
УДК 621.039.003

В. К. Добровольский, канд. эконом. наук,
В. О. Костюк, А. В. Стогний, кандидаты техн. наук
Ин-т общей энергетики НАН Украины
(Украина, 03680, Киев, ул. Антоновича, 172,
тел. (044) 2201685, e-mail: stogniy@ienegy.kiev.ua)

Технико-экономические оценки в ядерной энергетике: моделирование и расчеты. I

Предложена экономико-математическая модель расчета цены производства электроэнергии ядерно-энергетическим комплексом (ЯЭК) с учетом затрат на всех технологических стадиях ядерно-топливного цикла (ЯТЦ). С использованием идей построения моделей производственного типа создана модель межпродуктового баланса определенной структуры, учитывающая все технологические особенности замкнутого ЯТЦ с реакторной установкой (РУ). Для ценовых расчетов применена модифицированная модель Леонтьева, полученная оптимальным агрегированием модели производственного типа. Подтверждено определяющее влияние стоимости основных фондов атомной электростанции на цену электричества по сравнению со стоимостью топлива и оборотных фондов. Модель может быть адаптирована к любым модификациям ЯТЦ в случае реализации сценариев развития ЯЭК с использованием усовершенствованных конструкций современных РУ.

Запропоновано економіко-математичну модель розрахунку ціни виробництва електроенергії ядерно-енергетичним комплексом (ЯЕК) з урахуванням витрат на всіх технологічних стадіях ядерно-паливного циклу (ЯПЦ). З використанням ідей побудови моделей виробничого типу створено модель міжпродуктового балансу певної структури, яка враховує всі технологічні особливості замкненого ЯПЦ для реакторної установки (РУ). Для цінових розрахунків застосовано модифіковану модель Леонтьєва, отриману оптимальним агрегуванням моделі виробничого типу. Підтверджено визначальний вплив вартості основних фондів атомної електростанції на ціну електрики порівняно з вартістю палива та обігових фондів. Модель може бути адаптована до будь-яких модифікацій ЯПЦ у випадку реалізації сценаріїв розвитку ЯЕК з використанням вдосконалених конструкцій сучасних РУ.

Ключевые слова: ядерно-топливный цикл, энергетический реактор, экономико-математическая модель, межпродуктовый баланс, цена производства электроэнергии.

Основные предпосылки развития ядерной энергетики сложились к концу XX столетия благодаря достижениям ведущих инженерных компаний в области энергетического машиностроения. Новейшие научно-технические достижения того времени, направленные на обязательное выполнение требований максимальной безопасности эксплуатации АЭС,

усилили концепцию реализации развития ядерной энергетики стран Европейского Союза и США согласно оптимистическому сценарию. Энергетическая стратегия Украины до 2030 г., утвержденная Минтопэнерго в 2006 г., разрабатывалась с учетом планов Национальной энергетической программы на период до 2010 г. и особенностей энергетической политики крупнейших энергетических систем мира — ЕС и США. Согласно стратегическим прогнозам у Украины появилась перспектива прироста производства электроэнергии от нетто 170 ТВт·ч до 200, 250, 320 и даже 400 ТВт·ч. Комплексная проблема определения оптимального соотношения долей технологий электрогенерации и предоставления приоритетного развития технологиям, отвечающим стратегическим планам государства, приобрела особое значение.

Несмотря на разносторонность и полярность взглядов, высказанных участниками многочисленных дискуссий [1], основные технологические достижения в области первичных энергетических процессов были ориентированы на ускоренное развитие ядерной энергетики в сочетании с использованием неуглеводородных возобновляемых источников энергии, включая производство водорода. Снижение стоимости производства электроэнергии достигается в первую очередь путем повышения КПД нетто, поскольку объемы капитальных затрат на строительство не поддаются точному прогнозированию на этапе проектирования, тем более, в условиях экономического кризиса.

В СССР [2] рассматривались масштабные сценарии оптимального развития топливной базы ядерно-энергетического комплекса (ЯЭК) с размещением до 2000 г. водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) реакторами на быстрых нейтронах с окисным плутониевым топливом. В течение первого десятилетия XXI века на выбор в качестве серийного реактора для дальнейшего развития украинского ЯЭК реально претендовали три реакторные установки: французско-немецкий легководный реактор EPR (European Pressurized Reactor) на уране, обогащенном до 4 % [3], канадский тяжеловодный реактор CANDU (Canada Deuterium) на естественном уране и его усовершенствованная конструкция [4] Advanced CANDU Reactor (ACR) на слабообогащенном до 2 % уране SEU (Slightly Enriched Uranium) и реакторная установка ВВЭР-1000 — улучшенный вариант водо-водяного реактора третьего поколения на обогащенном уране, разработанный российскими компаниями Атомэнергопроект и Гидропресс [5].

Французско-немецкий реактор EPR электрической мощностью 1550 — 1750 МВт относится к четвертому поколению. Эта совершенная конструкция имеет четыре уровня безопасности [3]. Поскольку Украина ориентируется на вступление в ЕС, вполне логичным является выбор западноевро-

пейских технологических стандартов. Для современного энергетического ядерного реактора приняты следующие глобальные долгосрочные рыночные ориентиры в 2003—2006 гг.

1. Достижение уровня технологической удельной стоимости конструкции ядерного энергоблока АЭС, меньше 1 тыс. долл. США/кВт с одновременным обеспечением экономической целесообразности проектов строительства энергоблоков в диапазоне мощностей от 300 до 1500 МВт по модульному принципу.

2. Достижение потенциальной возможности строительства в будущем до 1000 единичных блоков в разных странах.

3. Реализация непрерывного топливного цикла, а также использования тория в качестве ядерного топлива.

4. Синергизм с неуглеводородными возобновляемыми источниками энергии и обеспечение возможности производства водорода.

Согласно перечисленному выбор типа энергетического реактора не должен осуществляться на основе тендера, поскольку решение о выборе базовой реакторной установки (РУ) на перспективный период более 50 лет имеет не только экономическую но и политическую составляющую.

Оптимальные пути внедрения новейших ядерных технологий на АЭС Украины. Исследованию проблемы прогнозирования развития больших систем энергетики посвящено значительное число работ ученых, в частности, новосибирской школы. Например, в концептуальной работе Л. А. Мелентьева [6] представлены теоретические основы формирования оптимальных решений проблем развития больших систем энергетики (РБСЭ). В частности, изложены подходы к решению задачи поиска оптимальных решений РБСЭ в ее детерминированной постановке, а также в условиях неполноты имеющейся исходной информации [6, с. 257—282]. Из свойства «неопределенности» решений задачи сформулированы важные выводы:

а) о поиске совокупности реально возможных оптимальных решений действительной задачи оптимизации РБСЭ, т.е. о многовариантной оптимизации;

б) о сложности практической реализации такой задачи управления.

Еще в 1976 г. Л. А. Мелентьев обратил внимание на взаимосвязь неопределенности оптимальных решений РБСЭ и их экономической устойчивости. В условиях развития рыночных отношений, экономических и финансовых кризисов и перехода к децентрализованному управлению можно предположить сокращение зоны неопределенности по Мелентьеву, а именно влияние непредсказуемых факторов на первоначально определенные технико-экономические показатели возрастает и это может кардинальным образом воздействовать на дальнейшие управленческие решения.

В Государственной целевой программе развития ядерной энергетики до 2020 г. [7] рассмотрены альтернативные сценарии развития ЯЭК Украины интенсивного I и экстенсивного II типа. В частности, представлены следующие варианты сценариев.

I. Полномасштабное развитие отечественного инфраструктурного обеспечения, разработка и реализация национальных проектов введения в эксплуатацию ядерных энергоблоков в сотрудничестве с мировыми производителями:

1 — на основе исключительно легководных РУ под давлением (ВВЭР, PWR);

2 — на основе легководных РУ под давлением (ВВЭР, PWR) в сочетании с тяжеловодными РУ (PHWR—CANDU/ACR).

II. Сохранение существующего уровня отечественного инфраструктурного обеспечения и заказ сооружения новых блоков «под ключ»:

3 — только на основе легководных РУ под давлением (ВВЭР, PWR);

4 — на основе легководных РУ под давлением (ВВЭР, PWR) в сочетании с тяжеловодными РУ (PHWR — CANDU/ACR).

В табл. 1 приведены варианты сценариев развития ЯЭК для рассмотренных факторов. На основе сравнения указанных вариантов в работе [7] сформулированы аргументы избрания варианта **1** как наиболее выгодного по совокупности показателей (базовый сценарий).

В России намечена государственная программа строительства АЭС на основе реакторов ВВЭР, согласно которой предусматривается ввод до 42 ГВт новых мощностей до 2030 г. В работе [5] указаны основные технологические недостатки современной российской РУ, подтверждающие очевидный факт: возможности нынешней научно-технической сферы Российской Федерации существенно и кардинально уступают возможностям передовых мировых инженерных ядерных центров.

Таблица 1. Варианты развития ЯЭК Украины до 2020 г.

Фактор	Оценка по приоритетности вариантов развития			
	1	2	3	4
Уровень энергетической безопасности Украины	1	2	3, 4	3, 4
Экологическая оправданность	1, 2	3, 4	1, 2	3, 4
Техническая реализуемость	1, 2	3, 4	1, 2	3, 4
Экономическая эффективность	1, 2	1, 2	3, 4	3, 4
Социально-психологическая приемлемость	1	2	3	3
Итоговая оценка варианта	1	2	4	4

В соответствии с решением о дальнейшем развитии ЯЭК Украины естественно возникает вопрос об уточнении стоимости строительства реакторов (оценке первоначальной цены основных фондов (ОФ) производства АЭС) и поиске источников финансирования. В конце 2009 г. удельная стоимость российской реакторной установки составляла 1700—2500 дол. США на 1кВт установленной мощности (оценка сводных капитальных затрат на строительство РУ по проекту В-392Б [8]). Согласно данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) стоимость одного ядерного энергоблока мощностью 1,0—1,4 ГВт колеблется в пределах 4—6 млрд. дол. США в зависимости от условий региона. Вместе с тем, рост цен на материалы и услуги, строительные-монтажные работы в течение кризисного для мировой экономики периода с 2008 по 2010 г. привел к заметным сдвигам в расчетных прогнозных данных относительно цены производства электроэнергии на АЭС по сравнению с другими технологиями электрогенерации.

В 2000—2010 гг. выполнен ряд исследований в области экономики ядерной энергетике и функционирования ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Данные об экономических оценках опубликованы в аналитических отчетах ведущих энергетических агентств по вопросам развития электроэнергетики и атомной энергетике [9—12] и известных научно-исследовательских учреждений мира [13, 14]. Широкое применение получили методы расчета средней цены на электроэнергию по следующим схемам: LCOE (Levelized Cost Of Electricity) — без учета инфляции при расчете стоимости составляющих затрат [9, 11, 14], COE — с ежегодным учетом среднего темпа инфляции; традиционные методы, обеспечивающие гарантированную доходность капитала ROE (Return On Equity). Использование этих методов предполагает выполнение расчетов цены производимой продукции с помощью традиционных финансово-калькуляционных приемов, что не вполне обосновано с точки зрения современной экономической теории.

Программно-целевое моделирование функционирования и развития ядерной энергетике и ЯТЦ. Для определения сценария дальнейшего программного развития ЯЭК Украины необходимо получить современные оценки цены производства электроэнергии реакторными энергоблоками ВВЭР с учетом стоимостных показателей технологий замкнутого ЯТЦ и разработать простой теоретически обоснованный инструментарий для различных вариантов расчетов таких оценок.

Особенности методов оптимизации функционирования ядерного топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в работе [2] детализированы в контексте его равновесного планового развития как системы отраслей, последовательно перерабатывающих сырье, а также глубоко проанализирована

проблема оптимального запуска технологических процессов фабрикация ядерного топлива в структуре взаимосвязанных производств советского ТЭК. В частности, согласно функциональной схеме ЯЭК [2, с. 51, рис. 1.9] на основе применения общего критерия оптимальности и методов решения линейных оптимизационных задач планирования, впервые разработанных Л. В. Канторовичем [15], экономический анализ выполнен с использованием аналитической однопродуктовой двухтопливной модели оптимизации звена ядерной энергетики. При этом детально изучена роль топливного компонента в структуре приведенных затрат для расчета оценок стоимости продукции (энергии) и определения цен на главные топливные полуфабрикаты — уран и плутоний.

Однако рассматриваемые модели имеют три характерные особенности:

1) энергетический блок АЭС вырабатывает один продукт — условную энергию, не разделенную на электричество и теплоту разных потенциалов;

2) цена продукта находится из условия нулевой рентабельности;

3) внимание сконцентрировано на топливной промышленности ЯЭК, в связи с чем ядерные реакторы, работающие в составе АЭС, рассматриваются отдельно в рамках оптимизационной плановой задачи развития топливной базы (например, в постановке задачи по Локшину [3, с. 147]. Суть применяемого подхода заключается в переходе от «неправильных» к научно обоснованным равновесным ценам на все модельные продукты.

Среди факторов, определяющих реальные и расчетные технико-экономические показатели украинских АЭС, следует отметить совокупность ключевых детерминантов, присущих мировой ядерной экономике [16]. Две трети стоимости производства электроэнергии ядерным энергоблоком составляют постоянные затраты на обслуживание капитального строительства («ЕРС costs» — расходы на проектирование, материалы, строительные работы). Объем этих затрат свидетельствует о значительной чувствительности к ряду факторов, включая идиосинкратические риски нерыночного характера [9].

Основным недостатком оценок стоимости электроэнергии, выполненных методами LCOE и COE в условиях, предопределяемых перечисленными факторами, являются ненадежность расчетов, обусловленная неточностью исходных данных и трудностями их прогнозирования. Такой же сложной представляется проблема получения достоверных данных для определения технологических коэффициентов модели при использовании модели производственного типа [3, с. 112].

Рассмотрим результаты ценовых расчетов производства в рамках подхода, концептуальным основанием которого являются идеи и методы программно-целевого управления развитием сложных и больших систем.

Суть подхода заключается в представлении энергетического сектора как последовательности состояний, начиная с базового состояния в определенном году и некоторого числа последующих опорных состояний. Базовое и опорные состояния характеризуются набором технико-экономических показателей, известных только для базового состояния, отражают хозяйственную конъюнктуру текущего времени и проектируются (прогнозируются) для опорных состояний.

Основной исходный показатель, характеризующий состояние, — объем годовой выработки электроэнергии. Годовые объемы задаются округленными числами без точной привязки к определенному году, поскольку точная привязка усложнит процедуры прогнозирования. Такой подход следует рассматривать как дополнение к традиционным методам прогнозирования. Например, можно предложить последовательность базового и опорных состояний, характеризуемых выработкой электроэнергии в объемах (в ТВт · ч) 173 (по состоянию на 2002 г.), 200, 250, 320, 400.

При прогнозировании опорных состояний расчеты выполняются в два этапа. На первом этапе устанавливаются объемы и доли структуры генерации (выработки ТЭС, ТЭЦ, АЭС, ГЭС, ГАЭС и других технологий), зонные пропорции, величины и соотношения установленных мощностей, развитие электрических сетей, потребность в органическом топливе различных видов и ядерном топливе, материальные и другие расходы. Предполагается, что совокупность указанных показателей разрабатывается в нескольких сбалансированных вариантах.

Второй этап — вычисление объемов инвестиций и ресурсов, необходимых для перехода от базового до прогнозируемого опорного состояния, одного или нескольких. При этом устанавливаются объемы и структура инвестиций с учетом потребностей отдельно на расширенное производство и на реконструкцию. На втором этапе выполняются ценовые расчеты по схеме расчета цены производства. Для получения надежных результатов расчета объемов и оценок целесообразно использовать ценовой метод, т.е. определять цены при норме 8 — 12 % прибыли. Для этого требуются данные о показателях удельной стоимости ОФ (в млн. долл. США на 1 ГВт установленной мощности), коэффициентах использования мощности, зонных коэффициентах, материальных затратах на производство 1 МВт·ч энергии и др.

Основные условия решения технико-экономической задачи нахождения равновесных цен следующие:

технико-экономические расчеты основаны на производственных показателях действующей АЭС для одного операционного года;

модель годового межпродуктового баланса учитывает все технологические особенности замкнутого ЯТЦ с энергетическим реактором типа ВВЭР;

цены на электрическую энергию рассчитаны по схеме цены производства с учетом полных затрат на всех стадиях ЯТЦ.

Моделирование в ядерной энергетике осуществляется с помощью экономико-математической модели производственного типа, которая является задачей линейного или нелинейного программирования. Исходные понятия этой модели — ингредиент и технологический способ.

Ингредиенты делятся на модельные продукты и экзогенные ресурсы. Продукты — это предметы труда, производимые и расходуемые в моделируемой системе, некоторая их часть покидает моделируемую систему в определенных конечных объемах (поставляется внешним потребителям), что и является экономически обоснованной целью функционирования производственной системы. К экзогенным ресурсам относятся предметы труда (материальные затраты), которые потребляются, но не производятся в пределах моделируемой системы, а также затраты труда (зарботная плата), амортизационные отчисления, производственные основные и оборотные фонды.

Между производственными фондами осуществляется «заимствование», поскольку их физическая форма остается неизменной с поправкой на износ ОФ. При моделировании систем энергетике следует учитывать наличие продуктов—выбросов и отходов. В ядерной энергетике — это радиоактивные отходы. Совокупность ингредиентов создает внешнюю номенклатуру ингредиентов. Совокупность продуктов и экзогенных ресурсов в этой номенклатуре описывается кодификатором ингредиентов.

Технологический способ как модельное понятие отражает реальные технологические процессы, состоит из технологических коэффициентов выпуска и расходов и представляется в форме вектора-столбца. Совокупность таких столбцов образует технологическую матрицу системы уравнений модели, которая делится на продуктовую и ресурсную матрицы. Для реальной экономики характерны комплексные производства, выпускающие и потребляющие кроме основного еще и дополнительные продукты. В электроэнергетике — это, кроме электрической энергии, тепловая энергия ТЭЦ, в ядерной энергетике — это отработанное ядерное топливо (ОЯТ).

Один из выпускаемых технологическим способом продуктов назовем основным, остальные продукты, выпускаемые данным технологическим способом, назовем побочными. В пределах всей технологической матрицы побочные продукты могут входить или не входить в номенклатуру основных. Побочные продукты, не вошедшие в номенклатуру основных, назовем дополнительными. Дополнительные продукты образуют технологическую матрицу дополнительных продуктов.

Классификация модельных продуктов на основные и дополнительные имеет фундаментальное значение в ценовом моделировании с помощью модели производственного типа. Принятая для этого исследования номенклатура ингредиентов приведена в кодификаторе ингредиентов (табл. 2), который выполняет организующую роль при формировании набора исходных данных модели.

Модельные технологические способы как отображения технологических процессов производства электроэнергии на АЭС в составе замкнутого ЯТЦ приведены в табл. 3.

Как правило, в модели производственного типа выпуск одного и того же основного продукта осуществляется несколькими технологическими

Таблица 2. Кодификатор ингредиентов модели для расчета стоимости электроэнергии АЭС в составе замкнутого ЯТЦ

Код	Название ингредиента	Единица измерения
<i>Модельные основные продукты</i>		
p001	Урановая руда	т
p002	Закись-окись урана U_3O_8	т
p003	Природный металлический уран в составе U_3O_8	т
p004	Гексафторид природного урана UF_6	т
p005	Природный уран в составе UF_6	т
p007	Изотопно-обогащенный уран в составе UF_6	т
p008	Топливные сборки	т
p010	Электрическая энергия АЭС	МВт · ч
p020	Регенерированный уран из отработанного ядерного топлива	т
p026	Отвальный уран-238 (0,25 % урана-235) в хранилищах	т
p027	Захороненные остеклованные твердые радиоактивные отходы	т
p028	Захороненные радиоактивные отходы-газы	т
p029	Плутоний в хранилищах	т
<i>Модельные дополнительные продукты</i>		
a142	Фтор	т
a144	ОЯТ (в сборках)	т
a145	Отвальный уран-238 (0,25 % урана-235)	т
a146	Остеклованные твердые радиоактивные отходы	т
a147	Радиоактивные отходы-газы	т
a148	Плутоний	т
a150	Регенерированный уран	т
a156	Отвальный уран-238 (0,25 % урана-235) в хранилищах	т
a157	Захороненные остеклованные твердые радиоактивные отходы	т
a158	Захороненные радиоактивные отходы-газы	т
a159	Плутоний в хранилищах	т

Продолжение табл. 2

Код	Название ингредиента	Единица измерения
<i>Модельные экзогенные ресурсы в операционных затратах</i>		
r211	Операционные затраты (добыча руды, производство U_3O_8)	дол. США
r212	Операционные затраты (производство UF_6)	дол. США
r213	Операционные затраты (изотопное обогащение природного U)	дол. США
r214	Операционные затраты (изготовление топливных сборок)	дол. США
r215	Операционные затраты (функционирование блока АЭС)	дол. США
r216	Операционные затраты (переработка отходов)	дол. США
<i>Модельные экзогенные ресурсы в ОФ</i>		
r331	Стоимость ОФ: добыча руды, производство U_3O_8	дол. США
r332	Стоимость ОФ: производство UF_6	дол. США
r333	Стоимость ОФ: изотопное обогащение U	дол. США
r334	Стоимость ОФ: изготовление топливных сборок	дол. США
r335	Стоимость ОФ: функционирование блока АЭС	дол. США
r337	Стоимость ОФ: переработка отработанного топлива	дол. США
<i>Модельные экзогенные ресурсы в оборотных фондах</i>		
r551	Урановая руда	т
r552	Закись-окись урана U_3O_8	т
r553	Гексафторид природного урана	т
r554	Изотопно-обогащенный гексафторид урана	т
r555	Топливные сборки	т
r557	Первичная загрузка реактора	т
r562	ОЯТ после хранения на АЭС	т
r563	Регенерированный уран	т
r565	Отвальный уран в хранилищах	т
r566	Захороненные остеклованные твердые радиоактивные отходы	т
r567	Захороненные радиоактивные отходы-газы	т
r568	Плутоний в хранилищах	т

способами. Модель становится вариантной, и при формулировании некоторого критерия оптимальности с соответствующей целевой функцией она становится оптимизационной. Но в данном случае использована безвариантная модель производственного типа, в которой каждый основной продукт выпускается только одним технологическим способом. Такую модель формально можно получить из вариантной, если агрегировать технологические способы по выпуску определенного основного продукта

Таблица 3. Технологические способы в модели производственного типа

Код способа	Название процесса (технологического способа)	Код продукта	
		основного	дополнительного
t001	Добыча урановой руды	p001	Отсутствует
t002	Переработка урановой руды на гидрометаллургическом предприятии и производство окиси (закись-окиси) урана U_3O_8 (аффинаж)	p002	"
t004	Производство гексафторида природного урана UF ₆ необходимой чистоты	p003	a142
t007	Изотопное обогащение урана до 3,5 % содержания урана-235 и получение отвального урана с 0,2—0,3 % содержанием урана-235	p004	a144, a145
t008	Изготовление топливных сборок из обогащенного металлического урана или его оксида	p005	a145
t010	Производство электроэнергии АЭС на реакторах на тепловых нейтронах	p010	a146
t013	Обработка ОЯТ на радиохимическом заводе: 1) регенерация остаточного урана (рецикл урана-235); 2) рецикл изотопов плутония; 3) остекловывание твердых радиоактивных отходов; 4) улавливание радиоактивных отходов в газовой фазе (криптон-85, йод-129, тритий) и их контейнеризация	p013	a147, a148, a149
t026	Хранение отвального урана-238 (0,25 % урана-235) в хранилищах	p026	Отсутствует
t027	Захоронение твердых радиоактивных отходов в пригодных для хранения геологических структурах	p027	"
t028	Хранение (или захоронение) радиоактивных отходов в газовой фазе	p028	"
t029	Хранение плутония	p029	"

в один технологический способ. При этом сумма агрегирующих коэффициентов равна единице.

Указанная модифицированная модель совпадает с моделью расширенного, т.е. дополненного подсистемой уравнений для экзогенных ресурсов, межпродуктового баланса (МПБ). Особенность модели баланса заключается в том, что она имеет ценовые свойства, которые позволяют рассчитывать некоторые системные цены согласно установленным принципам ценообразования, в частности методом цены производства с учетом

нормы прибыли (коэффициента эффективности). Расширенная модель имеет вид

$$\begin{aligned} \|g_i^j\| \{x_j\} &= \{y_i\}, \\ \|d_e^j\| \{x_j\} &= \{\mathbf{d}_e^*\}, \\ \|r_h^j\| \{x_j\} &= \{\mathbf{r}_h^*\}, \end{aligned}$$

где $\|g_i^j\|$ и $\|d_e^j\|$ — продуктовые матрицы выпуска и затрат соответственно основных и дополнительных продуктов; $\|r_h^j\|$ — матрица расходов экзогенных ресурсов; $\{\mathbf{d}_e^*\}$ — вектор объемов выпуска дополнительных продуктов; $\{\mathbf{r}_h^*\}$ — вектор объемов потребления экзогенных ресурсов; i — основной продукт; j — технологический способ выпуска i -го основного продукта ($i = j$); e — дополнительный продукт; h — ресурс.

Строкам основной и дополнительной продуктовых матриц сопоставим цены основных и дополнительных продуктов, а строкам ресурсной матрицы — цены и оценки экзогенных ресурсов. Используя столбцы продуктовых и ресурсной матриц расширенного баланса как строки, получаем ценовую балансовую модель в виде системы уравнений следующего вида:

$$\|g_j^i\| \{p_i\} + \|d_j^e\| \{v_e\} - \|r_j^h\| \{w_h\} = \{0_j\}, \quad (1)$$

где $\|g_j^i\|$ и $\|d_j^e\|$ — транспонированные матрицы выпуска и затрат основных и дополнительных продуктов; $\|r_j^h\|$ — транспонированная матрица расходов экзогенных ресурсов; $\{p_i\}$ и $\{v_e\}$ — векторы цен основных и дополнительных продуктов; $\{w_h\}$ — вектор-столбец цен и оценок экзогенных ресурсов; $\{0_j\}$ — нуль-вектор.

Система (1) является неопределенной, так как число стоимостных неизвестных в ней превышает число уравнений на величину числа видов дополнительных продуктов и экзогенных ресурсов. Для проведения ценовых расчетов и исследований часть значений цен следует зафиксировать так, чтобы число неизвестных цен равнялось числу уравнений. Наиболее важен расчет системных цен на основные продукты при заданных значениях цен дополнительных продуктов и экзогенных ресурсов.

Соответствующее решение системы (1) можно получить матричным умножением слева ценовой системы уравнений на транспонированную обратную основную продуктовую матрицу $\|g_j^i\|^{-1}$:

$$\|g_j^i\|^{-1} \|g_j^i\| \{p_i\} + \|g_j^i\|^{-1} \|d_j^e\| \{v_e\} - \|g_j^i\|^{-1} \|r_j^h\| \{w_h\} = \|g_j^i\|^{-1} \{0_j\}.$$

Отсюда получаем следующую векторно-матричную формулу (ценовой оператор) для вычисления системных цен:

$$\{p_i\} = \|g_j^i\|^{-1} \|r_j^h\| \{w_h\} - \|g_j^i\|^{-1} \|d_j^e\| \{v_e\}. \quad (2)$$

Информационное обеспечение. Исходные числовые и текстовые данные описательного типа, характеризующие процессы ядерной энергетики и ЯТЦ, предлагается организовывать в определенные целостности, представляющие собой понятия технологического способа. Технологический коэффициент выпуска основного продукта устанавливается, как правило, равным единице, остальные коэффициенты определяют потери других модельных продуктов и ресурсов в расчете на этот единичный коэффициент. Информационное наполнение технологических способов моделирования процессов ядерной энергетики осуществлено для всех процессов ЯТЦ постадийно, включая функционирование реакторного блока АЭС.

Методические рекомендации по экономическим расчетам с учетом процессов переработки и обращения ОЯТ с применением упомянутого метода LCOE, а также данные о постадийном учете производственных затрат и материального баланса ЯТЦ для французского реактора PWR (N4) опубликованы в [18]. Для определения ожидаемой динамики цен к дате пуска реактора PWR в 2000 г. группа экспертов из 14 стран и четырех международных организаций выполнила работу по сбору стоимостных показателей технологий ЯТЦ на всех его стадиях. В работе [18] приведены сравнительные данные об использовании стоимостных оценок в ретроспективе (исследования 1983 и 1984 гг.) и данные о различиях ценовых показателей ЯТЦ для реакторов других типов, в частности канадского CANDU и японского ATR (Advanced Thermal Reactor).

В целом в публикациях, посвященных вопросам ядерной энергетики, содержится много конечных технико-экономических оценок, но не приведены методики, по которым эти оценки получены. Различную информацию, имеющую отношение к решаемой задаче, можно найти в работах зарубежных и отечественных ученых [19—25], однако в некоторых случаях она представляется сомнительной.

(Продолжение статьи см. в следующем номере)

An economic-mathematical model has been proposed for estimating the production cost of electric power of nuclear-power complex (NPC) with allowance for expenditures at all technological stages of the nuclear-fuel cycle (NFC). The use of the ideas of constructing the production type models permitted to create a model of interproduct balance of certain structure which takes into account all technical peculiarities of closed NFC with the reactor plant (RP). Leontyev's modified model obtained by optimal aggregation of the production type model has been used for the cost calculations. The authors have confirmed the determining effect of cost of the basic funds of

nuclear power plant on the cost of electricity as compared to the cost of fuel and working funds. The model can be adapted to any NFC modification in the case of implementing the scenarios of NPC development using the perfected structures of modern RP.

1. *Scenarios of Nuclear Power Growth in the 21st Century*// Report of an Expert Group Study carried out jointly by IAEA, NEA of the OECD, Université Paris Dauphine, Los Alamos National Laboratory (USA), University of Tokyo (Japan), Energy Systems Institute of Russian Academy of Sciences (Russia), and the Centre of Geopolitics of Energy and Raw Materials, University of Paris, France // OECD-NEA. — OECD Publishing, 2002.
2. *Шевелев Я. В., Клименко А. В.* Эффективная экономика ядерного топливно-энергетического комплекса. — М. : Рос. гос. гуманитар. ун-т, 1996. — 736 с.
3. *Barr B. et al.* New Advanced Pressurized Water Reactors and Dynamics of Progress in Nuclear Power Generation // Bertrand Barr (CEA), Pierre Lecocq (EdF), Bertrand Vieillard-Baron (Framatom). — Framatom, 2004. [www.framatom.fr].
4. *Piolo I. L. et al.* The future of nuclear. SCWR generation IV high performance channels // Proc. of 11th International conference on Nuclear Engineering (ICONE 11). — Tokyo, Japan, April 20—23, 2003.
5. *Кругликов П. А., Смолкин Ю. В.* Оптимизация тепловой схемы и параметров теплообменного оборудования — фактор повышения эффективности АЭС.// Вісн. СевНТУ. Вип.106: Механіка, енергетика, екологія. — Севастополь: вид-во СевНТУ, 2010. — С. 141—145.
6. *Мелентьев Л. А.* Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. — М. : Высшая школа, 1976. — 336 с.
7. *Литвинський Л. Л.* Концепція державної цільової програми розвитку ядерної енергетики до 2020 року // Мат. Круглого столу «Розвиток атомної енергетики — запорука енергетичної безпеки держави». Презентація ДНІЦ СКАР. Київ, 25 жовтня 2009 р. — [http://www.slideshare.net/AtomNews/ss-4634406].
8. *Бронніков В. К.* Організація будівництва і фінансування ядерних енергоблоків // Там же. Презентація ВП «Атомпроектінжиніринг» НАЕК «Енергоатом». Київ, 25 жовтня 2009 р. — [http://www.slideshare.net/AtomNews/ss-4634406].
9. *Projected Costs of Generating Electricity.* Updated in 2010. // NEA, OECD/IEA. — OECD Publishing, 2010.
10. *The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2005-2030* // World Nuclear Association, WNA Market Report by Haruo Maeda. — WNA, 2005.
11. *The Economics of the Nuclear Power* // World Nuclear Association (Updated 9 March 2011). — WNA, 2011.
12. *Muckerheide J.* How To Build 6,000 Nuclear Plants by 2050 // 21st Century Science & Technology, 2005. — 18 p. — [http://www.21stcenturysciencetech.com/Articles%202005/Nuclear2050.pdf].
13. *The Future of Nuclear Power.* Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power Study// Massachusetts Institute of Technology. — MIT, 2003. — [http://web.mit.edu/nuclearpower].
14. *The Economic Future of Nuclear Power* // University of Chicago, 2004.— [http://www.mcs.anl.gov/~anitescu/EXTRAS/READING/NuclIndustryStudy-Summary.pdf].
15. *Канторович Л. В.* Математические методы организации и планирования производства// Применение математики в экономических исследованиях. — М. : Соцэкгиз, 1959. — С. 235—275.
16. *Ядерна енергетика: міфи і реальність.* Тематичні дослідження з ядерної енергетики. (Heinrich Böll Foundation) —Рівне: Екоклуб, 2006. — 244 с.

17. *Koopmans T. C. Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities// Activity Analysis of Production and Allocation. (Cowles Commission Monograph No 13). — N-Y : Wiley, 1951. — С. 33—97.*
18. *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle// OECD Publications. OECD-NEA, 1994 — [http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/efc].*
19. *Коллиер Дж., Хьюитт Дж. Введение в ядерную энергетику/ Пер. с англ. 1987 г. — К. : Энергоатомиздат, 1989. — 253 с.*
20. *Ран Ф. и др. Справочник по ядерной энерготехнологии. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 751 с.*
21. *Бойко В. И., Демянюк Д. Г., Кошелев Ф. П. и др. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения: Учеб. пособие. — Томск: изд-во ТПУ, 2005. — 490 с.*
22. *Lenders M. Uranium Enrichment by Gaseous Centrifuge // Urenco Limited. — [http://www.urencolimited.com].*
23. *Синев Н. М. Экономика атомной энергетики: Основы технологии и экономики производства: Учеб. пособие. 3-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.*
24. *Топольницький М. В. Про власний ядерно-паливний цикл України // Енергетика и електрифікація. — 2001. — № 11. — С. 21—25.*
25. *Добыча и переработка урановых руд в Украине. — Киев : «АДЕФ-Украина», 2001. — 238 с.*

Поступила 14.06.11;
после доработки 26.09.11

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Владимир Константинович, канд. экон. наук, ст. науч. сотр. Ин-та общей энергетики НАН Украины. В 1961 г. окончил Львовский политехнический ин-т. Область научных исследований — теоретические вопросы экономико-математического моделирования энергетики.

КОСТЮК Василий Осипович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та общей энергетики НАН Украины. В 1986 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — прогнозирование развития ТЭК, методы и средства экономико-математического моделирования энергетических систем и комплексов.

СТОГНИЙ Алексей Вадимович, канд. техн. наук, зав. отделом Ин-та общей энергетики НАН Украины. В 2001 г. окончил Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — методы и средства экономико-математического моделирования энергетических систем и комплексов; оптимизация структуры ТЭК и его технологических систем на основе экономико-математических моделей.