

Ю.Г. Куцан, Київ

О.В. Годун, Київ

В.М. Кир'янчук, Київ

АЛЬТЕРНАТИВНА ОЦІНКА РОЗВИТКУ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ З МОДЕЛЮВАННЯМ ОЕС УКРАЇНИ КОДОМ МАГАТЕ MESSAGE

Abstract. Experience of using MESSAGE modeling tool of IAEA for assessment of nuclear energy system development in future under condition of Paris climate agreements is presented. The conclusion about of reasonability of consideration of electricity production environment risks in nuclear energy system assessments is made

Актуальність

Відповідно до Енергетичної стратегії розвитку України до 2035 року [1], ядерна генерація являється запорукою енергетичної безпеки України. Передбачається подальша ключова роль атомної генерації у енергетичному балансі України з добудовою енергоблоків на Хмельницькій АЕС, підвищенням номінальної потужності та продовженням терміну експлуатації енергоблоків на 20 років.

За результатами 1-го півріччя 2018 року [2] у експлуатації в Україні знаходиться 13 енергоблоків ВВЕР-1000 та 2 енергоблоки ВВЕР-440 загальної встановленої потужності 13,8 ГВт. Відпуск електроенергії до енергоринку склав 37,8 млрд. кВт*г, що становить 51,6% у виробництві електроенергії в Україні. Енергоблоки АЕС України у своїй більшості введено в експлуатацію більш ніж 30 років назад, що навіть при продовженні строку експлуатації на 20 років більш проектного відповідно до світового досвіду [3] призводить до вичерпання проектного строку їх експлуатації. У період з 2030 по 2040 роки прогнозується виведення з експлуатації 12 енергоблоків АЕС встановленою потужністю 10,8 ГВт, що ставить під сумнів присутність АЕС на ринку генерації електроенергії на рівні 50%, якій існує сьогодні.

З урахуванням Паризького кліматичного договору 2015 року [4], енергетична стратегія передбачає розширене впровадження відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ) з метою скорочення викидів CO₂. Це дозволить забезпечити долю ВДЕ у виробництві електроенергії в Україні на рівні 20%, що у 2035 році складе 38 млрд. кВт*г. Буде спостерігатись перерозподіл виробництва електроенергії за видами генерації (насамперед, для генерацій з використанням викопного палива) в умовах посилення вимог щодо мінімізації впливу на навколишнє середовище. У даному контексті ядерна енергетика може забезпечити зростаючі потреби у електроенергії з мінімальним викидом парникових газів, насамперед CO₂ [5].

Постановка задачі

Розвиток ядерної енергосистеми та будівництво нових потужностей АЕС розглядається з порівнянням конкурентоспроможності АЕС з іншими видами генерації, присутніми в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) [6]. На підставі досвіду реалізації міжнародних проектів МАГАТЕ, оцінка долі АЕС у виробленні електроенергії у енергосистемі проводиться з використанням кодів моделювання.

З метою дослідження перспективного розвитку ЯЕС України необхідно:

- розробити модель ОЕС України для коду МАГАТЕ MESSAGE;
- провести порівняльний аналіз сценаріїв розвитку ЯЕС у енергосистемі України в залежності від капітальних витрат на будівництво АЕС та податків на викиди CO₂ іншими видами генерації електроенергії з використанням коду MESSAGE;
- застосувати до оцінки ЯЕС України міжнародний досвід альтернативної оцінки з врахуванням ризиків впливу різних видів генерації електроенергії на навколишнє середовище з використанням коду MESSAGE
- враховувати об'єми викидів CO₂ та відповідні видатки щодо шкідливих викидів на вироблену електроенергію для різних видів генерації.

Вирішення задачі

З метою вивчення впливу низьковуглецевої стратегії у рамках Паризької кліматичної угоди 2015 року на розвиток ОЕС та визначення ролі АЕС у подальшому виробництві електроенергії в Україні, ДП НАЕК «Енергоатом» у 2017 році приєдналось до проекту МАГАТЕ з оцінки потенційної ролі ядерної енергетики у національних стратегіях пом'якшення наслідків зміни клімату. Передбачено моделювання майбутньої енергетичної системи України з використанням програмного засобу МАГАТЕ MESSAGE та визначення оптимального сценарію виробництва електроенергії, який відповідає мінімальної нормованої вартості електроенергії.

Модель для аналізу стратегічних сценаріїв виробництва енергії та їх загальний вплив на навколишнє середовище (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) [7] розроблено як оптимізаційну модель для середньо та довгострокового планування енергетичної системи. Виходячи з основної моделі Хафель-Манна, це була розроблена протягом 1970-х років Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу розрахункова методика. МАГАТЕ придбало MESSAGE у 2000 році з подальшим удосконаленням у частині розробки інтерфейсу та включення даних щодо ядерної генерації та альтернативних енергетичних стратегій. Методика MESSAGE заснована на оптимізації функції під набором обмежень, наприклад, видобуток ресурсів, доступність палива, капітальна вартість, проникнення на ринок для нових технологій, екологічних викидів та утворення відходів, з метою формулювання та оцінки альтернативи щодо

енергопостачання для задоволення попиту на енергію. Основою MESSAGE являється математичний опис енергетичної системи, що включає категорії енергії (первинна енергія, кінцева енергія та корисна енергія), паливо (товари) та пов'язані з ними фактично використані технології (наприклад, електроенергія, бензин, етанол, вугілля та районне тепло), а також енергетичні послуги (наприклад, корисне опалення приміщень за видами енергетичних технологій). Економічні характеристики включають інвестиційні витрати, фіксовані, змінні операційні та експлуатаційні витрати, витрати на ввіз і внутрішнє паливо, тощо. Паливо та технології поєднуються для побудови енергетичних ланцюгів, через які енергія тече від пропозиції до потреби. Екологічні аспекти аналізуються шляхом відстеження або обмеження забруднюючих речовин (наприклад, CO₂), що викидаються різними технологіями на кожному етапі енергетичного ланцюга. Розглядаючи національне енергетичне планування, відправною точкою є розробка довгострокової стратегії на основі цілісної оцінки всіх майбутніх варіантів постачання енергії, які б відповідали майбутньому попиту на енергію відповідно до довгострокового прогнозу держави щодо соціального та економічного розвитку.

Для аналізу енергосистеми України розроблено однорегіональну модель (рис. 1), в якій представлено використані енергоресурси, технології видобутку ресурсів і імпорт, технології виробництва електроенергії, транспортування і розподілу електроенергії. У вихідних даних моделі вказані запаси вугілля, газу і природного урану (рівень – «Ресурси»), які за допомогою технологій видобутку (C_{extr} , U_{extr} , G_{extr}) спрямовуються на рівень «Первинні ресурси». Крім видобутку власних запасів можливий також імпорт ресурсів (блоки G_{imp} , C_{imp} для імпорту газу і вугілля відповідно). У модель включені вугільна (C_{pp}), газова (G_{pp}), гідро- (H_{pp}) та вітрогенерації (W_{pp}), а також відкритий ядерно-паливний цикл (NFC).

У схему ядерно-паливного циклу (рис. 2) включений блок, що описує генерацію електроенергії з реакторами на легкій воді (ВВЕР), а також процеси створення ядерного палива з метою врахування цін на послуги зі конверсії та збагачення урану, фабрикації ядерного палива, які представлені без урахування витрат на будівництво відповідних установок.

Загальну інформацію щодо техніко-економічних даних для різних типів генерації наведено у табл. 1. Відповідно до наявної інформації, для всіх видів ВДЕ капітальні витрати на будівництво (від 900 дол. США / кВт для вітрової генерації до 2300 дол. США / кВт для електростанцій на вуглі) значно нижче ніж витрати на будівництво АЕС (4900 дол. США / кВт), що може накладати значні питання щодо економічної привабливості будівництва нових енергоблоків АЕС.

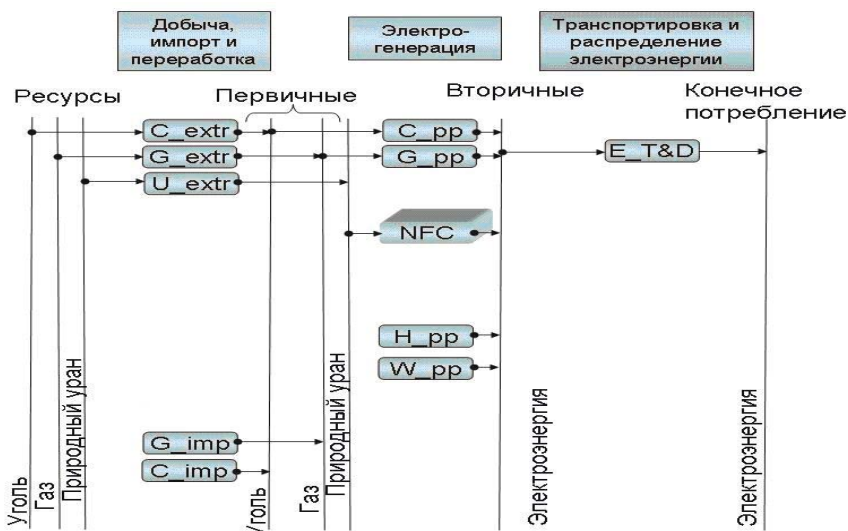


Рис. 1. Модель енергосистеми України для програмного засобу MESSAGE

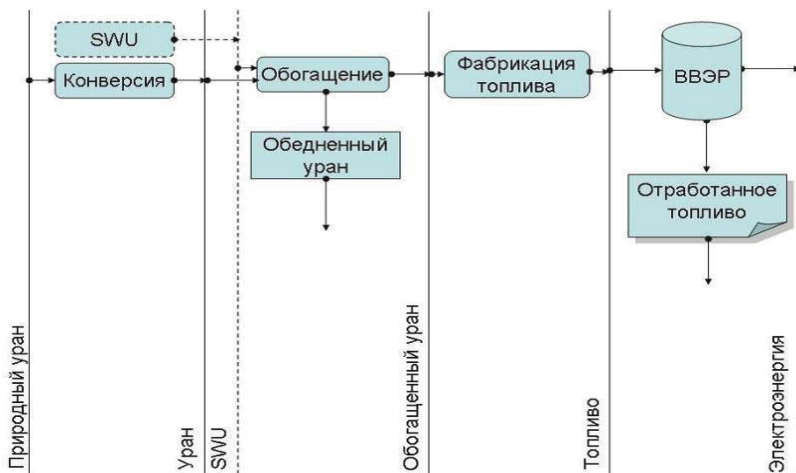


Рис. 2. Моделювання відкритого ядерно-паливного циклу України для програмного засобу MESSAGE

Результати моделювання сценаріїв розвитку ОЕС України з використанням коду MESSAGE на довгостроковий період наведено на рис. 3. Розрахунки проведено при врахуванні ставки дисконтування 10%, що

притаманно для країн що розвиваються (на відміну від 3% та 5% для розвинених країн). Розглянуто сценарії з вартістю будівництва легководних АЕС 4700 дол. США / кВт та 5900 дол. США / кВт, при різних податках C на викиди CO_2 ($C = 0$; 5 та 50 дол. США / т). Відповідним чином зроблено індексацию сценаріїв (наприклад, N4700_C50 LWRn, що відповідає вартості будівництва 4700 дол. США / кВт, $C = 50$ дол. США / т).

Таблиця 1

Техніко-економічні дані для вітрової (WPP), сонячної (Solar), вугільної (Coal) та ядерної (NPP) генерації

	Вітрова	Сонячна	Вугільна	АЕС
Потужність, МВт	10	1	300	1200
Капітальні витрати, USD/кВт	900	1500	2300	4700 5900
КПД, %	-	-	35	33
Постійні витрати, USD/кВт	39,7 [8]	23,4 [8]	50,9 [8]	100 [8]
Операційні (змінні) витрати, USD/кВт*год	-	-	5,00 [8]	2,3 [8]
КВВП, %	0,25	0,15	0,85	90
Проектний строк експлуатації, років	25	15	40	60
Період будівництва, років	1	1	4	6

Результати показують, що доля АЕС у виробництві електроенергії знижується з 58% у 2020 році до 30% у 2035 році навіть при введенні в експлуатацію енергоблоків №3 та №4 Хмельницької АЕС у 2025 та 2030 році відповідно у наслідок виводу з експлуатації енергоблоків №1 – 2 Рівненської АЕС та енергоблоку №1 Южно-Української АЕС загальною встановленою потужністю 2,8 ГВт. Приймаючи до уваги значно більші капітальні витрати на будівництво АЕС порівняно з іншими типами генерації, результати розрахунків показують зниження частки АЕС у ОЕС України до 15% після 2040 року для сценарію 4700 дол. США / кВт та до 10% при вартості будівництва АЕС на рівні 5900 дол. США / кВт при відсутності податку на викиди CO_2 ($C = 0$ дол. США / т). Введення податку на викиди CO_2 на рівні 5 дол. США / т призводить до росту долі АЕС у виробництві електроенергії не більше 3%.

Значне збільшення присутності АЕС спостерігається для сценаріїв з величиною податку на викиди CO_2 на рівні 50 дол. США / т. Максимальна доля АЕС у виробництві електроенергії відповідає сценарію (N4700_C50 LWRn) та дорівнює 45%, 65% та 75% відповідно у 2040, 2060 та 2090 роках. Але в умовах наявної на даний час величини податку 37 коп./т CO_2 реалізація даних сценаріїв представляється спірною.

Таким чином, при прийнятих вихідних даних у табл. 1 необхідне врахування додаткових рішень щодо обґрунтування конкурентної привабливості АЕС в умовах впровадження альтернативної генерації після 2030 року.

Одним з підходів являється врахування можливих ризиків (externalities) [9], що виникають при реалізації різних типів генерації електроенергії та представляють собою усереднену оцінену вартість заподіяної шкоди на довкілля та людину. При розрахунках економічної привабливості виробництва електроенергії дані ризики не представлені у вартості електроенергії. Однак, даний підхід дозволяє коректно будувати довгострокові інвестиційні рішення та оцінювати так звану соціальну ціну електроенергії від різних джерел. Дані щодо величин ризиків для різних видів генерації електроенергії наведено у табл. 2 [9].

Таблиця 2

Діапазон зміни та прийняте у розрахунках значення вартості ризику для різних видів генерації електроенергії (цент/кВт*год)

Значення	Вугіль	Нафта	Газ	АЕС	Гідро	Вітро	Сонячна	Біомаса
Min	3,0	4	0,49	0,2	0,03	0,001	0,25	0,08
Max	9,5	9	3	1,5	1	0,25	0,6	3,5
Прийняте для розрахунків	5,4	5,9	1,7	0,6	0,4	0,1	0,5	1,3

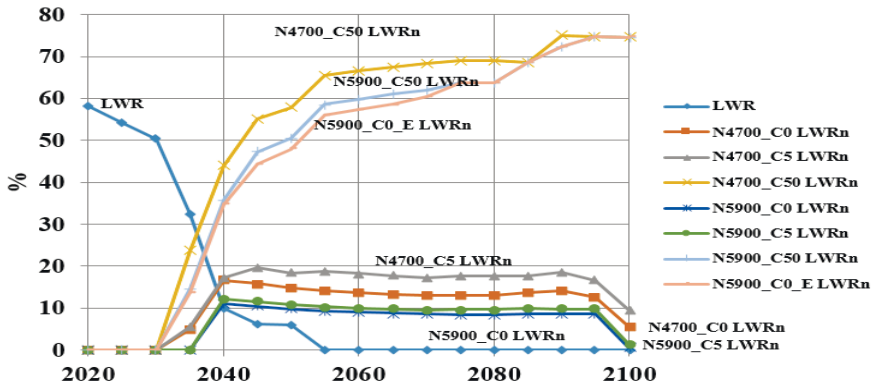


Рис 3. Доля АЕС у виробництві електроенергії в Україні для різної вартості будівництва АЕС та значень податку на викиди CO₂ та “externalities”(сценарій N5900_C0_E LWRn)

Результати розрахунків врахування можливих ризиків (externalities) також представлено на рис. 3 (сценарій N5900_C0_E LWRn). Навіть при вартості будівництва АЕС 5900 дол. США / кВт та нульового податку на

викиди CO₂, врахування ризиків призводить до зростання долі АЕС у виробництві електроенергії до 35%, 57% та 75% у 2040, 2060 та 2090 роках. Структуру ОЕС України для сценарію N5900_C0_E LWRn представлено на рис. 4.

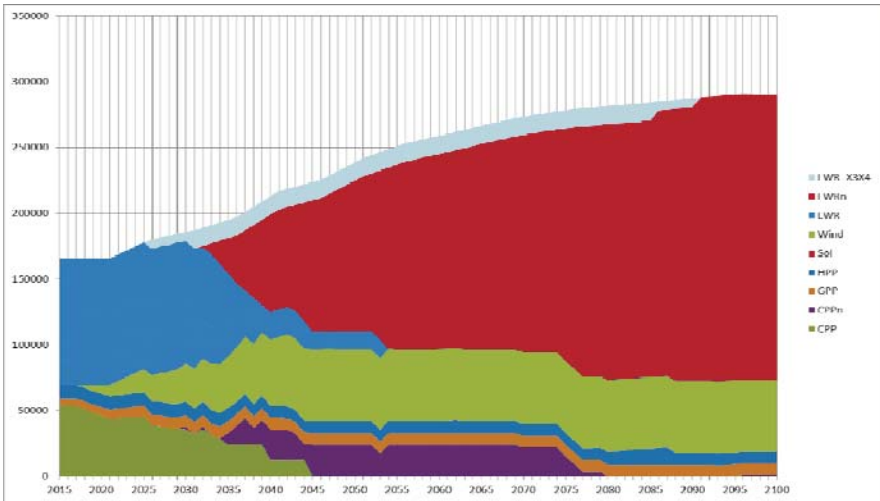


Рис. 4. Структура ОЕС України для сценарію з урахуванням ризиків впливу різних видів генерації (externalities)

Висновки

Розроблено модель та проведено аналіз розвитку енергосистеми України з використанням коду MESSAGE. Проведено розрахунки, за результатами яких показано, що для умов ОЕС України збільшення податку на викиди CO₂ до 5 дол. США / т не призводить до покращення конкурентоспроможності АЕС порівняно з ВДЕ. Доцільне врахування ризиків виникнення шкідливих наслідків впливу різних типів генерації електроенергії на довкілля та людину (externalities), що за результатами розрахунків призводить до покращення економічної привабливості АЕС. У даному випадку загальна доля АЕС у виробництві електроенергії буде поступово зростати до 75%, що дозволить забезпечити відповідність до умов Паризької кліматичної угоди 2015 року з точки зору зниження викидів CO₂.

1. Енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження КМУ від 18.08.2017 No. 605-г
2. http://www.energoatom.kiev.ua/files/file/itogi_06_2018.pdf
3. Plant life management models for long term operation of nuclear power plant. – Vienna: IAEA, 2015 – 152 p. NES No. NP-T-3.18
4. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
5. Climate change and nuclear power 2016. – Vienna: IAEA, 2016 – 98 p.

6. 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).
7. Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide. Vienna: IAEA, 2015 – 140 p. NES No.NG-T-5.2
8. Capital cost estimates for utility Scale Electricity Generating Plants. Washington: EIA, 2016 – 141 p.
9. Environmental Externalities from Electric Power Generation. The Case of RCREEE Member States. 2013 – 9 p. RCREEE

Поступила 25.01.2018р.

УДК 574.539.1.04:628.3.034.2

С.В. Данилов, Київ
Ю.Л. Забулонов, Київ
В.М. Кадошніков, Київ
Л.А. Одукалець, Київ

НАНОТЕХНОЛОГІЇ В ОЧИЩУВАННІ ТРАПНИХ ВОД ФІЗИКО-ХІМІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Abstract. This article describes a new method of treating and recycling of polluted industrial water from dangerous pollutants of nuclear power engineering using nanoparticles of polysilicic acids of sorbent directly in the volume of drain water arrival and storage with the further coagulation of the formed colloids using nanochrystals of magnetite.

Актуальність

Під час експлуатації атомних електростанцій утворюється значна кількість радіаційно-забруднених вод, зокрема, трапні води.

Особливість трапних вод полягає в тому, що крім радіонуклідів ці води містять значну кількість іонів стабільних ізотопів, кількість яких на порядки перевищує вміст радіонуклідів [1].

Постановка задачі

Ідеологія очищення техногенних вод, що містять катіони різної природи, полягає в отриманні нанокомпозитів, які в процесі свого синтезу поглинають деякі радіонукліди, що входять в ядро колоїдної наночастки, що конденсує. Крім того, зовнішня поверхня, що утворюється, включає потенціал-визначальні активні центри. Центри, які утворені іонізованими силінольними (RSi-OH) з'єднаннями, в результаті іонообмінних реакцій між H-іоном і іонами нуклідів, що знаходяться в дисперсійному середовищі,

© С.В. Данилов, Ю.Л. Забулонов, В.М. Кадошніков, Л.А. Одукалець 19