

---

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

---

doi

УДК 519.711

**Ю.Г. Куцан**, д-р техн. наук

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України  
(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,  
тел. +38 (044) 4241442; e-mail: kutsan.ug@ipme.kiev.ua; kutsan.ug@ukr.net),

**О.В. Годун, В.М. Кир'янчук**, канд. физ.-мат. наук

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;  
тел. +38(044) 2069735; e-mail: v.kyryanchuk@ntc.atom.gov.ua)

### **Аналіз чутливості порівняльної оцінки варіантів ядерно-паливних циклів України**

Сформовано базу даних техніко-економічних параметрів для порівняльної оцінки варіантів ядерно-паливних циклів (ЯПЦ) України з використанням коду МАГАТЕ MESSAGE. Розроблено розрахункові моделі варіантів ЯПЦ України з накопиченням та переробкою відпрацьованого ядерного палива. Обґрунтовано застосування аналізу чутливості для порівняльної оцінки ЯПЦ. Визначено вплив цінних показників складових елементів ЯПЦ на вартість виробленої електроенергії.

*Ключові слова:* МАГАТЕ, MESSAGE, аналіз чутливості, ЯПЦ, економіка.

Відповідно до Енергетичної стратегії України до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [1] передбачається зростання виробництва електроенергії АЕС та вивчення шляхів поведження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП). На основі світової практики Директива № 2011/70/EURATOM від 19.07.2011 [2] передбачає можливість будівництва нових АЕС після визначення національних стратегій поведження з ВЯП АЕС. Це дозволить забезпечити порівняльну оцінку варіантів організації ЯПЦ, які включають накопичення або переробку ВЯП, або накопичення ВЯП з подальшим його захороненням у геологічних формаціях.

Порівняльний аналіз варіантів ЯПЦ України на довгостроковий період після 2035 р. здійснено [2] з урахуванням наявного стану поведження

© Куцан Ю.Г., Годун О.В., Кир'янчук В.М., 2019

з ВЯП АЕС та планів України щодо впровадження централізованого сховища ВЯП у Чорнобильській зоні відчуження, визначених у відповідному Законі України [3]. Порівняння варіантів ЯПЦ проведено з застосуванням так званих ключових індикаторів (КІ), визначених на підставі досліджень МАГАТЕ [4, 5]. При визначенні КІ враховано доцільність проведення порівняльної оцінки ЯПЦ з застосуванням кількісних показників, що дозволяє виключити вплив похибки експертного судження на загальну похибку отриманих результатів.

Разом з тим, джерелом похибки порівняльної оцінки є можлива неточність визначення вхідних техніко-економічних параметрів, що впливає на результати розрахунку КІ та на подальший результат порівняльної оцінки варіантів ЯПЦ. Варіативність вхідних параметрів визначається наявністю ринку послуг складових організаційної структури ЯПЦ та формує ризики реалізації обраного варіанту. З метою оцінки впливу можливих ризиків на кінцевий результат у світовій практиці застосовується аналіз чутливості КІ оцінки ЯПЦ до зміни вхідних параметрів.

У роботі [6] наведено підходи до аналізу чутливості економічних індикаторів варіантів ЯПЦ, які включають захоронення ВЯП у геологічних формаціях або переробку ВЯП з повторним використанням цінних продуктів. Результати оцінки отримано на основі загального опису варіантів ЯПЦ та відповідних техніко-економічних даних [6]. У роботі [7] наведено результати аналізу невизначеності вихідних параметрів ЯПЦ (поток ядерного матеріалу) при зміні обраних значень часового індикатора (часу витримки ВЯП у приреакторному басейні, часового інтервалу реалізації складових елементів ЯПЦ тощо).

Отримані у роботах [6, 7] результати не враховують особливості організації ЯПЦ України, є загальними та визначають лише можливий напрямок зміни КІ до зміни вхідних параметрів.

**Постановка задачі.** Враховуючи положення Енергетичної стратегії [1] та прийняті рішення щодо розвитку ядерної інфраструктури України, а також варіативність ціни послуг у ЯПЦ на світовому ринку, прийняття коректного рішення щодо впровадження варіанту поводження з ВЯП можливе на підставі аналізу зміни КІ у залежності від зміни вхідних техніко-економічних показників складових елементів ЯПЦ.

У рамках даного дослідження необхідно виконати наступне:

розробити моделі варіантів ЯПЦ України з накопиченням ВЯП (з можливістю подальшого захоронення у геологічних формаціях) та ЯПЦ з переробкою ВЯП і повторним використанням цінних продуктів переробки для виробництва електроенергії;

сформувати базу даних техніко-економічних показників функціонування та розвитку ядерної енергетики України;

проаналізувати вплив зміни вхідних техніко-економічних параметрів до обраного окремого КІ з метою визначення критичного параметру, зміна якого впливає на загальний результат порівняльної оцінки ЯПЦ.

**Вирішення задачі.** Зважаючи на необхідність врахування значної кількості вхідних умов та широкого діапазону їх зміни, порівняльну оцінку варіантів ЯПЦ проводять з використанням сучасних розрахункових засобів, що дозволяє враховувати взаємоз'язок елементів ЯПЦ та проводити моделювання різноманітних конфігурацій організації ядерної інфраструктури. Водночас, розгляд ядерної енергетики як складової частини загальної енергетичної системи та оптимізацію організаційної структури ЯПЦ у порівнянні зі структурами інших типів генерації електроенергії є можливим провести з використанням розрахунково-аналітичного комплексу MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) [8], який широко застосовується у МАГАТЕ.

На рис. 1 наведено схеми побудови ЯПЦ України з використанням наявної інфраструктури та їх інтерпретація у вигляді моделей для комплексу MESSAGE. У схемі, зображеній на рис. 1, а, враховано виробництво та використання ядерного палива на АЕС, його зберігання у сховищі ВЯП протягом 100 років та подальше захоронення у геологічних формаціях (ГФ). Передбачається наявність існуючих та побудова нових подібних легководних енергоблоків АЕС. Не передбачається переробка ВЯП. У відповідній моделі для комплексу MESSAGE (рис. 1, в) враховано потік ядерного матеріалу та довгострокове зберігання ВЯП, що відповідає наявній в Україні схемі побудови ЯПЦ.

Схема, наведена на рис. 1, б, передбачає організацію інноваційного варіанту ЯПЦ, в якому враховано переробку ВЯП та повторне використання ядерного матеріалу у відповідних реакторах CANDU. Така побудова інноваційного варіанту ЯПЦ зумовлює мінімізацію накопичення ВЯП та фактично дозволяє виконати вимоги Директиви [2]. Модель такої схеми для комплексу MESSAGE (рис. 1, г) включає (як додатковий потік ядерного матеріалу) накопичення та захоронення у ГФ продуктів переробки ВЯП легководних енергоблоків та ВЯП енергоблоків CANDU.

Коректність врахування взаємозв'язків між елементами ЯПЦ при побудові відповідних моделей енергетичних систем визначається достовірністю техніко-економічних даних як вхідної інформації розрахунку КІ. Перелік основних техніко-економічних даних елементів ЯПЦ, що представлені на рис. 1, сформовано на основі відкритої інформації МАГАТЕ з урахуванням особливості функціонування ядерної енергетики України та наведено у табл. 1.

Аналіз варіантів ЯПЦ може бути проведено для різноманітних КІ. Разом з тим, прогнозування розвитку ядерно-енергетичної системи перед-

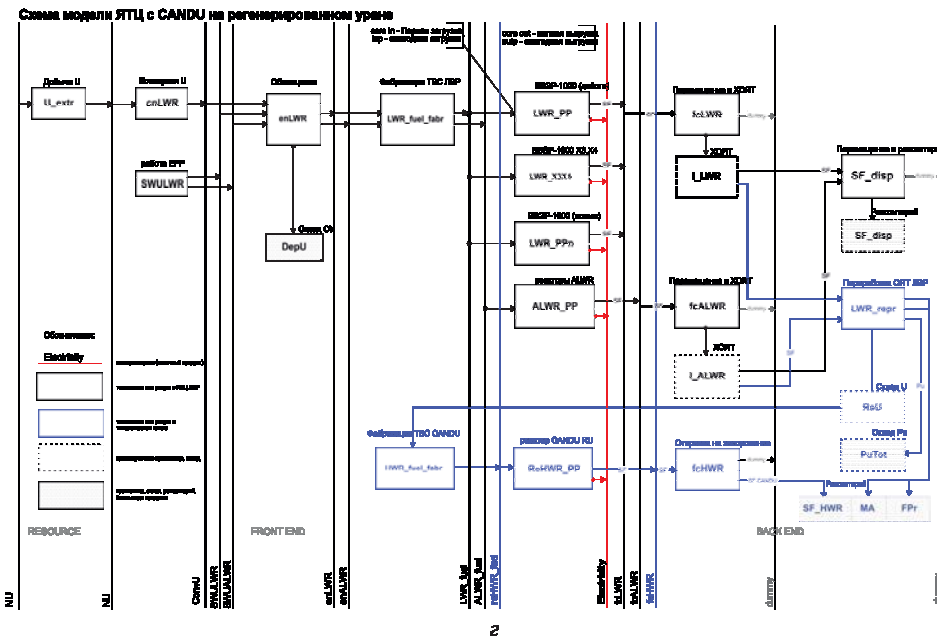
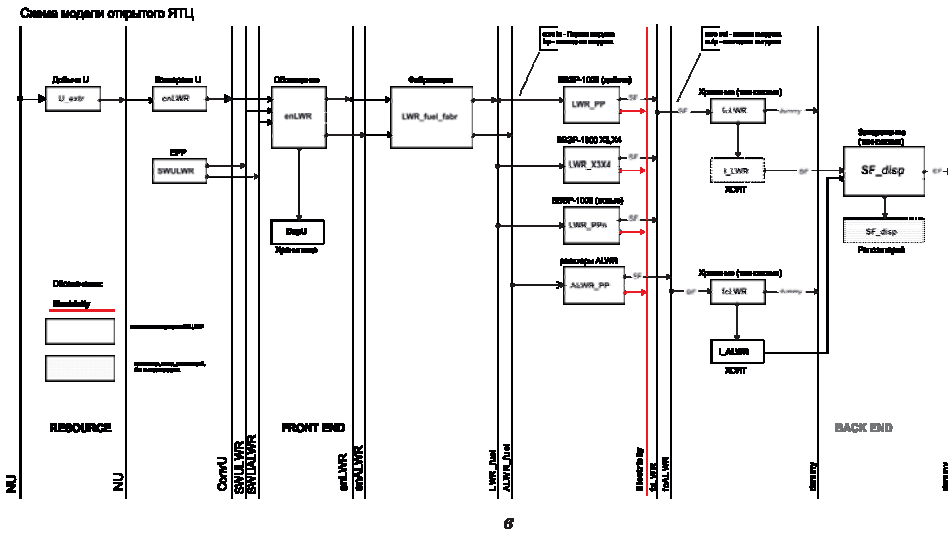
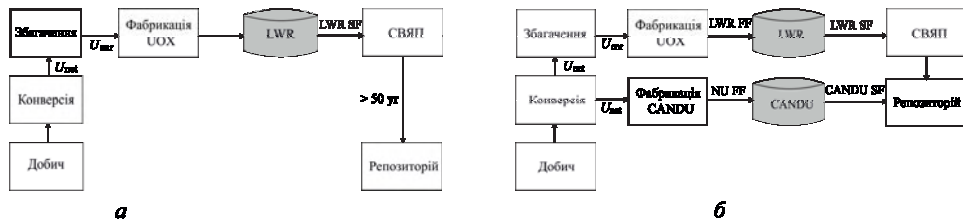


Рис. 1. Організаційні структури ЯПЦ та моделі комплексу MESSAGE: *а* — ЯПЦ з накопиченням ВЯП та захороненням у ГФ; *б* — ЯПЦ з переробкою ВЯП; *в*, *г* — моделі комплексу MESSAGE, відповідні структурам *а* і *б*

бачає її оцінку як складової частини загальної енергетичної системи. Для умов України як найбільш критичний можна розглядати КІ, який характеризує фінансові витрати на реалізацію обраного типу ЯПЦ. У такому випадку набір КІ буде зведено до застосування так званої приведеної вартості виробництва електроенергії (LCOE), яка є цільовим параметром обчислення витрат генерації та визначається як фінансові витрати на одиницю виробленої електроенергії. У першому наближенні LCOE еквівалентна середній ціні, яку споживачі повинні сплачувати для погашення капітальних видатків, витрат на електроенергію та паливо, з відповідною ставкою дисконтування у випадку, коли не враховується прибуток з реалізації електроенергії.

Фактично LCOE визначає відношення загальних фінансових витрат до об'єму виробленої електроенергії за окремий часовий інтервал та включає витрати на будівництво АЕС з урахуванням зміни вартості грошового потоку (LUAC), витрати на експлуатацію АЕС (LUOM) та вартість реалізації обраного типу ЯПЦ (LUFС). Цей параметр може бути подано наступним рівнянням [8]:

$$LCOE = LUAC + LUOM + LUFС,$$

Таблиця 1. Основні техніко-економічні дані реакторів різних типів та відповідних ЯПЦ

Параметр	ВВЕР-440	ВВЕР-1000	ВВЕР/LWR	HWR
Повне завантаження, т (важкого металу (ВМ))	40,2048	70,859	70,859	88
Щорічне перевантаження, т(ВМ)	8,9856	18,258	15,649	52,113
Вартість				
будівництва, USD/кВт	—	2400	5000	4500
конверсії урану, USD/кг(ВМ)	10	10	10	—
збагачення урану, USD/кг (одиниці роботи розділення)	130	130	130	—
фабрикації палива, USD/кг(ВМ)	300	300	300	200
захоронення ВЯП, USD/кг(ВМ)	600	600	600	200
переробки ВЯП, USD/кг(ВМ)	1000	1000	1000	—
проміжного зберігання ВЯП, USD/кг(ВМ)	300	300	300	—
Централізоване сховище ВЯП (U, C)	435	435	435	—
Сухе сховище ВЯП (CC)	—	67	67	—
Вартість захоронення продуктів переробки ВЯП, USD/кг(ВМ)	10 000	10 000	10 000	

де

$$LUAC = \frac{\left(\frac{CI}{P}\right)_{ON} + \left(\frac{CI}{P}\right)_{IDC}}{Lh_{FP}} + LUAC_{BF} + LUAC_D,$$

$$LUOM = \frac{\left(\frac{O\&M}{P}\right)_{FIX}}{8760 \cdot Lf} + \left(\frac{O\&M}{KWh}\right)_{VAR},$$

$$LUFC = \frac{\left(\frac{\$}{Kg}\right)_{FE, 1^{st} Core}}{\eta \delta_{th} Lh_{FP}} + \frac{\left(\frac{\$}{Kg}\right)_{FE, REf}}{Q \eta} + \frac{\left(\frac{\$}{Kg}\right)_{SF}}{Q \eta}.$$

Результати моделювання ядерно-енергетичної системи України та розрахунку LCOE для ЯПЦ з накопиченням та захороненням ВЯП у ГФ з використанням техніко-економічних даних, поданих у табл. 1, наведено у табл. 2.

Результати розрахунків показують економічну доцільність накопичення ВЯП як варіанта з мінімальним значенням LCOE, що забезпечує економічну привабливість даного варіанта ЯПЦ для умов України та максимальне використання наявної ядерної інфраструктури. Втім, отримані висновки можуть бути змінені у разі зміни вхідних техніко-економічних параметрів при проведенні аналізу чутливості, який є складовою частиною комплексного техніко-економічного вивчення ЯПЦ. При застосуванні аналізу чутливості виконується оцінка зміни КІ, що досліджується, відповідно до вхідних параметрів. У загальному випадку аналіз чутливості включає вивчення впливу варіації одного параметру на стан системи при незмінних значеннях інших параметрів, що характеризують об'єкт дослідження.

Не існує загального алгоритму проведення аналізу чутливості для обраного об'єкта дослідження. Дане ствердження справедливе як для

Таблиця 2. Прогнозні значення LCOE, \$/МВт·г., для ЯПЦ України на 2020—2100 рр.

ЯПЦ	2020	2030	2035	2040	2050	2100
З накопиченням ВЯП	16,23	19,61	21,56	22,92	23,01	23,02
З захороненням ВЯП у ГФ	17,07	21,28	24,3	25,34	25,38	25,37
З переробкою ВЯП	21,49	25,91	28,37	29,79	29,75	29,72

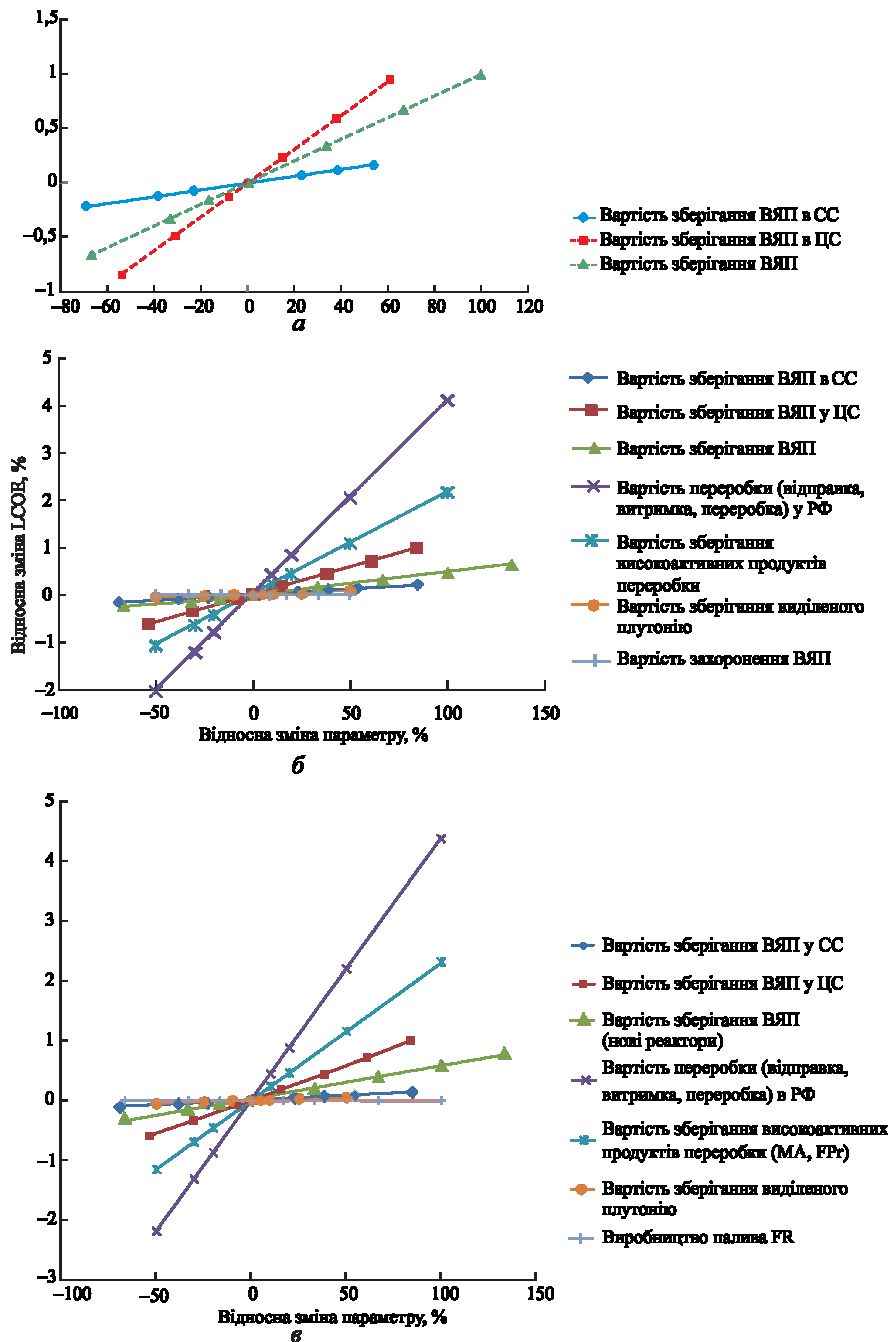


Рис. 2. Результати аналізу LCOE: а — ЯПЦ з накопиченням ВЯП; б — ЯПЦ з захороненням ВЯП у РФ; в — ЯПЦ з переробкою ВЯП та повторним використанням ядерного матеріалу

оцінки інвестиційних проектів, так і для оцінок впровадження нових типів реакторних установок або порівняння різних сценаріїв реалізації ЯПЦ. Проте можна стверджувати, що аналіз чутливості проводиться за оцінкою зміни деякого вихідного параметру (наприклад, LCOE) при варіаціях вхідних параметрів (наприклад, наведених у табл. 1). Таким чином, визначаються критичні показники, зміна яких може призвести до зміни раніше отриманих висновків, що є важливим в умовах значних фінансових витрат на розгортання оптимального сценарію ЯПЦ.

Обґрунтування вибору значень вхідних параметрів для проведення аналізу чутливості при розгляді варіантів ЯПЦ є темою окремого дослідження. У роботі [8] розподіл значень вхідних параметрів відповідає рівномірній їх заміні деякою обраною величиною  $\pm M$  (%) від базового значення. Застосування даного підходу поширене у світовій практиці.

З урахуванням світового досвіду проведено аналіз чутливості LCOE для варіантів ЯПЦ України з накопиченням ВЯП, захороненням ВЯП у ГФ та переробкою ВЯП до зміни економічних показників реалізації елементів ЯПЦ (вартості зберігання ВЯП на різних об'єктах, переробки ВЯП, зберігання продуктів переробки ВЯП тощо). Варіацію вхідних параметрів прийнято на рівні  $\pm 50\%$  від базового значення, що не відображає тренду можливої зміни вартості послуг ЯПЦ на світовому ринку, але дозволяє виявити критичний параметр для подальшого розвитку ядерно-енергетичної системи в умовах України. Результати аналізу чутливості для різних варіантів ЯПЦ наведено на рис. 2.

За результатами розрахунків бачимо, що зі збільшенням складових елементів зростає кількість ризиків при реалізації варіанту ЯПЦ, що в цілому є очікуваним. Водночас, не є очевидним, які саме ризики найбільш притаманні реалізації ЯПЦ в умовах України. Проведені розрахунки свідчать про суттєве зростання LCOE при збільшенні вартості переробки ВЯП (до 4,5% від величини LCOE, отриманої при базових значеннях вартості послуг ЯПЦ). Найменше впливає на LCOE вартість зберігання ВЯП (до 1,0% від величини LCOE, отриманої при базових значеннях вартості послуг ЯПЦ).

## **Висновки**

Застосування сучасних методів моделювання та розрахунків ЯПЦ дозволяє проводити багатофакторний аналіз систем з довільною кількістю складових елементів, у тому числі інноваційних ЯПЦ, які відсутні у промисловій експлуатації на час даного дослідження. Результати аналізу залежать від коректності вхідних техніко-економічних параметрів.



Зниження ризику виникнення похибки оцінок реалізується застосуванням аналізу чутливості отриманих результатів до варіацій значень вхідних параметрів. Відсутність алгоритму проведення аналізу чутливості для розгляду ЯПЦ зумовлює застосування методу оцінок за варіаціями вхідних параметрів на фіксоване значення  $\pm M$  (%) від базового значення.

Враховуючи відмінність вхідних техніко-економічних параметрів, наявні у світі результати аналізу варіантів ЯПЦ не можна безпосередньо застосовувати для умов України. Використана база даних та алгоритм проведення аналізу чутливості LCOE дозволяє визначити параметри впливу на кінцеві результати оцінки ЯПЦ України. Отримані результати аналізу показують суттєве зростання LCOE при збільшенні вартості переробки ВЯП.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»*. Розпорядження КМУ від 18.08.2017 № 605-р
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. Закон України № 4384-VI «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом щодо розміщення, проектування та будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій». Відомості Верховної Ради України, 2012, № 40, с. 476.
4. *INPRO METHODOLOGY FOR SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF NUCLEAR ENERGY SYSTEMS: ECONOMICS*. Vienna: IAEA, 2014, 103 p. IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-4.4.
5. *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.
6. Ko W.I., Youn S.R., Gao R.X. Nuclear fuel cycle cost estimation and sensitivity analysis of unit costs on the basis of an equilibrium model// Nuclear Engineering and Technology, 2015, Vol. 47, Iss. 3, p. 306—31.
7. The Effects of the Uncertainty of Input Parameters on Nuclear Fuel Cycle Scenario Studies Nuclear Science NEA/NSC/R(2016)4 March 2017
8. *Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide*. Vienna: IAEA, 2015, 140 p. NES No.NG-T-5.2.
9. *Economic Analysis Working Group. AFCI Economic Tools, Algorithms, and Methodology*, INL/EXT-07-13293, 2009.

Отримано 25.04.19

#### REFERENCES

1. Energy strategy of Ukraine to 2035 (2017), “Safety, energy efficiency, competitiveness”, Order of Ministry Cabinet of Ukraine, №605-r, August 18, 2017.
2. Council Directives EU (2011), available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:199:0048:0056:EN:PDF> (accessed May 21, 2019).

- (2012), *Zakon Ukrainy № 4384-VI «Pro povodzhennya z vidpratsyovanyym yadernym palyvom shchodo rozmishchennya, proektuvannya ta budivnytstva tsentralizovanoho skhovyshcha vidpratsyovanoho yadernoho palyva reaktoriv typu VVER vitchyznyanykh atomnykh elektrostansiy»* [Law of Ukraine № 4384-VI “About spent fuel management with location, design and construction of Centralize Spent Nuclear Fuel Storage for national NPP with VVER”], *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainy*, no. 40.
- (2014), “INPRO methodology for sustainability assessment of nuclear energy systems: economics”, *IAEA Nuclear Energy Series*, no. NP-T-4.4, available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1653\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1653_web.pdf) (accessed May 21, 2019).
- (2013), “Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project GAINS”, *IAEA Nuclear Energy Series*, no. NP-T-1.14, available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1598\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1598_web.pdf) (accessed May 21, 2019).
- Ko, W.I., Youn S.R. and Gao, R.X. (2015), “Nuclear fuel cycle cost estimation and sensitivity analysis of unit costs on the basis of an equilibrium model”, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 47, Iss. 3, pp. 306-314.
- (2016), “The Effects of the Uncertainty of Input Parameters on Nuclear Fuel Cycle Scenario”, *NEA/NSC/R*, available at: <https://www.oecd-nea.org/science/docs/2016/nsc-r2016-4.pdf>. (accessed May 21, 2019).
- (2015), “Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User’s Guide”, *IAEA NES*, no. NG-T-5.2, available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1718\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1718_web.pdf)(accessed May 21, 2019).
- (2009), “Economic Analysis Working Group. AFCI Economic Tools, Algorithms, and Methodology”, *INL/EXT-07-13293*, available at: [https://thebulletin.org/third-party/nuclear-fuel-cost-calculator/assets/Shropshire\\_2009\\_Methods.pdf](https://thebulletin.org/third-party/nuclear-fuel-cost-calculator/assets/Shropshire_2009_Methods.pdf) (accessed May 21, 2019).

Received 25.04.19

Ю.Г. Куцан, О.В. Годун, В.Н. Кир'янчук

#### АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВАРИАНТОВ ЯДЕРНО-ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ УКРАИНЫ

Сформирована база данных технико-экономических параметров для сравнительной оценки вариантов ядерно-топливных циклов (ЯТЦ) Украины с использованием кода МАГАТЭ MESSAGE. Разработаны расчетные модели вариантов ЯТЦ Украины с накоплением и переработкой отработанного ядерного топлива. Обосновано применение анализа чувствительности для сравнительной оценки ЯТЦ. Определено влияние ценовых показателей составляющих элементов ЯТЦ на стоимость производимой электроэнергии.

*Ключевые слова:* МАГАТЭ, MESSAGE, анализ чувствительности, ЯТЦ, экономика.

U.G. Kutsan, O.V. Godun, V.N. Kyrianchuk

#### SENSITIVITY ANALYSIS FOR COMPARATIVE EVALUATION OF UKRAINIAN NUCLEAR FUEL CYCLE

The IAEA MESSAGE code’s database of technical and economic parameters for the comparative estimation of Ukrainian nuclear fuel cycles has been formed. Calculated models of Ukrainian NFC scenario with accumulation and processing SNF are developed. The application of sensi-

vity analysis for comparative estimation of the NFC is substantiated. The influence of the prices of NFC components on cost of the electric power produced is determined.

*К e y w o r d s: IAEA, MESSAGE, sensitivity analysis, NFC, economy.*

*КУЦАН Юлій Григорович, д-р техн. наук, заст. директора з наукової роботи Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 1966 р. закінчив Київський політехнічний ін-т. Область наукових досліджень — моделювання технологічних процесів в енергетичній галузі.*

*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.*

*КИР'ЯНЧУК Валентин Миколайович, головний фахівець служби проектної безпеки та паливовикористання Науково-технічного центру ДП НАЕК «Енергоатом». У 1999 р. закінчив Київський державний університет ім. Тараса Шевченка. Область наукових досліджень — моделювання технологічних процесів у енергетичній галузі.*