
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@ienergy.kiev.ua)

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

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 замкнутого 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.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ядерно-топливный цикл, энергетический реактор, экономико-математическая модель, межпродуктовый баланс, цена производства электроэнергии.

Технологические способы в ядерной энергетике и ЯТЦ. Согласно схеме функционирования ЯТЦ с энергетическими реакторными установками типа ВВЭР рассмотрим следующие технологические способы.

1. Добыча урановой руды, обогащение урановой руды и производство уранового концентрата, производство гексафторида урана требуемой чистоты.

2. Изотопное обогащение урана до 3,5 % содержания урана-235 и хранение отвалного урана с 0,25 %-ным содержанием урана-235.

3. Производство электроэнергии АЭС (процессы преобразования ядерного топлива в реакторах на тепловых нейтронах).

4. Обработка ОЯТ на специальном предприятии — радиохимическом заводе: регенерация остаточного урана (так называемый рецикл урана-235, а также рецикл изотопов плутония); остекловывание твердых радиоактивных отходов; улавливание радиоактивных отходов в газовой фазе (криптон-85, йод-129 и тритий), а также их хранение.

Проанализируем перечисленные технологические способы полного замкнутого ЯТЦ на начальной стадии (до загрузки топлива на АЭС), стадии превращения энергии топлива на АЭС и конечной (после АЭС) стадии. Числовые данные разработаны с преимущественным использованием информации, опубликованной в зарубежных источниках [20, 21].

Процессы добычи урановой руды, ее переработки и производства гексафторида природного урана осуществляются тремя технологическими способами, представленными в табл. 4. В процессе переработки урановой руды выход чистого урана составляет 95 %, следовательно, на одну тонну чистого урана U требуется 526,3 т 0,2 %-ной урановой руды. Одна тонна закиси-оксида урана U_3O_8 содержит 0,8485 т природного урана.

Изотопное обогащение урана, как известно, выполняется двумя способами: газодиффузионным и, более старым, газодиффузионным (табл. 5). Газодиффузионный способ постепенно вытесняет газодиффузионный. К началу XXI века примерно 55 % природного урана обогащалось более эффективным газодиффузионным способом. Единица разделительной работы (ЕРР) является важнейшим понятием в технологии обогащения урана и характеризует объем работы по разделению изотопов. Формально выражается в единицах массы и рассчитывается по формуле $ЕРР = WV(xw) + PV(xp) - FV(xf)$, где $V(x)$ — оценочная функция, $V(xf) = (1 - 2x) \ln((1 -$

Таблица 4. Формальное описание технологических способов переработки руды

Ингредиенты и показатели	Добыча урановой руды	Получение U_3O_8	Производство UF_6
Урановая руда (0,2 % содержания урана), т	1,0	-526,3	
Закись-окись урана, т		1,0	- 0,8485
Гексафторид природного урана UF_6 , т			1,0
Затраты электроэнергии, МВт·ч	- 0,02	-7,0	- 0,5
Фтор, т			- 0,1515
Другие текущие затраты, дол. США	16,0	14000	2000
Фондоемкость, дол. США	125,0	27500	6000

– $x)/x$); F — первоначальная масса обогащаемого урана с содержанием урана-235 на уровне xf ; P — масса обогащенного урана до содержания урана-235 на уровне xf ; W — масса отвального урана с содержанием урана-235 на уровне xw .

Процессы преобразования ядерного топлива в энергетическом реакторе типа ВВЭР. Удельная энерговыработка ядерного топлива B (МВт · сут/т) — это тепловая энергия, выделенная единицей массы топлива при данном изотопном составе за весь период использования в реакторе. Практически для топлива, обогащенного до 3,5 % содержания урана-235, $B = 40000$ МВт · сут/т, среднее за год $B_{cp} = 28000$ МВт · сут/т [23]. Относительную массу разделившегося топлива, или глубину выгорания, включая относительную массу накопленных продуктов деления и продуктов их радиоактивного распада, обозначим α (кг/т). Соотношение между α и B имеет вид $\alpha = k \cdot B$, где k — постоянный коэффициент, характеризующий каждый делимый нуклид ($k = 1,05$ для U^{235} и $k = 1,07$ для Pu^{239}). В свою очередь, величина α имеет две составляющие: $\alpha = \alpha(U^{235}) + \alpha(Pu^{239,241})$, или $\alpha = \alpha_{U5} + \alpha_{Pu9,1}$.

В табл. 6 показатель $\alpha(U^{238*})$ — это масса U^{238} , которая при делении быстрыми нейтронами составляет от 4 до 5 % всех ядер, которые разделились, т.е. приблизительно 2 кг/т топлива. Остаточным ядерным топливом называют уран-235, радионуклиды, образовавшиеся в результате его расщепления, а также плутоний. Отработанное ядерное топливо — это остаточное топливо с учетом доли урана-238. Данные, приведенные в

Таблица 5. Структура технологического способа изотопного обогащения урана

Ингредиенты и показатели	Газоцентрифужный метод		Газодиффузионный метод	
	На одну тонну обогащенного урана	На одну тонну ЕРР	На одну тонну обогащенного урана	На одну тонну ЕРР
Уран изотопно-обогащенный до 3,5 %, т	1,0	0,208	1,0	0,208
Природный уран при 0,71 %, т	-7,0	-1,458	-7,0	-1,458
Отвальный уран при 0,25 %, т	6,0	1,25	6,0	1,25
ЕРР, т	4,8	1,0	4,8	1,0
Затраты электроэнергии, МВт·ч	480	100	11520	2400
Другие текущие затраты, дол. США	288	60	336	70
Фондоёмкость, дол. США	1248—2160	260—450	1440—1920	300—400

табл. 6, использованы для построения модельного технологического способа функционирования РУ.

В табл. 7 приведены балансовые данные на производственный год. Полная загрузка реактора в топливных сборках рассматривается в ценовых расчетах как оборотный фонд.

Расчеты цен на электроэнергию АЭС выполнены с учетом затрат на всех стадиях ЯТЦ. Упрощенная формула формирования цены производства C имеет вид $C = C + e \Phi$, где C — себестоимость; Φ — прибыль, пропорциональная воспроизведенной стоимости производственных фондов Φ , состоящих из ОФ и оборотных фондов; e — коэффициент экономической эффективности.

В многопродуктовой модели расчет цен выполняется решением системы ценовых уравнений, что позволяет матричную формулу (2) (ценовой оператор) представить в виде $P = G^{-1} (R W - D V)$.

В данном исследовании не учитывались расходы на поддержание оборотных фондов, таких как запасы ядерного топлива на АЭС и в реакторах АЭС, запасы ОЯТ, хранящегося несколько лет на АЭС и др. Принято, что АЭС работают в базовом режиме, и, несмотря на некоторое снижение мощности АЭС в ночное время, такой режим несколько ухудшает показатели эффективности АЭС.

Таблица 6. Состав свежего и отработанного ядерного топлива [23]

Составляющие	Масса, кг
Свежее топливо	1000
U^{235} в свежем топливе	44
Отработанное топливо, всего	1000
U^{238} в отработанном топливе	930
Остаточное топливо α , всего	42
U^{235}	12,6
U^{236}	5
Np^{237}	0,6
$\alpha (U^{235})$ — разделенная масса U^{235}	$44 - (12,6 + 5 + 0,6) = 25,8$
Pu^{239}	5,6
Pu^{241}	1,8
$Pu^{239} + Pu^{241}$	$5,6 + 1,8 = 7,4$
Вклад $\alpha (Pu^{239, 241} + U^{238*})$	$42 - 25,8 = 16,2$
Делимые нуклиды в отработанном топливе	$12,6 + 5,6 + 1,8 = 20,0$

Формирование цен основано исключительно на информации, содержащейся в технологических матрицах расширенной модели МПБ. Такой подход допустим, поскольку решается задача нахождения стоимостных оценок функционирования ЯТЦ.

Рассмотрим структурные особенности модели. Структура технологических матриц модели АЭС в схеме замкнутого ЯТЦ представлена на рис. 1—3. Изотопное обогащение урана выполнено двумя технологическими способами: газодиффузионным и газодиффузионным с относительными вкладами в производство обогащенного урана соответственно 55 и 45 %. Для вычислений эти два способа агрегируются в один с агрегирующими коэффициентами 0,55 и 0,45.

Особенностью структуры основной продуктовой матрицы (см. рис.1) является включение в основную матрицу технологических коэффициентов затрат электроэнергии в различных производствах ЯТЦ (кроме блока захоронения радиоактивных отходов). Учитываются те затраты на использованную электроэнергию, которые получаются в результате конкретного числового расчета.

Существуют объективные основания для подобного приема. Наиболее энергоемким в ядерной технологии является изотопное обогащение урана газодиффузионным методом. Например, в состав крупнейшего в мире газодиффузионного завода на юге Франции входит АЭС с тремя реакторами. Если по каким-либо соображениям такой прием неприемлем,

Таблица 7. Структура модельного технологического способа функционирования РУ

Ингредиенты и показатели	Коэффициент
Мощность, ГВт	1,0
Ядерное 4,4 % топливо в сборках, т	31,3
Загружено U^{235} в ядерном топливе, кг	– 44,0
Затраты U^{235} в ядерном топливе, кг	–25,8
Выдача брутто	6,8
Выдача нетто	6,4
ОЯТ (в сборках), т	31,3
Остаточное ядерное топливо, кг	42,0
Полная загрузка в топливных сборках, т	93,0
Другие текущие затраты, млн. дол. США	60,0
Оценочная стоимость ОФ (на 1,0 ГВт), млн. дол. США	1740—3500

Примечания: 1. Выдача брутто при коэффициенте использования установленной мощности, равном 0,775, что соответствует продолжительности работы 6789 ч в год; 2. Выдача нетто равна электроэнергии брутто, умноженной на (1—0,055), т.е. на коэффициент выдачи в сеть, равный 0,945.

Технологический способ														
	t001	t002	t003	t004	t005	t007a	t007b	t008	t010	t013	t026	t027	t028	t029
a142														
a144								0,478						
a145						6,0	6,0		0,0313	-1,01				
a146											-1			
a147									0,034			-1		
a148									0,0003				-1	
a150									0,0074					-1
a156									-0,0313					
a157										-1				
a158										-0,034				
a159										-0,0003				
										-0,0074				

Рис. 2. Дополнительная продуктовая матрица

		Технологический способ													
		t001	t002	t003	t004	t005	t007a	t007b	t008	t010	t013	t026	t027	t028	t029
r211		16	14000												
r212				2000											
r213						288	336								
r214								18							
r215									60000						
r331										120000	2500	60000	12000	10000	
r332		125	27500												
r333					6000										
r334							1704	1680							
r335									25						
r337										1100000					
r211										1300000	5000	250000	90000	75000	

Рис. 3. Матрица экзогенных ресурсов (операционные затраты и ОФ)

то ресурс «электрическая энергия» альтернативно должен быть включен в номенклатуру экзогенных ресурсов с определенными технологическими коэффициентами затрат и ценой потребления электроэнергии в ЯТЦ как экзогенного ресурса.

Технологические способы переработки ОЯТ и его захоронения де-факто независимы от технологических способов производства ядерного топлива и функционирования АЭС. Но материальные затраты на переработку и захоронение ОЯТ, хранение отработанного урана следует отнести на производство электроэнергии АЭС, что обуславливает специфическую структуру дополнительной продуктовой матрицы (см. рис. 2). В номенклатуру дополнительных продуктов добавлены пять новых позиций (в табл. 2 они выделены курсивом). В дополнительной продуктовой матрице указаны дублирующие технологические коэффициенты, позволяющие отнести расходы, связанные с производством продуктов, на производство электроэнергии АЭС. Следует заметить, что подобная перестройка структуры дополнительной продуктовой матрицы обусловлена специфическим требованием ценового моделирования и никоим образом не влияет на прямое решение расширенной модели.

Матрица экзогенных ресурсов содержит две номенклатурные позиции: текущие операционные расходы и стоимость ОФ. Особенность структуры этой матрицы заключается в дифференцировании указанных позиций по технологическим способам, что позволяет применять в различных технологических способах различные значения коэффициентов эффективности ОФ. Известно, что производство природного урана, а также его изотопное обогащение значительно монополизированы и имеют высокую доходность. Например, доходность европейской компании URENCO по обогащению урана газодиффузионным методом в 2004 г. составила приблизительно 24 %.

Цены дополнительных продуктов в упомянутой дополнительной номенклатуре должны быть равны ценам, рассчитанным для тех же продуктов в основной продуктовой матрице. Несколько шагов итеративного пересчета обеспечивают совпадение цен с точностью до четырех значащих цифр. Результаты расчетов цен для шести значений коэффициента эффективности использования ОФ приведены в табл. 8 и на рис. 4, где стоимость ОФ означает оценочную воспроизводимую стоимость ОФ энергоблока АЭС (в первом приближении она соизмерима со стоимостью сооружения объекта, определенной в начале его строительства).

Несмотря на то, что оценки сводных капиталовложений [6], в соответствии с отраслевыми системными исследованиями и отчетами ведущих зарубежных энергетических агентств, получили широкое применение, основным вопросом ценообразования является справедливая оценка

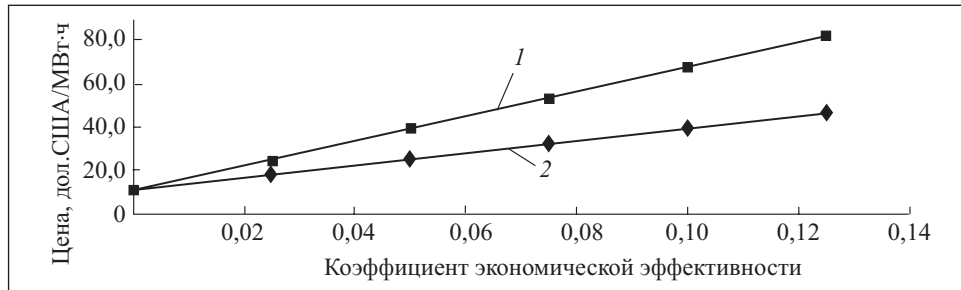


Рис. 4. Графики цен на электроэнергию АЭС в зависимости от желаемой экономической эффективности производства: 1 — стоимость ОФ 3500 дол. США/кВт; 2 — стоимость ОФ 1740 дол. США /кВт

реальной стоимости основных производственных фондов всех технологических объектов ЯТЦ.

Например, в работе [9, с. 59] в состав приведенных капитальных затрат включены оценки издержек на выполнение работ по снятию энергоблока с эксплуатации. Прибавка к цене производства для разных типов РУ в странах OECD составляет от 0,09 (в Корее) до 0,29 дол. США/МВт·ч (в Швейцарии). Удельные затраты зависят от стоимости заемных средств, например в случае 10 %-ной ставки дисконтированные затраты с учетом 60-летнего расчетного жизненного цикла РУ снижаются до 2-3 центов за МВт·ч. Совокупная стоимость работ по закрытию энергоблока оценивается весьма приблизительно и для реактора номинальной мощностью 1000 МВт предположительно составляет 300—400 млн. дол. США, т.е. приблизительно 15 % начальной стоимости строительства. Вопрос финансирования работ по закрытию в виде будущих отсроченных затрат не представляет принципиальных осложнений для принятия решения инвестором на основе традиционных проектных расчетов в рамках LCOE: удельные дисконтированные затраты будут незначительными [10, с. 43].

Таблица 8. Расчетные цены на электроэнергию для выбранных значений первичной стоимости ОФ АЭС

Коэффициент экономической эффективности	Цена на электроэнергию АЭС, дол. США/МВт·ч, при стоимости ОФ	
	1740 дол. США/кВт	3500 дол. США/кВт
0	11,29	11,29
0,025	18,54	25,44
0,05	25,49	39,59
0,075	32,59	53,74
0,10	39,68	67,89
0,125	46,78	82,05

В работе [26] опубликованы оценки совокупных и удельных технико-экономических издержек для случаев планового и досрочного снятия с эксплуатации РУ украинских АЭС. Выводы о максимальных экономических последствиях основаны на сравнении объемов работ по закрытию энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000 (в настоящее время не эксплуатируется) и ВВЭР-440 для наиболее неблагоприятных сценариев. По мнению специалистов, затраты на досрочное закрытие этих РУ в 2005 г. оценивались в 450 дол. США/кВт и выше.

В работе [9] не приведены данные о затратах на закрытие российских РУ, однако оценки начальной стоимости строительства реактора ВВЭР единичной мощностью 1150 МВт в России достигают 3500 дол. США/кВт [10, с. 43], что принято верхней границей стоимости ОФ в табл. 8.

Полученные расчетные оценки стоимости производства ядерной электроэнергии в Украине хорошо согласуются с обновленными данными о прогнозных стоимостных оценках, определенных по схеме LCOE с учетом дисконтирования денежных потоков, которые периодически приводятся в отчетах международных энергетических агентств. В частности, в работах [9, 11] впервые приведены оценки стоимости производства электроэнергии ядерными энергоблоками России и Китая — стран, не входящих в Организацию по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЕСД). Представленные расчетные данные имеют значительные расхождения, что не способствует продвижению инвестиционных проектов в отрасли.

Для формирования вывода относительно основных ценообразующих факторов в результате анализа чувствительности расчетных данных к изменениям текущих расходов (ТР) АЭС (в диапазоне 80—120 %) и КИУМ, равного 0,75—0,80, получены данные, которые приведены в табл. 9. В дальнейшем предполагается уточнить стоимостные оценки технологичес-

Таблица 9. Изменение цены электроэнергии в зависимости от ТР (80—120 %) АЭС и КИУМ (0,75—0,80) при ОФ = 3500,0 дол. США/кВт

ТР	КИУМ	Цена электроэнергии, дол. США/МВт·ч, при коэффициенте экономической эффективности					
		0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125
1,0	0,750	11,68	26,32	40,95	55,59	70,22	84,86
1,0	0,800	10,93	24,63	38,32	52,02	65,72	79,42
1,0	0,775	11,29	25,44	39,59	53,74	67,89	82,05
0,8	0,775	9,37	23,52	37,56	51,83	65,98	80,13
1,2	0,775	13,22	27,37	41,52	55,67	69,82	83,97

Примечания. Значения ТР указаны без затрат на ядерное топливо относительно базового значения. Номинальные расчетные значения параметров и цен выделены полужирным шрифтом.

ких процессов для ЯТЦ альтернативных РУ и учесть расходы, необходимые для поддержания ОФ, таких как запасы ядерного топлива на АЭС и в РУ АЭС и запасы ОЯТ, сохраняемые на АЭС несколько лет.

Выводы

1. Техничко-экономические расчеты оценок производственных цен для комплекса АЭС в составе замкнутого ЯТЦ целесообразно выполнять с использованием модифицированной модели расширенного МПБ в отличие от традиционных рыночных моделей расчета средней приведенной стоимости электроэнергии за проектный период эксплуатации (LCOE) или доходности капитала (ROE). Разработанный модельный инструментарий позволяет рассчитать фактическую или прогнозируемую цену производства ядерной электроэнергии на АЭС на период выбранного хозяйственного (календарного) года для действующих и новых энергоблоков.

2. Предложенная экономико-математическая расчетная модель производственного типа в форме конкретно определенной структуры позволяет рассматривать ЯЭК как замкнутую технико-экономическую систему с позиции программно-целевого подхода и рассчитывать цены на продукты моделируемой системы посредством определения среднегодовых оценок, в частности стоимости произведенной ядерной электроэнергии с учетом полных затрат на всех стадиях ЯТЦ и сохранением желаемой доходности производства.

3. Чувствительность стоимостных оценок производства электроэнергии относительно составляющих текущих операционных расходов и стоимости ОФ можно исследовать комбинированно, используя наборы различных технико-экономических показателей комплексного производства.

4. Изложенная методика расчета справедливых цен на производство электроэнергии открывает возможности для усовершенствования действующей системы ценообразования в электроэнергетике. Продуманная ценовая и тарифная политика должна способствовать «выравниванию» экономических условий хозяйствования в основных сегментах генерации, в частности формированию равновесной средней цены поставок электричества на объединенный рынок с учетом надбавок за использование маневренных мощностей. Потенциал фактора «дешевой электроэнергии», обусловленный технико-экономическими показателями производителей (например, в виде прибыли АЭС) может быть использован государственным регулятором во благо развития энергетической отрасли.

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, University 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. Pioro 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 тепло-механического 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 // Матеріали 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. Update 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. *Coortmans 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 і електрифікація*. — 2001. — № 11. — С. 21—25.
25. *Добыча и переработка урановых руд в Украине*. — Киев : «АДЕФ-Украина», 2001. — 238 с.
26. *Носовский А. В. и др.* Снятие с эксплуатации ядерных энергетических установок. — Киев: Техника, 2005. — 288 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.