

УДК 621.039.5+621.039.003

А. П. Чернов<sup>1</sup>, В. К. Бронников<sup>1</sup>,  
А. Н. Рыбчук<sup>1</sup>, Н. И. Власенко<sup>1</sup>, С. А. Попов<sup>1</sup>,  
Г. Н. Распопин<sup>2</sup>, С. В. Краснуха<sup>1</sup>,  
В. Л. Прохоров<sup>1</sup>, Д. Н. Сергеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственное предприятие «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом» (ГП «НАЭК «Энергоатом»), г. Киев, Украина

<sup>2</sup>Московский центр Всемирной Ассоциации Операторов АЭС, г. Москва, Российская Федерация

## Технико-экономическая оценка возможности использования реакторов CANDU в атомной энергетике Украины

Рабочей группой специалистов ГП «НАЭК «Энергоатом» и AECL проанализированы материалы по реактору Enhanced CANDU6 (EC6), в том числе на соответствие проекта требованиям стандарта MAGATЭ NS-R-1 и требованиям EUR, изучены опыт эксплуатации реакторов CANDU в Канаде (АЭС «Дарлингтон») и Румынии (АЭС «Чернавода»), а также возможности украинских предприятий по локализации проекта в Украине. Технико-экономическая оценка показала возможность применения энергоблоков EC6 на новых АЭС Украины наравне с блоками III поколения ВВЭР/PWR ведущих мировых производителей.

Ключевые слова: ядерный реактор EC6, ядерная безопасность, радиационная безопасность, ядерно-топливный цикл, экономика, локализация в Украине.

А. П. Чернов, В. К. Бронников, О. М. Рибчук, М. І. Власенко,  
С. О. Попов, Г. М. Распопін, С. В. Краснуха, В. Л. Прохоров,  
Д. М. Сергеев

Техніко-економічна оцінка можливості використання реакторів  
CANDU в атомній енергетиці України

Робочою групою фахівців ДП «НАЕК«Энергоатом» та AECL проаналізовано матеріали щодо реактора Enhanced CANDU6 (EC6), зокрема на відповідність проекту вимогам стандарту MAGATE NS-R-1 і вимогам EUR, вивчено досвід експлуатації реакторів CANDU в Канаді (АЕС «Дарлінгтон») і Румунії (АЕС «Чернавода»), досліджено можливості українських підприємств стосовно локалізації проекту в Україні. Техніко-економічна оцінка показала можливість застосування енергоблоків EC6 на нових АЕС України нарівні з блоками III покоління ВВЕР/PWR провідних світових виробників.

Ключові слова: ядерний реактор EC6, ядерна безпека, радіаційна безпека, ядерно-паливний цикл, економіка, локалізація в Україні.

© А. П. Чернов и др., 2012

Комплексная программа создания ядерно-топливного цикла в Украине, утвержденная в 1995 г., предусматривала реакторы CANDU как замещающие блоки РБМК Чернобыльской АЭС. Подписанное Соглашение между правительствами Украины и Канады по сотрудничеству в области мирного использования ядерной энергии от 20 декабря 1995 г. открыло возможности для использования технологии CANDU в Украине [1].

Делегация специалистов НАН Украины посетила компанию AECL (Канада) в 2007 г. для изучения и оценки возможностей применения технологии CANDU в ядерной энергетике Украины. Бюро отделения ядерной физики и энергетики НАН Украины приняло решение о целесообразности участия канадской государственной компании AECL в тендерных процедурах по выбору перспективного типа реактора для строительства АЭС в Украине [2].

Межведомственная рабочая группа в составе ведущих специалистов Минтопэнерго, РНБО, Секретариата Президента, НАН Украины, ГКЯР Украины, Киевского института «Энергопроект», Харьковского института «Энергопроект», УкрНИПИпромтехнологии, ГНИЦ СКАР [3] с января по июнь 2008 г. провела оценку канадских реакторов EC6 и ACR-1000 в сравнении с перспективными реакторами проекта АЭС-2006 (ВВЭР-1200). Сравнение выполнялось по 60 критериям и следующим направлениям: топливообеспечение; ресурсное обеспечение и промышленное производство; технико-экономические показатели сооружения; лицензионные аспекты; технико-экономические показатели эксплуатации; влияние на окружающую среду; технологические отходы; инфраструктурное обеспечение; инвестиционные аспекты; риски затягивания сроков введения в эксплуатацию. В результате был сделан вывод о целесообразности применения технологии CANDU в ядерной энергетике Украины на базе реакторной установки EC-6 на уровне, сопоставимом с применением референтного реактора АЭС-2006 [4]. Это решение Межведомственной рабочей группы было одобрено на НТС Минтопэнерго Украины, о чем проинформированы КМУ и СНБОУ.

НАЭК «Энергоатом» и AECL подписали Меморандум по технико-экономической оценке проекта CANDU EC6 (далее — ТЭОц) для возможного применения при строительстве новых АЭС в Украине [5]. Для организации выполнения работ по ТЭОц распоряжением НАЭК «Энергоатом» была создана рабочая группа. Работы организованы и проведены в соответствии с утвержденным Сторонами «Руководством проектом» по следующим направлениям: «Безопасность»; «Экономика»; «Инфраструктура»; «Ядерно-топливный цикл»; «Лицензирование и нормативная база».

От каждой Стороны по указанным направлениям были назначены руководители и исполнители, а также определены сроки выполнения работ. Принятая методика проведения ТЭОц как в AECL, так и в НАЭК «Энергоатом», предусматривала:

подготовку материалов компанией AECL по рассматриваемой задаче;

изучение специалистами НАЭК «Энергоатом», в том числе специалистами АЭС, представленных материалов, подготовку перечня вопросов по материалам, требующим пояснений;

ознакомление с опытом эксплуатации реакторов CANDU на АЭС «Дарлингтон» (Канада) и АЭС «Чернавода» (Румыния);

подготовку ответов компании AECL на поставленные специалистами НАЭК «Энергоатом» вопросы;

обсуждение общей редакции отчета по рассматриваемой задаче на совместных заседаниях рабочих групп на территории компании АЕСЛ или территории НАЭК «Энергоатом»;

рассмотрение отчета по рассматриваемой задаче на заседании рабочей группы в целом по проекту.

**Направление «Безопасность».** После детального анализа [6—19] констатировано наличие:

двух независимых друг от друга систем аварийного останова реактора;

холодного замедлителя под низким давлением;

большого объема легкой воды, окружающей активную зону;

большого объема легкой воды под куполом;

прочной гермооболочки, способной выдержать падение самолета;

соответствия проекта требованиям стандарта МАГАТЭ NS-R-1 по 219 критериям;

соответствия проекта требованиям EUR по 1327 критериям.

Особое внимание уделено анализу коэффициентов реактивности:

активная зона имеет малый запас реактивности (около 20 мК);

время жизни мгновенных нейтронов длительное;

изменение реактивности за одну операцию перегрузки незначительно (менее 1 мК на каждый канал);

большая активная зона позволяет иметь низкую индивидуальную реактивную способность устройствам регулирования реактивности (менее 2,5 мК);

перегрузка топлива медленная (один канал в течение нескольких минут);

реактор CANDU ЕС6 в рабочем интервале параметров нормальной эксплуатации имеет малые величины эффектов реактивности. Мощностной коэффициент реактивности для равновесного состояния активной зоны близок к нулю. Наличие близкого к нулю положительного пустотного коэффициента реактивности компенсируется в проекте за счет применения инженерных систем — двух пассивных независимых друг от друга систем аварийной остановки реактора А31 (управляющие стержни в замедлителе) и А32 (впрыскивание раствора поглотителя нейтронов в замедлитель), — что подтверждается нейтронно-физическими характеристиками. В случае реактивных аварий, связанных с расхождением контура, указанный мощностной коэффициент обеспечивает перевод реактора в подкритичное состояние.

Детальный анализ динамики всех коэффициентов показал, что увеличение мощности до аварийных уставок происходит за секунды, чего с избытком хватает для срабатывания трех систем аварийной защиты: действующей системы контроля и управления (остановка реактора в случае любой возможной аварии); резервной пассивной независимой системы А31 (ввод поглощающих стержней в замедлитель); резервной пассивной независимой системы А32 (впрыскивание поглощающего раствора в замедлитель), что гарантирует выполнение рекомендаций МАГАТЭ по показателям тяжелых аварий для перспективных реакторных установок.

**Направление «Экономика».** Проанализированы варианты строительства АЭС на основе двух энергоблоков ЕС6 и четырех энергоблоков ЕС6 при условии, что управление проектом осуществляется канадской стороной и оборудование для станции будет поставляться иностранными про-

изводителями, т. е. рассмотрен модифицированный тип контракта «под ключ» с ограниченным участием и ответственностью за риски в управлении проектом ГП «НАЭК «Энергоатом»» по СМР, подготовке персонала, поставке топлива и тяжелой воды. По результатам сравнительного анализа экономической оценки технологии CANDU проекта ЕС6 с проектом ВВЭР-1000 для блоков № 3 и № 4 Хмельницкой АЭС можно дать положительное заключение по конкурентоспособности первого; при этом ЕС6 имеет преимущество по топливной составляющей и уступает по затратам на ремонт в связи с заменой труб высокого давления. При проведении данной экономической оценки не учитывается потенциальная возможность реактора ЕС6 использовать переработанное ОЯТ реакторов ВВЭР в качестве топлива, что в свою очередь повысит эффективность выгорания природного урана и снизит затраты на захоронение ОЯТ ВВЭР и, возможно, снизит стоимость топлива для ЕС6.

**Опыт эксплуатации реакторов CANDU6 на АЭС «Чернавода» в Румынии.** Делегация ГП «НАЭК «Энергоатом»» в период с 28 марта по 3 апреля 2010 г. ознакомилась с атомно-промышленным комплексом Румынии на основе АЭС «Чернавода». В Румынии создана современная схема управления атомной энергетикой, что обеспечивает 100 %-ную энергетическую независимость производства электрической энергии. Функции государственного управления осуществляет Министерство экономики Румынии, имея в своем составе три соответствующих органа: Акционерное общество Nuclearelectrica по производству электрической и тепловой энергии (АЭС «Чернавода», завод ядерного топлива); Государственную корпорацию по ядерной деятельности Румынии (Институт ядерных исследований, завод тяжелой воды, проектный институт); Агентство по радиоактивным отходам.

Ядерно-топливный цикл Румынии, который включает добычу урановой руды, производство двуоксида урана, производство топливных таблеток, сборку твэлов и кассет, использование кассет в реакторе, промежуточное и временное хранение отработанного ядерного топлива, за исключением циркониевых комплектующих, осуществляется полностью на территории Румынии.

В 2009 г. на АЭС «Чернавода» (блоки № 1 и № 2) произведено 11752 млн кВт·ч электроэнергии, что составляет 20,4 % всей производимой электроэнергии в Румынии; при этом КИУМ блока № 1 составил 100,1 %, а блока № 2 — 90,6 %. Согласно данным журнала «Nuclear Engineering» (ноябрь 2010 г.), АЭС «Чернавода» по КИУМ за 12 месяцев на конец июня 2009 г. заняла второе место (95,4 %), а по накопительному КИУМ — первое место (87,3 %) среди 28 стран мира (данные о работе АЭС Украины в этом обзоре не приведены). Объем радиоактивных отходов, образованных на АЭС «Чернавода» в 2009 г., составил 20 м<sup>3</sup> на один блок, и не превышал 30 м<sup>3</sup> за все время эксплуатации. Коллективная доза облучения (man/mSv) на АЭС «Чернавода» за 12 лет эксплуатации (с 1997 по 2008 гг.) в среднем составила 495,4 man/mSv, что значительно (в 2,77 раза) меньше средней коллективной дозы облучения по всем блокам CANDU в мире (1371,9 man/mSv). В 2009 г. зафиксирована доза 479,3 man/mSv. Деятельность АЭС «Чернавода» с точки зрения воздействия на окружающую среду удовлетворяет всем требованиям Евросоюза, в том числе по содержанию трития в окружающей среде. Фактическая ежегодная потребность в подпитке тяжелой водой не превышает 3 т на блок при плановых в 2009 г. затратах 3,5 т.

Обращение с отработанным ядерным топливом осуществляется в два этапа: 1) промежуточное хранение в контейнере блока в течение не менее 6 лет; 2) сухое хранение в модулях на пристанционной площадке АЭС не менее 50 лет. Каждый модуль содержит 12 тыс. кассет (230,4 т тяжелых металлов).

Вся нормативная документация регулирующего органа Румынии по эксплуатации реакторов CANDU6 базируется на нормативных документах регулирующего органа Канады. На сегодня АЭС «Чернавода» работает по перспективному пятилетнему плану на 2009–2013 гг., по которому предусматривается достижение показателей лучших АЭС мира. Согласно схеме развития энергетики Румынии до 2020 г., планируется введение блока № 3 АЭС «Чернавода» в 2013 г. и блока № 4 в 2014 г.

Завод ядерного топлива FCN в г. Питешти включает все технологические процессы по формированию и спеканию топливных таблеток из природного урана, изготовлению твэлов и кассет, упаковке и поставке кассет на АЭС «Чернавода». С декабря 2007 г. это первый в Европе завод по производству ядерного топлива, который работает под полными гарантиями МАГАТЭ (IS). Начато строительство новых производственных мощностей завода с целью обеспечения ядерным топливом энергоблоков №№ 3, 4 АЭС «Чернавода».

Мощность завода тяжелой воды (ROMAG-PROD) в г. Дробета-Турну-Северин — 440 т/год. Исходное сырье — вода из р. Дунай и сероводород, производимый на предприятии в г. Дробета. Завод может наработать 2200 т тяжелой воды в течение пяти лет для четырех блоков CANDU6.

Институт ядерных исследований, который имеет в своем составе исследовательский реактор и горячие камеры, расположен в г. Питешти, обеспечивает научно-техническую поддержку на всех этапах жизненного цикла АЭС «Чернавода», развития атомной энергетики Румынии и ее инфраструктуры, в том числе завода ядерного топлива, завода тяжелой воды, а также безопасного обращения с РАО и ОЯТ.

Накопленный опыт развития атомной энергетики Румынии на основе реакторов CANDU6 безусловно может быть использован в Украине для реализации «Энергетической стратегии на период до 2030 года в области ядерной энергетики».

**Направление «Инфраструктура».** Проанализирована необходимая инфраструктура по обеспечению эксплуатации АЭС на основе двух спаренных реакторов ЕС6. Ее примером может служить соответствующая инфраструктура по обеспечению стабильной работы АЭС «Чернавода» в Румынии. С точки зрения обеспечения тяжелой водой может быть рассмотрен вариант сотрудничества с Румынией на первом этапе по схеме: Румыния Украине — тяжелую воду, Украина Румынии — природный уран. Создание мощностей по производству свежего ядерного топлива (использование в ЕС6 топлива на природном уране) исключает такие операции, как конверсия и обогащение, но требует большого объема фабрикации. Технология изготовления топлива для ЕС6 достаточно проста и может быть реализована в Украине.

Для локализации оборудования реакторов CANDU были выбраны следующие украинские предприятия: ЗАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения», г. Киев; ОАО «Сумской завод «Насос-энергомаш», г. Сумы; ОАО «Научно-исследовательский

и проектно-конструкторский институт атомного и энергетического насосостроения», г. Сумы; ОАО «Турбоатом», г. Харьков; ГП «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады», г. Днепропетровск; ООО «Торговая группа «Оскар», г. Никополь; научно-производственное объединение «Трубсталь», г. Никополь; ГНПП «Цирконий», г. Днепропетровск; ГП «Восточный горно-обогатительный комбинат», г. Желтые Воды; ГП «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии», г. Желтые Воды; частное акционерное общество «Радий», г. Кировоград.

Выбранные предприятия являются производителями оборудования и материалов для нужд атомной энергетики — арматуры, турбин, насосного оборудования, систем управления, изготовления трубной продукции, циркония и концентрата природного урана. Государственное космическое агентство Украины дало согласие на оценку производственных и технологических возможностей ПО «Южмаш» по изготовлению каландра и перегрузочной машины.

**Направление «Ядерно-топливный цикл».** Обычно применяется стратегия перегрузки 8 ТВС в смену. В среднем в сутки осуществляется два перегрузочных цикла. Перегрузка реактора CANDU является очень гибкой. Количество загружаемых и (или) выгружаемых ТВС может быть различным для каждой зоны реактора и изменяться от канала к каналу. Обычно для контроля распределения энерговыделения по объему активной зоны используются две различных схемы перегрузки с различным количеством загружаемых (выгружаемых) ТВС для зоны высокого энерговыделения (центр активной зоны) и для зоны низкого энерговыделения (периферия активной зоны). Схема перегрузки по высоте активной зоны не лимитирована, она может изменяться при необходимости. Для каждого канала может использоваться своя схема перегрузки. Канал может быть перегружен в случае обнаружения в нем дефектной ТВС. В случае, если есть подозрение, что после выгрузки дефектного топлива и загрузки свежего топлива возникнет превышение энерговыделения, возможно использование топливных сборок с обедненным ураном. Нейтронно-физические расчеты активной зоны обычно выполняются два или три раза в неделю; происходит постоянное отслеживание энерговыделения в активной зоне с прогнозированием предельных значений энерговыделения в объеме активной зоны.

После выдержки ОЯТ в течение шести лет тепловыделение и активность ОЯТ значительно снижаются до величин, когда дальнейшее хранение может происходить в сухих хранилищах MACSTOR, являющихся логическим развитием контейнерной концепции. Важным преимуществом сухого хранения ОЯТ CANDU служит высокая плотность размещения (12000 и 24000 кассет) из-за низкого остаточного тепловыделения и невозможности возникновения из ОЯТ CANDU критической массы.

**Направление «Лицензирование и нормативная база».** Проанализирован опыт лицензирования реакторов CANDU в Канаде, Республике Корея, Аргентине, Румынии и Китае. Процесс лицензирования в этих странах базировался как на канадских, так и на лицензионных требованиях национальных регуляторов этих государств. Ключевые моменты CANDU, которые позволяют успешно лицензировать CANDU6 в разных странах:

автоматизация процессов на АЭС, в том числе управление в аварийных режимах. Во время нормальной

эксплуатации и при изменениях мощности роль оператора сводится, прежде всего, к наблюдению за работой автоматики, а не к активному «управлению» ЯУ. В случае аварии проект предоставляет оператору достаточно времени для принятия решения в силу специфики физики реактора;

двойное резервирование систем останова реактора. CANDU6 имеет две совершенно независимые, фактически разделенные, избыточные системы останова реактора, каждая из которых может остановить реактор. Системы разработаны на разных принципах, используется различное оборудование. Кроме этого, существующая система контроля и управления останавливает реактор в случае любой вероятной аварии;

окончательное поглощение тепла замедлителем. Топливные каналы находятся в большом объеме замедлителя — холодной тяжелой воды низкого давления, что предотвратит развитие аварии в аварию с тяжелым повреждением топлива даже в случае совпадения аварии с отказом всей аварийной системы аварийного охлаждения активной зоны;

достижение внутренней безопасности и подкритичности реактора за счет смешивания с легкой водой замедлителя, т. е. отсутствие необходимости в подаче борированной воды на охлаждение топлива, что существенно упрощает охлаждение топлива в реакторе;

более глубокое выгорание ядерного топлива (до 0,2 % урана-235; для сравнения — 0,9 % в LWR-ВВЭР);

на два порядка меньшая, чем на АЭС с реакторами ВВЭР, площадь санитарно-защитной зоны вокруг АЭС с реакторами CANDU (радиус 500 и 5000 м, соответственно).

Сделан вывод, что CANDU соответствует международным критериям и философии безопасности, цели и требования по безопасности гармонизируются с целями, требованиями и критериями безопасности МАГАТЭ.

Законодательство Украины и нормативные документы высшего уровня не содержат каких-либо ограничений по применению конструкций ядерных установок или специальных требований в зависимости от типа ядерных установок. Конструкция и характеристики не противоречат фундаментальным принципам безопасности ОПБУ. Проект ЕС6 может быть принят Украиной для детального рассмотрения, лицензирования и сооружения [20].

### Выводы

Выполненная оценка определила ряд положительных особенностей технологии и не выявила непреодолимых препятствий на пути достижения целей проекта ТЭОц.

ТЭОц показала возможность применения энергоблоков ЕС6 на новых АЭС Украины наравне с блоками III поколения ВВЭР/PWR ведущих мировых производителей.

Реактор ЕС6 является достойным конкурентом энергоблокам ВВЭР-1200, AP1000, EPR-1650 на конкурсе по выбору перспективной установки для атомной генерации в Украине.

### Список использованной литературы

1. Угода між Урядом України та Урядом Канади про співробітництво в мирному використанні ядерної енергії від 20 грудня 1995 року.
2. Постанова Бюро відділення ядерної фізики та енергетики НАН України, протокол № 8 (45) §1 від 26 вересня 2007 року.
3. Наказ Мінпаливенерго України від 16 січня 2008 року № 18 «Про затвердження складу міжвідомчої робочої групи з вивчення можливостей та доцільності застосування в ядерній енергетиці України канадського реактора типу CANDU».
4. Шумква Н. Ю. Україна вважає прийнятним використання канадських реакторів CANDU в своїй енергосистемі / Н. Ю. Шумква, Г. Н. Распопин // УНІАН. — 24.09.2008.
5. Меморандум про взаєморозуміння між Національною атомною енергогенеруючою компанією «Енергоатом» і Атомік Енерджі ов Канада Лімітед про співпрацю у галузі ядерної енергетики. — 20.11.2008.
6. Общие положения безопасности атомных станций: НП 306.2.141—2008.
7. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением: НП 306.2.145—2008.
8. Безопасность атомных электростанций: проектирование: NS-R-1. — Вена : МАГАТЭ, 2003.
9. Требования к содержанию отчета по анализу безопасности действующих на Украине энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР. Руководящий документ. — К., 1995.
10. Требования к содержанию отчета по анализу безопасности АС с реакторами типа ВВЭР на стадии выдачи разрешения на ввод в эксплуатацию: КНД 36.302—96.
11. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-88). — 1988.
12. Нормы радиационной безопасности Украины: ГГН 6.6.1.-6.5.001—98 (НРБУ97).
13. Требования к программе обеспечения качества на всех этапах жизненного цикла ядерных установок: НП 306.5.02/3.017—99.
14. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок: ПНАЭГ-7—008—89.
15. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций: ПНАЭГ-5—006—87.
16. Правила устройства и эксплуатации систем аварийного охлаждения и отвода тепла от ядерного реактора к конечному поглотителю: ПНАЭГ-5—020—90.
17. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций: ПНАЭГ-10—021—90. — Утв. ГАН СССР. — 1990.
18. The European Utility Requirement (EUR) document. — Vol. 1—3. — 2007.
19. Техническая документация проекта Enhanced CANDU6 (ЕС6) / АЕСL. — 2009—2010. — 9183 с.
20. Недашковский Ю. А. Украинские атомники уже интегрировались в Европу» / Ю. А. Недашковский // Профиль-Украина. — 01.07.2011.

Получено 30.05.2012.