительного анализа/оценок различных проектов;
- б) нецелесообразности использования большого числа критериев из-за сложности получения объективной информации по каждому критерию и взаимосвязи критериев между собой (оценка выбранной характеристики АЭС путем анализа различных по наполнению критериев);
- в) возможности получения со стороны владельца технологий и/или от доступных (открытых) источников

необходимой детальной информации по всем критериям оцениваемых проектов АЭС;

г) значимости отдельных факторов, принимая во внимание специфику реализации проектов в Украине;

д) сочетания двух факторов при выборе индикаторов/критериев:

– достаточности набора индикаторов/критериев для объективного сопоставления различных проектов;

– реалистичности набора индикаторов/критериев с точки зрения наличия/возможности получения информации по сравниваемым проектам (включая потенциальные возможности ее получения в составе тендерной документации).

Предлагаемый набор критериев служит для выработки единого инструментария анализа и сравнительной оценки предложений поставщиков, подготовки технических требований для формирования тендерных условий, учета возможных решений в области ЯТЦ, связанных с имплементацией выбранного энергоблока (с детальной оценкой реакторной установки) при принятии решения по выбору энергоблока.

Обсуждая проекты энергоблоков, необходимо учитывать следующие факторы:

– временной период строительства энергоблока. Предположительно, ввод в эксплуатацию энергоблоков

Таблица 1. Критерии выбора проектов энергоблоков АЭС по направлению 1 «Общие критерии»

Номер критерия	Критерий	L, %	Характеристики	Описание
1.1	Соответствие требованиям НД Украины			
<b>К 1.1.1</b>	<b>Основные требования по ядерной и радиационной безопасности</b>	<b>10</b>	а) соответствие в полном объеме б) частичное соответствие	б) проводится анализ допустимости/приемлемости
3 1.1.2	<i>Требования других НД</i>	5	а) соответствие б) частичное соответствие	б) проводится анализ допустимости/приемлемости
<b>К 1.2</b>	<b>Соответствие рекомендациям МАГАТЭ в части безопасности</b>	<b>15</b>	а) соответствие б) частичное соответствие	б) проводится анализ допустимости/приемлемости
<b>К 1.3</b>	<b>Соответствие европейским директивам (по ядерной и радиационной безопасности)</b>	<b>15</b>	а) соответствие в полном объеме б) частичное соответствие	б) проводится анализ допустимости/приемлемости
<b>К 1.4</b>	<b>Соответствие требованиям WENRA</b>	<b>10</b>	а) соответствие в полном объеме б) частичное соответствие	б) проводится анализ допустимости/приемлемости
3 1.5	<i>Соответствие требованиям EUR</i>	10	а) соответствие б) неполное соответствие в) несоответствие	б) с анализом допустимости/приемлемости
<b>К 1.6</b>	<b>Соответствие заданным условиям внешних воздействий (природным и техногенным) площадки строительства (или общим условиям для территории Украины)</b>	<b>10</b>	а) соответствие	Вариант «несоответствие» не должен рассматриваться. <b>П р и м е ч а н и е.</b> В зависимости от условий тендера данный фактор рассматривается для конкретной площадки или для обобщенных условий
1.7	Запасы безопасности в части допустимых внешних воздействий			
<b>К 1.7.1</b>	<b>Наличие запасов безопасности (по отношению к условиям, приведенным для К 1.6)</b>	<b>5</b>	а) соответствие	Вариант «отсутствие запасов» не должен рассматриваться
3 1.7.2	<i>Величина запасов безопасности</i>	5	Численное значение запасов по различным воздействиям	Более высокое значение запаса соответствует лучшему выполнению критерия
<b>К 1.8</b>	<b>Обязательное национальное участие в сооружении АЭС</b>	<b>15</b>	Участие: в поставках оборудования; в выполнении строительно-монтажных и проектно-конструкторских работ; в проектировании; общий процент участия — не менее 50	Сопоставляются значения для сравниваемых вариантов. Более высокий процент соответствует лучшему выполнению критерия

в Украине ожидается в период с 2020 по 2040 год. В случае рассмотрения более позднего периода строительства энергоблоков возможны уточнение критериев и пересмотр их балльной оценки;

– типы энергоблоков, которые могут рассматриваться в период оценки до 2040 года;

– сооружение энергоблоков, в том числе замещающих, на новых площадках и на площадках действующих АЭС.

Алгоритм выполнения оценки заключается в анализе имеющейся проектной документации по следующим направлениям:

1. Общие критерии.
2. Безопасность.
3. Экономика и условия реализации.
4. Референтность.
5. Воздействие на человека и окружающую среду.
6. Инфраструктура.
7. Технические показатели.
8. Ядерно-топливный цикл.

Перечень направлений в целом соответствует направлениям оценки ядерно-энергетических систем и реакторных установок МАГАТЭ INPRO [4].

Для градации направлений по значимости вводится «Фактор значимости» каждого направления (М). При этом, с учетом [2, 3], для каждого из перечисленных выше восьми направлений определен фактор значимости, а именно: М1=0,1, М2=0,175, М3=0,175, М4=0,125, М5=0,1, М6=0,1, М7=0,1, М8=0,125.

Критерии по каждому направлению могут быть количественные и качественные. При этом целесообразно ряд критериев рассматривать как *ключевые*, т. е. обязательные для реализации проекта в условиях Украины (далее эти критерии обозначены через **К**), а ряд

критериев — как *значимые* (обозначены через **З**), которые используются для сравнительной оценки в случае сопоставимости результатов комплексной оценки.

В составе каждого направления для каждого критерия определен коэффициент L, который характеризует вес критерия в выбранном направлении и находится в диапазоне 2—20 % максимального показателя по направлению. При анализе каждого критерия оценивается уровень его выполнения и, соответственно, достигаемое значение. Сумма коэффициентов L по всему набору критериев каждого направления составляет 100 %.

По количественным критериям сравнение проводится на основании сопоставимости данных, по качественным критериям — методом экспертной сравнительной оценки.

Интегральная оценка каждого из проектов АЭС проводится суммированием всех весов по всем выполняемым критериям с учетом фактора значимости каждого направления.

Последовательность действий для сравнительной оценки включает:

- анализ полученной информации;
- оценку соблюдения ключевых критериев и отсева проектов, в которых они не соблюдаются;
- определение интегральной оценки по каждому проекту рассматриваемых новых АЭС.

В случае сопоставимости значений суммарных показателей (разница на уровне порядка 2 баллов) проводится дополнительная оценка по набору значимых критериев.

Предлагаемый набор критериев по направлениям «Общие критерии», «Безопасность» и «Экономика» подробно представлен в табл. 1—3, где ключевые и значимые критерии выделены шрифтом и курсивом соответственно. Критерии по направлениям «Референтность»,

Таблица 2. Критерии выбора энергоблоков АЭС по направлению 2 «Безопасность»

Номер критерия	Критерий	L, %	Характеристики	Описание
К 2.1	Частота повреждения активной зоны, 1/(реактор-год)	10		Более $10^{-6}$ – вариант не рассматривается.  Более низкое значение вероятности соответствует лучшему выполнению критерия
К 2.2	Частота предельного аварийного выброса, 1/(реактор-год)	10		Более $10^{-7}$ – вариант не рассматривается  Более низкое значение вероятности соответствует лучшему выполнению критерия
З 2.3	<i>Философия безопасности, включая сочетание активных и пассивных систем, приоритета пассивных систем, принципа резервирования и независимости, учет ошибок персонала и др.</i>	10	Высокое развитие пассивных систем безопасности (СБ)	Сравнение уровня предлагаемых решений
К 2.4	<b>Наличие технических решений, обеспечивающих предотвращение запроектных аварий и ограничение их последствий</b>	10	Да/Нет  Уровень технических решений	При отсутствии решений вариант не рассматривается.  Сравнение уровня предлагаемых решений

Номер критерия	Критерий	L, %	Характеристики	Описание
К 2.5	<b>Наличие мероприятий и организационных решений по предотвращению тяжелых аварий (ТА) и ограничению их последствий, включая blackout и полную потерю отвода тепла к конечному поглотителю (в том числе руководства по управлению ТА)</b>	10	Да/Нет  Уровень технических решений	При отсутствии решений вариант не рассматривается.  Сравнение уровня предлагаемых решений
3 2.6	<i>Расчетный индивидуальный, мЗв/ч, и коллективный, мЗв, риск для персонала при техническом обслуживании и ремонте</i>	7		Сравнение показателей. Меньшее значение соответствует лучшему выполнению критерия
2.7	Наличие тренажера и программы противоаварийных тренировок	2	Да/Нет	
3 2.8	<i>Характеристика барьеров локализации и обеспечение их функциональной устойчивости, в том числе независимости барьеров</i>	5	Уровень технических решений	Сравнение уровня предлагаемых решений
2.9	Ожидаемая частота отказов и нарушений, приводящих к останову энергоблока, отказ/год	7		Меньшее значение соответствует лучшему выполнению критерия
2.10	Период времени до необходимого вмешательства оператора, мин	3		
2.11	Применяемые компьютерные коды для анализа безопасности	2		Предпочтительность — применение международно признанных кодов; возможность передачи кодов исходя из пожеланий заказчика
3 2.12	<i>Возможность и условия передачи технологий, в частности обоснования технических решений, анализов безопасности</i>	7	Да/Нет	При оценке данного критерия преимуществом является знание предлагаемой технологии специалистами отрасли
2.13	Обращение с ядерным топливом, обеспечение безопасности хранения отработавшего ядерного топлива (ЯТ) в бассейне выдержки (БВ), в том числе: мониторинг состояния ЯТ в активной зоне (АЗ) на работающей реакторной установке (РУ); возможность аварийной выгрузки АЗ в БВ; альтернативные средства охлаждения БВ; возможность обследования состояния ЯТ в БВ; возможность выгрузки отработанного ядерного топлива из БВ при работе энергоблока	5	Уровень технических решений	Сравнение уровня предлагаемых решений
2.14	Основные мероприятия по минимизации образования радиоактивных отходов при различных режимах эксплуатации	2	Уровень технических решений	Сравнение уровня предлагаемых решений
3 2.15	<i>Гарантии того, что поставщик обладает достаточной квалификацией и специалистами для реализации проекта новой РУ на всех уровнях</i>	2	Изложение подтверждений (с необходимым документированием)	Сравнение убедительности представленной информации
2.16	Организация контроля и управления энергоблоком/РУ, в том числе: а) наличие блочного щита управления (БЩУ), резервного щита управления (РЩУ) и их независимость; б) объем контроля состояния РУ в различных режимах, включая ТА, с использованием аппаратуры с повышенными требованиями в части внешних воздействий	2	а) уровень технических решений  б) Да/Нет, уровень технических решений	Сравнение уровня технических решений
3 2.17	<i>Наличие технических средств обеспечения безопасности при возможных ТА</i>	3	Наличие технических средств	Сравнение уровня технических решений
3 2.18	<i>Обеспечение безопасности при внутренних пожарах (исходные события, методы оценки, оценка риска последствий)</i>	3	Уровень технических решений	Сравнение уровня технических решений

Таблица 3. Критерии выбора энергоблоков АЭС по направлению 3 «Экономика»

Номер критерия	Критерий	L, %	Характеристики	Описание
3.3.1	Стоимость строительства, в том числе основных объектов на промплощадке, \$/кВт	20		Меньшее значение соответствует лучшему выполнению критерия. Должна быть предоставлена информация по надежности оценки стоимости и факторам, которые влияют на эту оценку
3.3.2	Индикативная стоимость производства электроэнергии, \$/кВт	15		Меньшее значение должно соответствовать лучшему выполнению критерия. Приведенная стоимость электроэнергии (LDEGC) в соответствии с методологией МАГАТЭ, включая: капитальные затраты, эксплуатационные расходы, расходы на техобслуживание и ремонт, затраты на топливо
3.3.3	Сроки строительства на освоенной площадке, в том числе основного периода строительства, лет	8		Меньшее значение соответствует лучшему выполнению критерия
3.4	Схема организации строительства и принципы организации строительства	2	Предлагаемые решения	Приемлемость предлагаемой схемы для условий Украины
3.5	Условия обеспечения установленных сроков строительства, возможные неопределенности и риски и влияющие на них факторы	2	Предлагаемые решения	Приемлемость предлагаемой позиции
3.3.6	Возможные финансовые условия реализации проекта, включая кредитные финансовые риски и факторы, влияющие на эти риски	15	Предлагаемые решения	Приемлемость предлагаемой позиции
3.3.7	Общая оценка количества материалов, необходимых для осуществления проекта (основные материалы), т/кВт, м <sup>3</sup> /кВт	5		Меньшее значение соответствует лучшему выполнению критерия.
3.8	Оценочная стоимость снятия с эксплуатации (с полным или отложенным демонтажом РУ), \$/кВт	5		Меньшее значение соответствует лучшему выполнению критерия.
3.9	Использование принципов стандартизации и модульного строительства	2	Да/Нет с изложением существа принципов	Сопоставление уровня предлагаемых решений
3.10	Позиция поставщика в части организации тендерных процедур, в том числе с участием организаций страны поставщика	2	Предлагаемые решения	Приемлемость предлагаемых решений
3.3.11	Использование местных ресурсов	9	Местное использование материалов, изделий, трудовых ресурсов (желательно не менее 60 %)	Более высокий процент соответствует лучшему выполнению критерия
3.13	Потенциал проекта с точки зрения возможности учета опыта строительства и монтажа, а также повышения безопасности в процессе эксплуатации	2	Предлагаемые решения	Приемлемость предлагаемых решений
3.3.14	Стоимость эксплуатации и ремонта, \$/кВт	8		Меньшее значение соответствует лучшему выполнению критерия. Должна быть предоставлена информация о надежности оценки стоимости и приведены факторы, которые влияют на эту оценку
3.15	Топливная кампания, обогащение ЯТ и влияние этих факторов на стоимостные показатели	5	Мес., %	Приемлемость показателей и сравнительная оценка для вариантов

«Воздействие на окружающую среду», «Инфраструктура», «Технические показатели» и «Ядерно-топливный цикл» описываются аналогично и в статье не приводятся.

Общая оценка для каждого сравниваемого варианта выполняется с использованием следующего соотношения:

$$\begin{aligned} \Pi = & M1 \sum_{k=1,1}^{k=1,8} Li + M2 \sum_{k=2,1}^{k=2,18} Li + M3 \sum_{k=3,1}^{k=3,15} Li + M4 \sum_{k=4,1}^{k=4,6} Li + \\ & + M5 \sum_{k=5,1}^{k=5,7} Li + M6 \sum_{k=6,1}^{k=6,5} Li + M7 \sum_{k=7,1}^{k=7,18} Li + M8 \sum_{k=8,1}^{k=8,8} Li . \end{aligned}$$

После получения общей балльной оценки с учетом степени важности каждого из рассматриваемых направлений и весов каждого оцениваемого критерия можно выполнить сравнительную оценку проектов АЭС различных производителей, отличающихся как технико-экономическими характеристиками, так и полнотой удовлетворения принципам безопасности. Балльная оценка позволяет визуализировать получаемые результаты с целью наглядности при принятии решения.

### Выводы

Предлагаемый алгоритм критериальной оценки позволяет выполнить сравнительный анализ различных проектов АЭС, основываясь на ограниченном перечне технико-экономических характеристик рассматриваемых энергоблоков. При этом возможно использование информации, находящейся в открытом доступе, что существенным образом упрощает выполнение оценки без обращения к владельцам АЭС или соответствующим проектирующим организациям. Предложенный алгоритм оценки может быть верифицирован при рассмотрении предложений поставщиков технологий в случае принятия решения о строительстве нового энергоблока АЭС в Украине.

### Список использованной литературы

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження КМУ від 24.07.2013 № 1071-р. *Урядовий кур'єр*. 29.01.2014. № 17.
2. Lessons Learned from Nuclear Energy System Assessments (NESA) Using the INPRO Methodology. A Report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). Vienna : IAEA, 2009. (IAEA-TECDOC-1636).
3. Nuclear reactor Technology Assessment for Near Term Deployment. NP-T-1.10. Vienna : IAEA, 2013.
4. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. Vienna : IAEA, 2008. 129 p. (IAEA-TECDOC-1575).

### References

1. On Approval of the Energy Strategy of Ukraine till 2030: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1071-r dated 24 July 2013 [Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratchii Ukrainy na period do 2030 roku: Rozporiadzhennia KМУ vid 24.07.2013 No. 1071-r], *Uriadovi Kurier* dated 29 January 2014, No. 17. (Ukr)
2. Lessons Learned from Nuclear Energy System Assessments (NESA) Using the INPRO Methodology, Report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), Vienna, IAEA, 2009. (IAEA-TECDOC-1636).
3. Nuclear Reactor Technology Assessment for Near Term Deployment, NP-T-1.10, Vienna, IAEA, 2013.
4. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, Vienna, IAEA, 2008, 129 p. (IAEA-TECDOC-1575).

Получено 20.10.2016.