

Сравнительная оценка инновационных вариантов открытого ядерно- топливного цикла в Украине

В рамках участия Украины в международном проекте МАГАТЭ по инновационным реакторным технологиям и ядерно-топливным циклам INPRO выполнена сравнительная оценка вариантов конфигураций ЯТЦ на основе перспективных реакторных установок III+ и IV поколений. Критериями оценки являются приведенная стоимость произведенной электроэнергии, потребление природного урана и накопление отработавшего ядерного топлива. Оценки даны с учетом прогнозной динамики потребления электроэнергии в Украине до 2100 года и с использованием разработанной в рамках сотрудничества с МАГАТЭ модели энергетической системы Украины для кода MESSAGE. Показана возможность перспективного развития ядерной генерации Украины на основе инновационных реакторных установок на воде сверхкритических параметров с одновременным сокращением объемов накопления отработавшего ядерного топлива и снижением приведенной стоимости произведенной АЭС электроэнергии.

Ключевые слова: INPRO, ядерно-топливный цикл, реакторы на воде сверхкритических параметров, отработавшее ядерное топливо.

М. І. Власенко, О. В. Годун, В. М. Кир'янчук

Порівняльна оцінка інноваційних варіантів відкритого ядерно-паливного циклу в Україні

У рамках участі України в міжнародному проекті МАГАТЭ з інноваційних реакторних установок та ядерно-паливних циклів INPRO виконано порівняльну оцінку варіантів конфігурацій ЯПЦ на основі перспективних реакторних установок III+ та IV поколінь. Критеріями оцінки є зведена вартість виробленої електроенергії, споживання природного урану та накопичення відпрацьованого ядерного палива. Оцінки виконано з урахуванням прогнозованої динаміки споживання електроенергії в Україні до 2100 року та з використанням розробленої у рамках співпраці з МАГАТЭ моделі енергетичної системи України для коду MESSAGE. Показано можливість перспективного розвитку ядерної генерации України на основі інноваційних реакторних установок на воді з надкритичними параметрами з одночасним скороченням об'ємів накопичення відпрацьованого ядерного палива та зниженням зведеної вартості виробленої АЕС електроенергії.

Ключові слова: INPRO, ядерно-паливний цикл, реактори на воді з надкритичними параметрами, відпрацьоване ядерне паливо.

© Н. И. Власенко, О. В. Годун, В. Н. Кирьянчук, 2014

Концепция устойчивого развития энергетики, положенная в основу проектов МАГАТЭ INPRO [1], предполагает развитие, способное удовлетворить существующие потребности в энергии, не ставя под угрозу возможность удовлетворения потребности в энергии в будущем. Вместе с доступной стоимостью электроэнергии по сравнению с другими видами генерации, АЭС должны обеспечить минимизацию накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и предложить вариант окончательного обращения с ОЯТ в долгосрочной перспективе. Можно утверждать, что однозначного решения по окончательному обращению с ОЯТ в Украине нет. Вариант отложенного решения, принимаемый в Украине как базовый сценарий обращения с ОЯТ, не может рассматриваться как приемлемый.

В рамках реализации проектов под эгидой МАГАТЭ проведены оценки различных вариантов конфигураций ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), в том числе с опциями переработки и захоронения ОЯТ. Получаемые результаты зависят от методики анализа конфигураций топливных циклов, набора доступной исходной информации в виде обобщенных средневзвешенных стоимостных показателей и свидетельствуют о зависимости варианта обращения с ОЯТ от стоимости и доступности природного урана, услуг по обогащению, стоимости переработки и стоимости захоронения ОЯТ в геологических формациях.

В отчете Массачусетского технологического института [2] за 2010 год для условий США сделан вывод о нецелесообразности переработки ОЯТ в краткосрочной перспективе из-за дороговизны услуг по переработке; дальнейшее развитие ядерной генерации США рекомендуется реализовать на основе открытого ЯТЦ; в качестве оптимального варианта предлагается развивать региональные централизованные хранилища ОЯТ с периодом хранения до 100 лет.

Анализ перспектив развития ядерной генерации Украины до 2100 года на основе различных типов реакторных установок (РУ) проведен в рамках исследования [3]. Предварительные результаты, полученные с использованием кода МАГАТЭ MESSAGE и с учетом принятых технико-экономических данных, аналогичны выводам Массачусетского технологического института, сделанным для США. В случае открытого ЯТЦ объемы накопленных до 2100 года ОЯТ легководных РУ Украины составят более 28 тыс. тонн тяжелого металла (ТМ), что потребует ввода в эксплуатацию шести централизованных хранилищ сухого типа (ЦХОЯТ), подобных планируемому на площадке Чернобыльской АЭС. Понадобятся соответствующее финансирование, отвод земельных ресурсов, реализация мероприятий по снятию с эксплуатации ЦХОЯТ после завершения срока хранения ОЯТ и вывоз больших объемов отработавшего топлива на переработку или захоронение. В данном случае финансовые затраты пропорциональны объемам накапливаемого ОЯТ.

Важным критерием обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики является ее конкурентная способность в сравнении с другими видами производства электроэнергии. На фоне улучшения экономических показателей установок, работающих на угле и газе (применение паровых котлов с кипящим слоем, переход на парогазовые установки и т. д.) при незначительном росте их стоимости, наблюдается более чем двукратный рост капитальных затрат на строительство новых РУ при отсутствии концептуальных решений по повышению технико-экономических показателей эксплуатации. В исследовании «INPRO Assessment of the Planned Nuclear Energy System of Belarus» [4], выполненном для оценки перспектив развития ядерной

Таблица 1. Техничко-экономические параметры реакторов и элементов ЯТЦ

Параметр	ВВЭР-1000	ВВЭР-1200	SCWR [7]
Тепловая мощность РУ, МВт	3000	3200	3575
Электрическая мощность РУ, МВт	1000	1120	1600
КПД, %	33	35	44,8
КИУМ, %	78	90	90
Среднее обогащение топлива, %	4,7	4,7	10
Среднее по ТВС выгорание, ГВт·сут/т	60	60	70
Первая загрузка, т (ТМ)	71,13	71,13	83,8
Ежегодная перегрузка, т (ТМ)	19,62	19,62	16,7
Удельные капитальные затраты на строительство, \$/кВт	3400	5000	5000
Постоянные затраты, \$/кВт	55,0	69,3	69,3
Переменные затраты, \$/(МВт·ч)	0,50	0,50	0,50
Срок эксплуатации АЭС, лет	50	60	50
Срок строительства АЭС, лет	6	6	6
Стоимость фабрикации свежего ядерного топлива (СЯТ), \$/кг ТМ	300	300	300
Стоимость захоронения ОЯТ, \$/кг ТМ	600	600	600
Стоимость переработки отработавшего ядерного топлива, \$/кг ТМ	2000	2000	2000
Стоимость захоронения продуктов переработки ОЯТ (FPr), \$/кг ТМ	300	300	300
Стоимость захоронения минорных актинидов (МА), \$/кг ТМ	10 000	10 000	10 000

генерации в рамках INPRO [4], капитальные затраты на строительство АЭС принимаются на уровне 4700 \$/кВт, в то время как для углеводородной генерации стоимость ввода новой мощности принимается в диапазоне от 1200 \$/кВт для угольной до 700 \$/кВт для газовой генерации. В условиях Украины, при коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ) АЭС на уровне 85 % и стоимости первичного ресурса 100 \$/кг U и 400 \$/м³ газа, при аналогичных стоимостных показателях ядерная генерация уже не может обеспечить экономически обоснованную долю 50 % в производстве электроэнергии. Экономика ядерной генерации Украины нуждается в отдельном исследовании. Однако можно говорить, что при существующей стоимости энергоносителей капитальные затраты свыше 5 млрд долларов на строительство одноблочной АЭС не являются экономически обоснованными в условиях объединенной энергосистемы Украины.

Улучшение экономики ЯТЦ и снижение объемов накопления ОЯТ — ключевые факторы дальнейшего развития ядерной генерации. Учитывая применение легководных реакторов под давлением, представляется технически возможным и экономически целесообразным рассматривать развитие ядерной генерации Украины после 2030 года с применением реакторных установок IV поколения на воде сверхкритических параметров (super critical water reactor SCWR). Согласно предварительному анализу разработок ВВЭР-СКД по методологии INPRO [5], применение данного типа РУ наиболее обоснованно с позиции инфраструктуры и минимизации чрезмерных инвестиций, что связано с его техническими особенностями.

Основными техническими особенностями SCWR [6] являются вода со сверхкритическими параметрами (позволяет сконструировать небольшую активную зону), повышенное до 45 % значение КПД по сравнению с 33 % для действующих проектов легководных реакторов, меньшая топливная загрузка, применение одноконтурной системы, возможность воспроизводства делящегося материала и дожигания минорных актинидов (табл. 1).

В качестве базового сценария рассматривается открытый топливный цикл. Срок эксплуатации уже действующих блоков принят равным 45 годам (проектный срок эксплуатации 30 лет гарантированно будет продлен на 10 лет, на последующие 10 лет консервативно предполагается 50 %-ная вероятность продления). Энергоблоки Хмельницкой АЭС №№ 3 и 4 будут введены в эксплуатацию ориентировочно в 2018 и 2020 годах, соответственно. Срок их эксплуатации составит 60 лет. Ввод усовершенствованных РУ ВВЭР-1200 планируется после 2020 года (с повышенным выгоранием урана до 60 ГВт·сут/т при обогащении топлива до 4,95 %). Предусматривается долгосрочное хранение отработавших тепловыделяющих сборок.

Благодаря улучшенным технико-экономическим характеристикам SCWR доля генерации АЭС остается на уровне 50 % даже в случае массового вывода из эксплуатации уже действующих РУ в период 2030—2050 годов. Это существенным образом отличает сценарий с SCWR от возможного сценария с РУ типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, для которого в указанный период наблюдается спад доли АЭС в производстве электроэнергии до 36 % (рис. 1). Оптимизационная модель кода MESSAGE предусматривает приоритетный

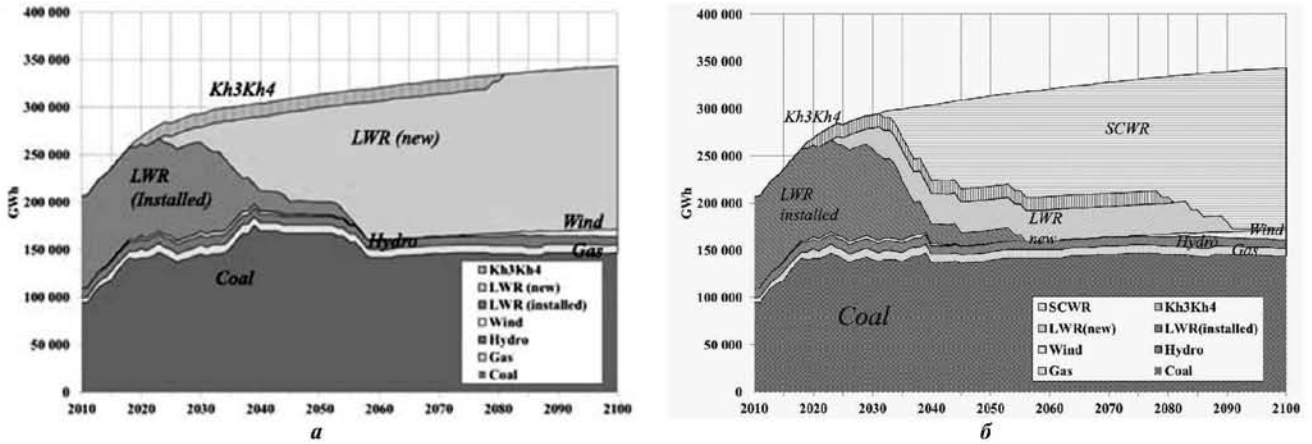


Рис. 1. Открытый ЯТЦ на основе ВВЭР-1000/ВВЭР-1200 (а) и ВВЭР-1000/SCWR (б).
Прогнозные оценки распределения производства электроэнергии в Объединенной энергосистеме Украины до 2100 года

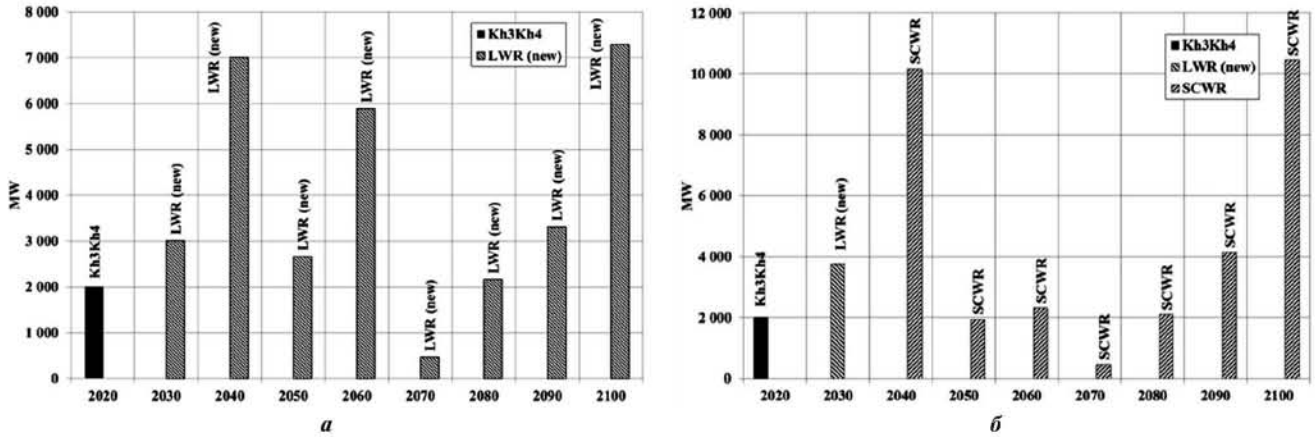


Рис. 2. Открытый ЯТЦ на основе ВВЭР-1000/ВВЭР-1200 (а) и ВВЭР-1000/SCWR (б).
Прогнозная динамика ввода новых мощностей АЭС в Украине до 2100 года

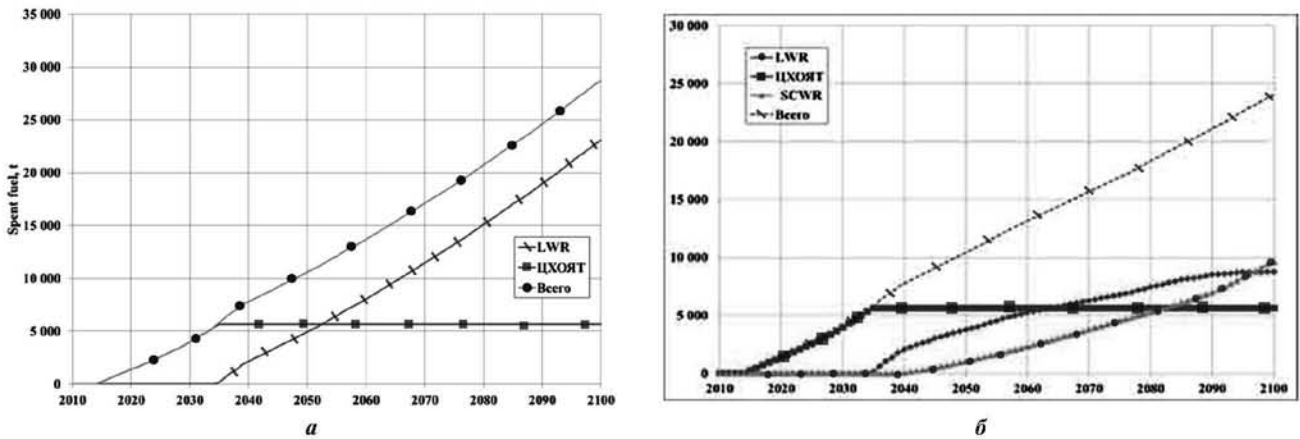


Рис. 3. Открытый ЯТЦ на основе ВВЭР-1000/ВВЭР-1200 (а) и ВВЭР-1000/SCWR (б).
Прогнозная динамика накопления ОЯТ

ввод SCWR после 2030 года по сравнению с эволюционной РУ типа ВВЭР-1200. Введенные до 2030 года мощности АЭС на основе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 сохраняются на минимальном уровне.

За счет оптимизации затрат на строительство и эксплуатацию, а также с учетом принятого в модели MESSAGE ограничения доли АЭС (не более 50 %) в Объединенной энергосистеме Украины (ОЭС), общая установленная электрическая мощность новых РУ SCWR в период 2030—2040 годов может составить 10 ГВт (рис. 2). Данный факт следует рассматривать не как руководство к действию (налицо чрезмерные финансовые затраты), а как подтверждение экономической эффективности SCWR по сравнению с другими видами генерации электроэнергии, в том числе угольной. Общая электрическая мощность энергоблоков для каждого из сценариев с ВВЭР-1200 и SCWR, вводимых в эксплуатацию в 2030—2100 годах, составляет 22 и 20 ГВт соответственно.

Общее количество накопленного ОЯТ к 2100 году достигнет 25 тыс. тонн (ТМ) (рис. 3), что сравнимо, благодаря лучшему топливоиспользованию, с результатами [3] варианта частично-замкнутого ЯТЦ на реакторах CANDU и значительно ниже возможного объема в 30 тыс. тонн (ТМ) для варианта открытого ЯТЦ на основе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Общий объем накопленного до 2100 года ОЯТ типа ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 составит 10 тыс. тонн (ТМ), столько же — для РУ на сверхкритических параметрах. Несмотря на улучшенные характеристики топливоиспользования, разведанных запасов природного урана для варианта с расширенной эксплуатацией РУ типа SCWR достаточно лишь до 2120 года. Дешевые запасы природного урана стоимостью до 100 \$/кг будут исчерпаны до 2050 года.

Приведенная стоимость производства электроэнергии для варианта с SCWR для принятых в модели ограничений и динамики ввода новых мощностей — 14,18 \$/(МВт·ч) по сравнению с 14,12 \$/(МВт·ч) для открытого ЯТЦ на основе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 с захоронением ОЯТ в геологическом хранилище. Незначительно большая приведенная стоимость обусловлена периодом ввода новых SCWR (10 ГВт с 2030 по 2040 годы) и влиянием временного фактора на экономику ЯТЦ.

Таким образом, результаты анализа показывают экономическую целесообразность развития ядерной генерации Украины после 2030 года на основе реакторов с водой сверхкритических параметров по сравнению с ЯТЦ на РУ с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Применение SCWR позволяет на 20 % снизить накапливаемые до 2100 года объемы ОЯТ и тем самым сократить финансовые затраты на обращение с ОЯТ в долгосрочной перспективе. Внедрение реакторов SCWR можно рассматривать как единственную возможность сохранить существующую долю АЭС в производстве электроэнергии в ОЭС Украины в условиях реализации открытого ядерно-топливного цикла.

Список использованной литературы

1. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. — Vienna : IAEA, 2008. — 129 p. — (IAEA-TECDOC-1575).
2. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. An Interdisciplinary MIT Study. 2009; MIT Fuel Cycle Largely Consistent with Industry Positions : Nuclear Energy Overview, 17—23 Sept. 2010.
3. *Власенко Н. И.* Оценка сценариев развития ядерной генерации Украины после 2030 года / Н. И. Власенко, О. В. Годун, В. Н. Кирьянчук // Ядерна та радіаційна безпека. — 2014. — Вып. 1(61). — С. 44—49.
4. INPRO Assessment of the Planned Nuclear Energy System of Belarus. — Vienna : IAEA, 2013. — 283 p. — (IAEA-TECDOC-1716).
5. *Богословская Г. П.* Предварительный анализ разработок ВВЭР-СКД с применением методологии ИНПРО, созданной МАГАТЭ / Г. П. Богословская, П. Л. Кириллов // Атомная техника за рубежом. — 2013. — № 3. — С. 3—13.
6. International forum Gen IV. Supercritical-Water-Cooled Reactor. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.gen-4.org/Technology/systems/scwr.htm>
7. Feasibility Study of Supercritical Light Water Cooled Reactors for Electric Power Production Progress : Report for Work Through September 2003 2nd Annual Report and 8th Quarterly. Report. September 2003 / Philip MacDonald, Dr. Jacopo Buongiorno, Cliff Davis, Dr. Robert Witt. — Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel BWXT Idaho, LLC.

References

1. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems — Vienna : IAEA, 2008. — 129 p. — (IAEA-TECDOC-1575).
2. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. An Interdisciplinary MIT Study. 2009; MIT Fuel Cycle Largely Consistent with Industry Positions : Nuclear Energy Overview, 17—23 Sept. 2010.
3. *Vlasenko M., Godun O., Kiryanchuk V.* Assessment of nuclear generation scenarios development in Ukraine after 2030. // Nuclear and Radiation Safety. — 2014. — С. 44—49. (61). — (ISSN 2073—6237).
4. INPRO Assessment of the Planned Nuclear Energy System of Belarus. — Vienna : IAEA, 2013. — 283 p. — (IAEA-TECDOC-1716).
5. *Bogoslovskaya G., Kirillov P.* Preliminary assessment of WWER — SCP INPRO methodology using, created by IAEA. // Atomic technics from abroad. — 2013. — № 3. — С. 3—13.
6. International forum Gen IV. Supercritical-Water-Cooled Reactor. — <http://www.gen-4.org/Technology/systems/scwr.htm>
7. *Philip MacDonald, Dr. Jacopo Buongiorno, Cliff Davis, Dr. Robert Witt.* Feasibility Study of Supercritical Light Water Cooled Reactors for Electric Power Production Progress Report for Work Through September 2003 2nd Annual Report and 8th Quarterly. Report. September 2003. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel BWXT Idaho, LLC.

Получено 26.05.2014.