
doi

УДК 519.711

О.В. Годун

Науково-технічний центр ДП НАЕК «Енергоатом»
(Україна, 01054, Київ, вул. Б. Хмельницького, 63А,
тел. +38(044) 2069735; e-mail: o.godun@ntc.atom.gov.ua; o_godun@ukr.net;)

Розрахункова модель визначення раціональних конфігурацій інноваційних ядерно-паливних циклів

Досліджено і виконано порівняння різних варіантів ядерних паливних циклів України з використанням інструменту INPRO IAEA KIND-ET. Запропоновано кількісні показники оцінки ядерних паливних циклів. Отримано порівняльні рейтинги ядерних паливних циклів, які застосовуються в українській енергетичній системі. Візуалізація кінцевої оцінки здійснюється за допомогою інструменту IAEA INPRO KIND-ET

Ключові слова: МАGATE, INPRO, KIND-ET, моделювання, ЯПЦ.

Ядерний паливний цикл (ЯПЦ) – це система ядерних установок, пов’язаних між собою потоком ядерного матеріалу, який включає уран та плутоній у формі первинної паливної сировини або у вигляді готової тепло-виділяючої збірки [1]. Можна вважати, що ЯПЦ є сукупністю етапів складної технології життєвого циклу ядерного палива, починаючи від видобутку уранової руди і виготовлення паливних елементів UOX (Uranium Oxide fuel) та подальшого їх використання в ядерних реакторах, до збереження і захоронення відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) або його переробки і повернення продуктів переробки для повторного використання.

В Директиві ЕС 2011/70/EURATOM [2] вказано про необхідність визначення технічної опції, що виключає використання стратегії «відкладеного рішення» для поводження з ВЯП при будівництві нових АЕС, яке реалізується на даний момент або передбачено в майбутньому. Фактично документ [2] визначає ВЯП як один з факторів, який перешкоджає відповідності ядерної енергії концепції стійкого розвитку.

Питання забезпечення відповідності ядерної енергетики України положенням документу [2] полягає в тому, що нова Енергетична стратегія України до 2035 р. [3] не визначає загальну встановлену потужність енергоблоків АЕС та конкретні типи ядерних реакторів, будівництво яких

© Годун О.В., 2017

передбачається після 2035 р. Отже, виникає необхідність в аналізі різних варіантів конфігурації ЯПЦ та виборі прийняттого рішення щодо поводження з ВЯП АЕС України з урахуванням наявної інфраструктури. У роботі [4] зроблено спробу здійснення попередньої порівняльної оцінки конфігурацій ЯПЦ України, побудованих за різними проектами реакторних установок. Результати оцінки отримано через співставлення розрахункових значень відповідних індикаторів, що характеризують ЯПЦ (наприклад, приведена вартість виробництва електроенергії). Це дозволило отримати певну порівняльну оцінку варіантів ЯПЦ. Однак такий підхід не спирається на алгоритми, визнані МАГАТЕ, що фактично ставить під сумнів отримані результати.

Відтак, аналіз варіантів конфігурації ЯПЦ, заснованих на різних рішеннях про кінцеве поводження з ВЯП, є актуальним завданням як для світової ядерної енергетики взагалі, так і для української зокрема. Вочевидь, аналіз варіантів конфігурації ЯПЦ можливий лише на відповідних моделях, задача розробки яких не є тривіальною.

У 2000 р. у МАГАТЕ започатковано Міжнародний проект з інноваційних ядерних реакторів та паливних циклів (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)) [5]. Метою проекту є підтвердження можливості ядерної енергетики забезпечити потребу в енергії у XXI столітті відповідно до сформульованої ООН концепції сталого розвитку [6]. В рамках проекту розроблено методологію INPRO та інструкцію з її практичного застосування [7], яка включає базові принципи забезпечення сталого розвитку ЯПЦ, вимоги користувача відповідних ЯПЦ та інноваційних реакторів і критерії їхньої оцінки. Оцінка ЯПЦ проводиться «знизу-вгору» за такою процедурою, яка автоматично підтверджує прийнятність вимогам користувача і відповідність базовим принципам. Це, зрештою, свідчить про стійкість обраного типу ЯПЦ. Водночас, керівництво з практичного застосування методології МАГАТЕ INPRO [7] не визначає алгоритм порівняльного аналізу різних варіантів ЯПЦ.

Такий алгоритм оцінки ЯПЦ було розроблено у рамках проекту МАГАТЕ KIND (Key Indicators for Innovative Nuclear Energy Systems) [8] і реалізовано у вигляді інструменту МАГАТЕ KIND-ET (KIND-Evaluation Tool). Оцінка проводиться з використанням теорії багатокритеріального аналізу (MAVT) в середовищі Excel.

KIND-ET є розрахунковим інструментом порівняльної оцінки перспектив і ризиків, пов'язаних з розробкою і реалізацією ядерних технологій і відповідних ЯПЦ. Він дозволяє оцінити вигоди і недоліки ядерних технологій, що порівнюються, та визначити їх загальну оцінку з урахуванням технічної та економічної ефективності ЯПЦ.

Алгоритм виконання багатокритеріальної порівняльної оцінки з використанням інструменту MAGATE KIND-ET включає:

- формулювання проблеми і завдання порівняльної оцінки;
- визначення набору індикаторів ефективності та значень кожного з обраних індикаторів;
- визначення структури дерева завдань (завдання високого рівня, області оцінки, індикатори та їхній ієрархічний взаємозв'язок);
- оцінку вагових коефіцієнтів;
- виконання аналізу чутливості;
- інтерпретацію результатів і формулювання рекомендації щодо поліпшення результатів, зважаючи на прийняті пріоритети.

Характерними особливостями KIND-ET є простота використання, зручний інтерфейс, можливості автоматизації і візуалізації для інтеграції зі зручними інструментами для управління і обробки результатів розрахунку. KIND-ET забезпечує гнучкість процесу вивчення різних підходів і методів при впровадженні методу MAVT з метою оцінки ЯПЦ. Вхідною інформацією для KIND-ET є результати розрахунків параметрів ЯПЦ, таких як об'єми споживання природного урану та накопичення ВЯП, необхідні потужності з його переробки або зберігання, приведена вартість виробництва електроенергії для кожного з варіантів ЯПЦ, тощо. Всі вони можуть бути отримані з використанням коду MESSAGE.

Код MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) [9] використовується для побудови великомасштабної динамічної системно-інженерної моделі будь-якої енергетичної системи (у тому числі ЯПЦ) і подальшого оптимізаційного аналізу та дозволяє розробити оптимальну стратегію розвитку енергосистеми з урахуванням визначених користувачем обмежень (граничної величини нових інвестицій, ступеня проникнення нових технологій на ринок, наявності палива і торгівлі їм та ін.). Код MESSAGE широко застосовується країнами-учасниками MAGATE для оцінок енергетичних систем та ЯПЦ на відповідність критеріям стійкого розвитку.

Таким чином, з'являється принципова можливість використання методології INPRO у сполученні з алгоритмом KIND-ET і кодом MESSAGE для розв'язання задач порівняльної оцінки варіантів конфігурацій ЯПЦ, заснованих на різних технологічних рішеннях кінцевого поводження з ВЯП АЕС в довгостроковій перспективі. Для реалізації такої можливості необхідно наступне:

- визначити масив техніко-економічних параметрів технологій, що входять до складу варіантів ЯПЦ (зокрема щодо України) для розрахунків кодом MESSAGE;

розробити моделі конфігурацій ЯПЦ для коду MESSAGE з розрахунком відповідних параметрів обраних ЯПЦ;

розробити моделі ЯПЦ України для KIND-ET з визначенням відповідних оціночних індикаторів та виконанням багатокритеріальної порівняльної оцінки варіантів ЯПЦ України за даними оціночними індикаторами;

визначити методика застосування аналізу чутливості отриманих результатів оцінки варіантів ЯПЦ до зміни вхідних техніко-економічних параметрів.

Таблиця 1

Параметр	ВВЕР-440	ВВЕР-1000	LWR	LWR (MOX)	HWR	FR
Теплова потужність, МВт	1375	3000	3200	3200	2064	2100
Електрична потужність, МВт	400	1000	1120	1120	728	870
Коефіцієнт корисної дії, %	32	33	35	35	35,3	0,4143
Коефіцієнт використання встановленої потужності, %	75	82	90	90	90	80
Збагачення палива, %	3,82	4,28	4,28	7% (Pu)	0,9	21,85 (Pu)
Середнє вигорання ядерного палива, ГВт·діб/т	42,66	45	60	60	13	65,9
Повне завантаження важкого металу (ВМ), т	40,2048	70,859	70,859	17,715 (MOX) 53,144 (UOX)	88	12,6
Щорічне перевантаження ВМ, т	8,9856	18,258	15,649	3,912 (MOX) 11,737 (UOX)	52,113	9,34
Вартість будівництва, USD/кВт	—	2400	5000	5000	4500	На 20% більше ніж для LWR
Постійні витрати, USD/кВт	69,3	69,3	69,3	69,3	55	69,3
Змінні витрати, USD/МВт·г	0,50	0,50	0,50	0,50	1	0,50
Термін експлуатації, р	50	50	60	60	35	60
Термін будівництва, р		6	6	6	5	7
Вартість захоронення ВЯП, USD/кг(ВМ)	600	600	600	600	200	—
фабрикації палива, USD/кг(ВМ)	300	300	300	1500	200	1500

На даний час ЯПЦ України визначається як відкритий ЯПЦ (ВЯПЦ). Наявна інфраструктура довгострокового зберігання ВЯП на майданчику Запорізької АЕС, а також заплановане будівництво Централізованого сховища ВЯП в зоні відчуження Чорнобильської АЕС, що передбачено Законом України про поводження з відпрацьованим ядерним паливом від 2012 р. [10], в цілому повністю відповідають поняттю відкритого ЯПЦ.

Водночас, відповідно до міжнародних контрактів передбачається переробка ВЯП АЕС України з подальшим поверненням і зберіганням на території України продуктів переробки, які включають уран і плутоній. Це зумовлює можливість реалізації в Україні частково-замкнутого ЯПЦ (ЧЗЯПЦ) на основі енергоблоків з важководним теплоносієм (CANDU) та замкнутого ЯПЦ (ЗЯПЦ) на основі енергоблоків на «швидких» нейтронах. Питання подальшого використання продуктів переробки ВЯП є відкритим і залежить від економічної доцільності використання змішаного ядерного палива MOX (Mixed Oxide fuel) на АЕС.

Перелік основних техніко-економічних даних обраних типів реакторних установок та відповідних ЯПЦ, який сформовано згідно з інформацією МАГАТЕ, ОЕСД та інших джерел [11—15], наведено у табл. 1.

Зважаючи на досвід і спираючись на експертні судження, для вирішення задачі багатокритеріальної порівняльної оцінки варіантів конфігурацій ЯПЦ з використанням алгоритму KIND-ET пропонується застосовувати оціночні індикатори відповідно наступним вимогам:

- можливість проводити порівняння ЯПЦ, використовуючи чисельні значення технічних та економічних показників (як додатковий розглядається якісний індикатор, що гарантує доступ до послуг ЯПЦ);
- використовувати індикатори оцінки реакторних установок та враховувати оціночні поняття стійкого розвитку ЯПЦ.

Згідно з документами МАГАТЕ [6, 7] до переліку індикаторів порівняльної оцінки входять наступні:

Економічні індикатори — приведена вартість виробництва електроенергії (дол США/кВт·г) та величина середнього вироблення енергії на одиницю маси природного урану (МВт·р/т(ВМ)).

Технічні індикатори — приведені споживання природного урану (т (ВМ)/МВт·р), приведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії (т (ВМ)/МВт·р), приведені необхідні об'єми роботи розділення урану для збагачення ядерного палива на одиницю виробленої енергії (ОРР/р/МВт), приведена потужність з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії (т (ВМ)/р/МВт).

Індикатори прийнятності обраного ЯПЦ — обсяг накопичення ВЯП (т (ВМ)), обсяг накопичення U після переробки (т (ВМ)), обсяг накопи-

чення P_u після переробки (t (ВМ)), обсяг накопичення високоактивних отходів (ВАО) (у вигляді продуктів поділу FPr) після переробки ВЯП та обсяг напрацювання мінорних актинідів (МА, кг).

При розгляді різних варіантів ЯПЦ у порівняльній оцінці додатково враховується якісний індикатор, який характеризує гарантії доступу до технологій ЯПЦ. Індикатор варіюється від 1 до 10 таким чином, що збільшення значення відповідає зменшенню ризиків отримання необхідної послуги ЯПЦ.

Метод багатокритеріальної оцінки, який використано у алгоритмі KIND-ET (метод MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis)) [16] включає аналіз заздалегідь визначеного набору альтернатив. Метод MCDA застосовується для вирішення наступної задачі: для оцінки набору M -альтернатив і N критеріїв припускається, що кожен з альтернатив оцінено за кожним індикатором за допомогою об'єктивних розрахунків. Основою методу MCDA є використання функцій цінності, коли відома кількісна інформація про кожний індикатор кожної альтернативи. При цьому значення функції цінності для кожного індикатора варіюється у діапазоні від нуля до одиниці. Ці оцінки використовуються в подальших розрахунках. Оцінки за кожним індикатором отримують через множення відповідного значення індикатору на цінність (вагу) індикатора. Загальні бали показують рейтинг альтернатив. Краща альтернатива матиме найвищий загальний бал.

Багатокритеріальну функцію цінності можна подати у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
 u(x) = & \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) + k \sum_{\substack{i=1 \\ j>1}}^n k_i k_j u_i(x_i) u_j(x_j) + \\
 & + k^2 \sum_{\substack{i=1 \\ j>1 \\ l>j}}^n k_i k_j k_l u_i(x_i) u_j(x_j) u_l(x_l) + \dots \\
 & + k^{n-1} k_1 k_2 \dots k_n u_1(x_1) u_2(x_2) \dots u_n(x_n), \quad 1+k = \prod_{i=1}^n (1+k k_i). \quad (1)
 \end{aligned}$$

У даному дослідженні тип функції цінності (вагової функції) має наступний вигляд:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i), \quad (2)$$

де $\sum_{i=1}^n k_i = 1$. Отримані кодом MESSAGE розрахункові (так звані «природні»)

значення індикаторів для різних варіантів ЯПЦ України, які використано для подальшої порівняльної оцінки, наведено у табл. 2.

Вагові фактори відображають пріоритети розвитку ядерної енергетики з урахуванням індивідуальних умов країни. Зважаючи на експертні судження, для України можливо передбачати, що при однакових вимогах до безумовного забезпечення критеріїв безпеки при експлуатації АЕС та систем ЯПЦ за пріоритетом індикатори для кожної області оцінки мають наступну послідовність: економічні індикатори (ваговий фактор (ВФ)—

Таблиця 2

Індикатор	Позначення	ВЯПЦ	ВЯПЦ з переробкою ВЯП	ВЯПЦ з захороненням ВЯП	ЧЗ ЯПЦ	ЗЯПЦ
Приведена вартість виробництва електроенергії	E1	22,9	24,9	25,4	29,3	25,1
Середня генерація енергії на одиницю маси природного урану	E2	7,1	7,1	7,1	8,2	7,2
Приведене споживання природного урану	Ucons	0,14	0,14	0,14	0,12	0,14
Приведена маса ВЯП, що накопичується за рік на одиницю енергії	A_SNF	0,022	0,016	0,011	0,017	0,005
Приведені необхідні потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії	SWU	0,117	0,117	0,117	0,1	0,118
Приведена потужність з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії	Repr	0	0,006	0,003	0,024	0,034
Обсяг накопичення ВЯП	SNF	27 506	20 034	14 181	20 888	6 118
Обсяг накопичення після переробки						
U	ReU	0	6 964	3 296	0	20 359
Pu	RePu	0	90	43	210	154
Обсяг накопичення продуктів ділення	FPr	0	427	182	993	1 165
Обсяг напрацювання МА	MA	0	10	4	22	26
Гарантії постачання послуг ЯПЦ	SS	10	5	8	3	3

0,5), індикатори прийнятності технології ЯПЦ (ВФ — 0,3) та технічні індикатори (ВФ — 0,2). Граничною умовою визначення ВФ є рівність одиниці суми ВФ кожної області дослідження.

Беручи до уваги наявність більш ніж одного індикатору у кожній області оцінки, для кожного з індикаторів у кожній області оцінки визначаються також розрахункові значення ВФ. Граничною умовою визначення ВФ кожного індикатору також є рівність одиниці суми ВФ у кожній області дослідження. Кінцеві значення ВФ для кожного індикатору визначається як добуток ваги області дослідження на значення ваги індикатора.

У табл. 3 наведено кінцеві розрахункові значення ВФ для кожного з індикаторів оцінки, отримані з використанням (2).

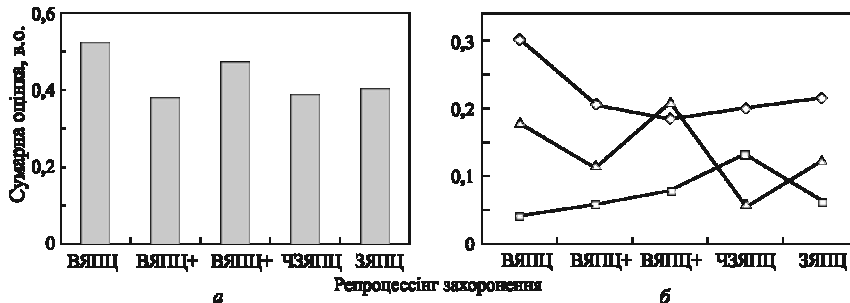
Результати застосування розрахункового алгоритму оцінки варіантів ЯПЦ, реалізованого у вигляді інструменту MAGATE KIND-ET, надано у

Таблиця 3

Область оцінки	Вага області оцінки	Індикатор	Вага індикатора	ВФ
Економічні індикатори	0,5	E1	0,6	0,3
	0,5	E2	0,4	0,2
Технічні індикатори	0,2	Ucons	0,3	0,06
	0,2	A_SNF	0,3	0,06
	0,2	SWU	0,2	0,04
	0,2	Repr	0,2	0,04
Індикатори прийнятності	0,3	SNF	1	0,12
	0,3	ReU	0,5	0,015
	0,3	RePu	0,5	0,015
	0,3	FPr	0,5	0,015
	0,3	MA	0,5	0,015
	0,3	SS	1	0,120

Таблиця 4

Цикл	Сумарна оцінка, в.о.	Оцінка індикаторів за областю дослідження, в.о.		
		Економічні	Технічні	Прийнятності
ВЯПЦ	0,522	0,3	0,042	0,18
ВЯПЦ + репро-цессінг	0,376	0,206	0,056	0,113
ВЯПЦ + захоронення	0,471	0,183	0,078	0,21
ЧЗЯПЦ	0,386	0,2	0,129	0,057
ЗЯПЦ	0,399	0,215	0,06	0,124



Візуальна інтерпретація кількісної оцінки варіантів ЯПЦ України (а) та впливу економічних, технічних та індикаторів прийнятності на сумарну оцінку (б): ◇ — економічні індикатори; □ — технічні індикатори; △ — індикатори прийнятності

табл. 4. Найбільша кількість балів відповідає відкритому ЯПЦ з накопиченням ВЯП, що є результатом впливу фактору відсутності витрат на переробку та виготовлення МОХ-палива. Найменша кількість балів притаманна всім ЯПЦ, які включають переробку ВЯП. Оскільки сценарій ЯПЦ з накопиченням ВЯП не відповідає Директиві ЕС 2011/70 / EURATOM щодо забезпечення кінцевого рішення, для умов України відповідно до результатів розрахунків з використанням інструменту МАГАТЕ KIND-ЕТ найбільш оптимальним виявляється сценарій ВЯПЦ з захороненням ВЯП у геологічних формаціях.

На рисунку надано візуалізацію результатів оцінки варіантів ЯПЦ, у тому числі вплив економічних, технічних та індикаторів прийнятності на сумарну оцінку.

При наявності більше одного індикатору для кожної області оцінки інструмент МАГАТЕ KIND-ЕТ дає можливість врахувати вплив кожного індикатора на сумарну оцінку варіанту ЯПЦ, враховуючи вагу індикатору у даній області досліджень. Відповідно до отриманих результатів варіант відкритого ЯПЦ із захороненням ВЯП у геологічних формаціях при прийнятих техніко-економічних умовах не є раціональним рішенням. Водночас, прийнятність технологічних рішень з врахуванням мінімізації накопичення продуктів переробки ВЯП та відсутність переробки ВЯП як технічного фактора зрештою зумовлюють більшу кількість балів для варіанта ВЯПЦ з захороненням ВЯП у геологічних формаціях. Застосування KIND-ЕТ не тільки виявляє кореляцію результуючої кількісної оцінки варіантів ЯПЦ з оцінками, наведеними у роботі [4], але й дає можливість додатково визначити індивідуальний вплив кожного індикатору на сумарну оцінку.

Висновки

Таким чином, спільне застосування методології INPRO з інструментарієм МАГАТЕ KIND-ЕТ і кодом MESSAGE відкриває шлях до формування математично коректної і прийнятної для МАГАТЕ розрахункової моделі, яка зробить можливим отримання кількісної оцінки варіантів конфігурації ЯПЦ, зокрема і щодо України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Облік та контроль ядерного матеріалу, фізичний захист ядерного матеріалу і ядерних установок*. Тлумачний словник українських термінів. Затверджено наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 08.06.2004 р. № 101. – НП 306.7. 086-2004, 165 с
2. *Council Directives EU 2011/70/EURATOM*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:199:0048:0056:EN:PDF>.
3. *Енергетична стратегія України до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»*. Розпорядження КМУ від 18.08.2017 №. 605-г.
4. *Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project GAINS*. Vienna: IAEA, 2013, 271 p. (IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-1.14)
5. <https://www.iaea.org/services/key-programmes/international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro>.
6. *Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)* Vienna: IAEA, 2004, 191 p. (IAEA-TECDOC-1434).
7. *Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems* Vienna: IAEA, 2008, 147 p. (IAEA-TECDOC-1575 Rev. 1).
8. <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Shared%20Documents/ToR-INPRO-CP-KIND.pdf>.
9. *Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide*. Vienna: IAEA, 2015, 140 p. NES No.NG-T-5.2
10. *Закон України «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом щодо розміщення, проектування та будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій»*. Київ, 9 лютого 2012 р. № 4384-VI.
11. *The Economics of the Back End-of the Nuclear Fuel Cycle*. Technical Meeting on Fast Reactors and Related Fuel Cycle Facilities with Improved Economics Characteristics. 11-13 September 2013. IAEA Headquarters, Vienna, Austria.
12. *Management of spent nuclear fuel and its waste*. EASAC policy report no. 23 JRC Reference Report, July, 2014.
13. *Processing of Used Nuclear Fuel*. WNA. June 2018.
14. *Spent Fuel Reprocessing Options*. Vienna: IAEA, 2008. TECDOC-1587
15. *Trends towards Sustainability in the Nuclear Fuel Cycle*. Paris: OECD, 2011, 187 p. (NEA No. 6980)
16. *Schwenk-Ferrerond A., Andrianov A. Nuclear Waste Management Decision-Making Support with MCDA// Science and Technology of Nuclear Installations, 2017, Vol. Article ID 9029406, 20 p.* <https://doi.org/10.1155/2017/9029406>.

Отримано 13.05.19

REFERENCES

1. Fissionable nuclear material management, physical protection of nuclear material and nuclear facilities. Interpretative dictionary of Ukrainian terms. Dictionaries of terms: Ukrainian-English-Russian, Russian-Ukrainian-English, English-Russian-Ukrainian. Decree of SNRCU, 08.06.2004 № 101. - ND 306.7.086-2004, 165 p.
2. Council Directives EU 2011/70/EURATOM. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:199:0048:0056:EN:PDF>
3. Energy strategy of Ukraine to 2035 «Safety, energy efficiency, competitiveness». Order of Ministry Cabinet of Ukraine №605-r by 18.08.2017
4. Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project GAINS. Vienna: IAEA, 2013, 271 p. (IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-1.14)
5. <https://www.iaea.org/services/key-programmes/international-project-on-innovative-nuclear-reactors-and-fuel-cycles-inpro>.
6. Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) — Vienna: IAEA, 2004, 191 p. (IAEA-TECDOC-1434)
7. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems — Vienna: IAEA, 2008. — 147 p. — (IAEA-TECDOC-1575 Rev. 1)
8. <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Shared%20Documents/ToR-INPRO-CP-KIND.pdf>.
9. Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide. Vienna: IAEA, 2015, 140 p. NES No. NG-T-5.2
10. Law of Ukraine “On the treatment of spent nuclear fuel for the placement, design and construction of a centralized storage facility for spent nuclear fuel reactors of the WWER type of domestic nuclear power plants”, Kyiv, February 9, 2012 No. 4384-VI
11. (2013) The Economics of the Back End-of the Nuclear Fuel Cycle. NUCLEAR ENERGY AGENCY. NEA No. 7061. 193 p.
12. Management of spent nuclear fuel and its waste. EASAC policy report no. 23 JRC Reference Report July 2014, 40 p. Available source: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC84826/jrc-report-anagement-spent-fuel-and-waste.pdf>
13. <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx>
14. Spent Fuel Reprocessing Options. Vienna: IAEA, 2008, 151 p. (IAEA-TECDOC-1587).
15. Trends towards Sustainability in the Nuclear Fuel Cycle. – Paris: OECD, 2011, 187 p. (NEA No. 6980). Available: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2011/6980-trends-fuel-cycle.pdf>
16. Schwenk-Ferrerond, A., Andrianov, A. Nuclear Waste Management Decision-Making Support with MCDA. Science and Technology of Nuclear Installationsю Volume 2017, Article ID 9029406, 20 pages. Available

Received 13.05.19

О.В. Годун

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ
ИННОВАЦИОННЫХ ЯДЕРНО-ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ

Исследовано и выполнено по сравнение различных вариантов ядерных топливных циклов Украины с использованием инструмента INPRO МАГАТЭ KIND-ЕТ. Предложены количественные показатели оценки ядерных топливных циклов. Получены сравнительные

рейтинги ядерных топливных циклов, применяемые к украинской энергетической системе. Визуализация конечной оценки осуществляется с помощью инструмента МАГАТЭ INPRO KIND-ET.

Ключевые слова: МАГАТЭ, INPRO, KIND-ET, моделирование, ЯТЦ.

O.V. Godun

CALCULATING MODEL FOR RATIONAL INNOVATION NUCLEAR FUEL CYCLE CONFIGURATION IDENTIFICATION

The case study for comparison of nuclear fuel cycles of Ukraine was realized using IAEA INPRO tool KIND-ET. The quantities key indicators for nuclear fuel cycles assessment proposed. The nuclear fuel cycles comparison ranking scores obtained apply to Ukrainian energy system. The visualization of final score is made by IAEA INPRO tool KIND-ET.

Keywords: IAEA, INPRO, KIND-ET, modelling, NFC.

ГОДУН Олег Вікторович, керівник служби проектної безпеки та паливовикористання Науково-технічного центру ДП НАЕК «Енергоатом». У 1998 р. закінчив Київський державний університет ім. Тараса Шевченка. Область наукових досліджень — моделювання технологічних процесів у енергетичній галузі.