

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ
ІМ. Г.Є. ПУХОВА

ГОДУН Олег Вікторович



УДК 621.039.003

**ПРОГНОЗНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯДЕРНО-ПАЛИВНИХ ЦИКЛІВ
НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТРЕНДІВ**

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, старший дослідник
Куцан Юлій Григорович
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, в.о. заступника директора з науково-технічної роботи

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Борисенко Андрій Володимирович
ТОВ «Укренергоконсалтинг», заступник генерального директора

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Блінов Ігор Вікторович
Інститут електродинаміки НАН України, заступник директора інституту з наукової роботи

Захист відбудеться «23» вересня 2020 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.185.01 Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Генерала Наумова, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України за адресою: 03164, м. Київ, вул. Генерала Наумова, 15.

Автореферат розісланий «19» серпня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



В.В. Душеба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прогнозна модель – це математична модель об'єкту прогнозування, дослідження якої дає можливість одержати інформацію про можливі стани такого об'єкту в майбутньому та/або шляхах, умовах і термінах досягнення цих станів. Під об'єктом прогнозування зазвичай розуміють процеси, явища і події, на які спрямована пізнавальна і практична діяльність. Прогнозне моделювання – це процес побудови і дослідження відповідної прогновної моделі з метою вивчення майбутніх властивостей об'єкту дослідження на основі сформульованих математичних закономірностей з урахуванням ретроспективного аналізу та критичної оцінки сучасних трендів розвитку об'єкта дослідження. На сьогодні відомими є близько тридцяти конкретних галузей наукового прогнозування, серед яких окремо визначають глобальні світові проблеми, і за визнанням Римського клубу, однією з найважливіших проблем наукового прогнозування є енергетична криза.

Відповідно до Енергетичної стратегії до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (затверджено розпорядженням КМУ від 18.08.2017 № 605-р) в Україні передбачається зростання виробництва електроенергії від АЕС. З урахуванням наявної інфраструктури атомної енергетики, заснованої на використанні відкритого ядерно-паливного циклу (ЯПЦ), передбачається накопичення значного об'єму відпрацьованого ядерного палива (ВЯП). Разом з тим, Україною імплементовано положення Директиви від 19 липня 2011 року №2011/70/EURATOM «Про запровадження рамок Співтовариства для відповідального та безпечного управління відпрацьованим паливом та радіоактивними відходами», в якій наголошується на принциповій необхідності прийняття на національному рівні стратегії кінцевого поводження з ВЯП з урахуванням уніфікованих стандартів безпеки для охорони здоров'я працівників АЕС та населення, мінімізації впливу на навколишнє середовище та забезпечення гарантій поводження з ядерними матеріалами. Відповідно до Об'єднаної конвенції про безпеку управління ВЯП та про безпеку управління радіоактивними відходами ("Об'єднана конвенція"), Кодексу поведінки Міжнародної агенції з атомної енергії (МАГАТЕ) про забезпечення безпеки і збереження радіоактивних джерел, а також наявної промислової практики, ВЯП може бути використано повторно, утилізовано або захоронено. Це фактично визначає можливість створення більш складних ЯПЦ, заснованих на принципово інших організаційно-технічних засадах їх функціонування. Таким чином, прийняття на національному рівні рішення щодо кінцевого поводження з ВЯП потребує розгляду та вивчення ЯПЦ, відмінних від наявного у промисловому використанні.

Приймаючи до уваги строк експлуатації АЕС (до 80 років) та час довгострокового зберігання ВЯП (до 100 років), завдання може бути вирішено методами та засобами прогнозного моделювання ЯПЦ з використанням структурованої критеріальної оцінки, оскільки необхідно оперувати значним переліком техніко-економічних параметрів складових елементів ЯПЦ, враховувати зміну даних параметрів та потоку ядерних матеріалів у ЯПЦ на

всьому часовому інтервалі дослідження, тощо. Атомна енергетика є невід'ємною складовою частиною Об'єднаної енергетичної системи України (ОЕСУ). Таким чином, економічні витрати на реалізацію обраного напрямку розвитку ЯПЦ можуть мати вплив на перерозподіл балансу генеруючих потужностей у ОЕСУ. Значний внесок у створення методів та засобів моделювання енергетичної системи України та техніко-економічних засад її функціонування здійснили вітчизняні вчені: З.Х. Борукаєв, В.М. Геєць, А.В. Борисенко, В.В. Мохор, С.Є. Саух, І.В. Блінов. Застосування методів оцінювання розвитку ядерної енергетики та ЯПЦ наведено у роботах Л.Л. Литвинського, А.В. Носовського, В.С. Красноручького, В.І. Усанова, Б. Діксона, П. Грудєва, В. Саргєяна та інш. Приклади побудови підходів до моделювання ЯПЦ наведено у роботах В.В. Кузнецова, Г.О. Фесенко, В.С. Каграманяна, А.О. Андріанова та інш. Сучасні методи прогнозного критеріального оцінювання розвитку ЯПЦ викладені у Методології МАГАТЕ INPRO (TECDOS IAEA 1575) та у публікаціях за результатами реалізації проектів МАГАТЕ GAINS та SYNERGIES. Проте аналіз наявної інформації свідчить про відсутність формалізованого підходу до проведення прогнозного моделювання розвитку ЯПЦ у довгостроковій перспективі. Принциповою складністю та джерелом невизначеності являється підготовка та використання первинної інформації з техніко-економічних параметрів складових елементів ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання, врахування взаємозв'язків між складовими компонентами складних ЯПЦ та інтерпретація результатів прогнозного моделювання ЯПЦ.

Отже, враховуючи розширене використання результатів моделювання ЯПЦ у практичній діяльності з експлуатації АЕС та функціонуванні ОЕСУ, однією з актуальних наукових та практичних завдань є подальший розвиток методів прогнозного моделювання ЯПЦ, розробка та використання математичних моделей, які б враховували взаємозв'язки складових елементів організаційно-технічної структури складних ЯПЦ, підготовка та використання первинної інформації, дослідження моделей у різних режимах їх функціонування та інтерпретація результатів моделювання ЯПЦ.

Таким чином, актуальним є науково-практичне завдання з удосконалення підходу з організації процесу моделювання та його застосування до вирішення проблем довгострокового прогнозування розвитку ЯПЦ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження за темою дисертації виконано відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року №605-р; Наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості від 25 грудня 2005 року №615 «Щодо реалізації міжнародного проекту МАГАТЕ»; Наказу Міністерства палива та вугільної промисловості України № 261 від 13.05.2008 «Стратегічні напрями поводження

з відпрацьованим ядерним паливом АЕС України в рамках Енергетичної стратегії України на період до 2030 року та затвердження Плану заходів щодо їх реалізації»; розпорядження Кабінету Міністрів України від 6 червня 2018 року №497-р «Про затвердження плану заходів з реалізації етапу «Реформування енергетичного сектору (до 2020 року) Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»»; Указу Президента України від 13.04.2016 № 141/2016 «Про додаткові заходи щодо перетворення об'єкту «Укриття» на екологічно безпечну систему та відродження територій, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи»; Директиви від 19 липня 2011 року №2011/70/EURATOM, щодо надійного та безпечного поводження з ВЯП та радіоактивними відходами; Наказу Держатомрегулювання від 1 серпня 2017 року щодо затвердження документу «Загальні положення безпеки при поводженні з радіоактивними відходами до їх захоронення». Тема дослідження відповідає національним доповідям про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні та діяльності України у рамках проекту МАГАТЕ INPRO.

Основні теоретичні та практичні результати було впроваджено у відокремленому підрозділі «Науково-технічний центр» ДП НАЕК «Енергоатом» у складі:

- науково-дослідної роботи за темою: «Розробка концепції поводження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС України» (план-замовлення від 15.06.2015 №619-06-15/41);

- міжнародних проектів за темами: «Національні дослідження України у рамках проекту МАГАТЕ INPRO з оцінки відповідності ядерної енергосистеми України до критеріїв «стійкого розвитку»» (Lessons Learned from Nuclear Energy System Assessments (NESA) Using the INPRO Methodology. A Report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) (IAEA-TECDOC-1636)); досліджень у рамках INPRO у проекті МАГАТЕ GAINS з оцінки глобальної динамічної ядерної енергетичної системи (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)); досліджень у рамках INPRO у проекті МАГАТЕ SYNERGIES з міжнародної кооперації у рамках забезпечення «стійкості» ЯПЦ на підставі порівняння сценаріїв розвитку ядерної енергосистеми (Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES (IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-4.9));

- виконання заходу «Аналіз практики, технологій з довгострокового зберігання, переробки відпрацьованого ядерного палива та поводження з цінними продуктами його переробки» Стратегічних напрямків поводження з відпрацьованим ядерним паливом атомних електростанцій України з реакторами ВВЕР на період до 2030 року (Наказ Міненерговугілля від 19.06.2015 №386).

Мета та задачі дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є удосконалення методів організації процесу прогнозного моделювання ЯПЦ, зокрема за рахунок розробки відповідних математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, застосування аналізу трендів до підготовки первинної інформації, дослідження моделей у різних режимах їх функціонування для інтерпретації результатів моделювання.

Для досягнення поставленої мети сформовані та вирішені наступні завдання, а саме:

- критичний огляд існуючих методів та засобів математичного моделювання, а також практики оцінювання результатів моделювання ЯПЦ для виявлення обмежень, обумовлених відсутністю моделей складних ЯПЦ та методів підготовки первинної інформації, дослідження моделей ЯПЦ у різних режимах їх функціонування для інтерпретації результатів моделювання;
- удосконалення математичної моделі відкритого ЯПЦ, зокрема шляхом врахування потоку ядерних матеріалів, для забезпечення можливості моделювання частково-замкненого та замкненого ЯПЦ;
- розроблення методу аналізу первинної інформації з техніко-економічних параметрів ЯПЦ, що враховує тренди їх зміни у часі, для забезпечення адекватності прогнозних моделей ЯПЦ;
- розроблення та верифікація математичного методу порівняльної оцінки ЯПЦ за множиною ключових індикаторів (КІ), якій дозволяє застосовувати різнофізичні параметри, що отримані як результат використання відповідних прогнозних моделей;
- розроблення методу аналізу чутливості прогнозних моделей ЯПЦ до зміни первинної інформації для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ;
- підтвердження ефективності запропонованих методів шляхом їх застосування для прогнозного моделювання частково-замкненого та замкненого ЯПЦ відповідно до АЕС України та порівняння результатів моделювання з наявним досвідом розвитку ЯПЦ у світі.

Об'єктом дослідження є ядерно-паливний цикл, як організаційно-технічна система, а **предметом дослідження** є методи організації процесу прогнозного моделювання ядерно-паливних циклів.

Методи дослідження. Теоретичною основою дисертаційного дослідження є теорія прийняття рішень, метод технічного аналізу трендів, метод арифметичного ковзного середнього. Математичною базою є метод лінійного програмування. Реалізацію математичних моделей ЯПЦ виконано із використанням програмного засобу MAГATE MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts). У ході дослідження використано актуальну інформацію з досвіду поводження з ВЯП на АЕС України та з наявної організаційно-технічної структури ЯПЦ.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Вперше визначено недоліки існуючих моделей, методів та засобів математичного моделювання ЯПЦ, та виявлено обмежені можливості їх

використання для створення методологічних засад побудови математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання, а також дослідження моделей ЯПЦ у різних режимах функціонування для оцінювання результатів такого моделювання. Це дало можливість створити методологічні засади для побудови математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання, а також провести дослідження моделей у різних режимах їх функціонування для інтерпретації отриманих результатів.

2. Удосконалено математичну модель відкритого ЯПЦ за рахунок опису взаємозв'язків між потоками ядерних матеріалів, що дало можливість виконати розробку моделей ЯПЦ зі складними організаційно-технічними структурами їх побудови. Вперше запропоновано до використання математичні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання.

3. Отримав подальшого розвитку метод формування первинної інформації на основі змінних у часі техніко-економічних параметрів з урахуванням трендів розвитку ЯПЦ, що дозволяє розглядати ЯПЦ як динамічну систему та забезпечити відповідність цілям прогнозного моделювання. Метод дозволяє врахувати часові тренди зміни початкових техніко-економічних параметрів відповідних технологічних процесів для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ.

4. Вперше запропоновано метод порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком КІ, що дозволяє виконати багатокритеріальну порівняльну оцінку ЯПЦ на відміну від підходу до порівняння ЯПЦ за одним обраним критерієм. Метод дозволяє порівнювати ЯПЦ з різними технологічними характеристиками за множиною різнофізичних параметрів. Проведено верифікацію методу на основі порівняння з даними МАГАТЕ.

5. Вперше запропоновано метод аналізу чутливості моделі ЯПЦ по визначеній множині первинних параметрів, якій дозволяє врахувати змінність у часі техніко-економічних параметрів ЯПЦ та забезпечити адекватність моделі ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи впроваджені та використовуються у Державному підприємстві «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» (ДП «НАЕК «Енергоатом»), Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного Наукового Центру «Харківський фізико-технологічний інститут» НАН України. Базові принципи та основні положення розроблених методів застосовано у звіті ДП «НАЕК «Енергоатом» «Розробка концепції поводження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС України» (план-замовлення від 15.06.2015 №619-06-15/41), документі «Концепція Державної економічної програми поводження з відпрацьованим ядерним паливом вітчизняних атомних електростанцій на період до 2024 року» (затверджений розпорядженням КМУ від 5 червня 2019 р. № 385-р Київ), документі «Підходи до формування критеріїв вибору енергоблоків АЕС (включно з реакторною установкою) з урахуванням аспектів ЯПЦ» (затверджені Протоколом ДП «НАЕК «Енергоатом» 2 вересня 2015 року),

керівництва МАГАТЕ «Experience in Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: Country Case Studies» (IAEA-TECDOC-1837), «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), «Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES» (IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-4.9).

Особистий вклад автора. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У публікаціях, виконаних у співавторстві, автору належать: [1 - 6] формування підходів до вхідних техніко-економічних даних технологій ЯПЦ, моделювання ядерної енергетичної системи України; [7, 9 - 10] формування критеріїв оцінки проектів РУ нових АЕС щодо взаємозв'язку з ЯПЦ; [8] побудова моделі ядерної енергетичної системи України; [12] формування підходів до критеріальної оцінки ЯПЦ; [11, 13 - 16] розробка підходів до побудови моделей ЯПЦ з використанням програмного засобу MESSAGE.

Апробація результатів дисертації. Основні результати та положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких міжнародних наукових конференціях та семінарах:

- XX Міжнародна конференція з фізики радіаційних явищ та радіаційного матеріалознавства (10 – 15 вересня 2012, м. Алушта, Україна);
- Дванадцятий Міжнародний діалоговий форум МАГАТЕ INPRO «Розвиток ядерних енергетичних систем на основі реакторів IV» (13 - 15 квітня 2016, м. Відень, Австрія);
- Робоча технічна нарада з реалізації актуалізації та оновлення методології МАГАТЕ INPRO за напрямками «Безпека РУ» та «Безпека установок ЯПЦ» (14 – 18 листопада 2016, м. Відень, Австрія);
- Робоча технічна нарада «Удосконалення ЯПЦ для покращення стійкості ядерної енергетики за напрямком мінімізації високоактивних відходів» (17 – 19 жовтня 2017, м. Відень, Австрія);
- XXXVII науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (15 травня 2019, м. Київ, Україна);
- Науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації», Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (20 грудня 2019 року, Київ, Україна).

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковано в 16 наукових працях, що відповідають вимогам ДАК України, у тому числі: 9 наукових статтях, які індексуються міжнародними наукометричними базами; 5 збірниках міжнародних форумів МАГАТЕ, 2 матеріалах наукової конференції.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (102 найменування)

та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 185 сторінок, у тому числі, 141 сторінка основного тексту, включаючи 25 таблиць та 35 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику дисертації, включаючи актуальність теми, зв'язок роботи із науковими програмами, планами та темами, мету, завдання та методи дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, апробацію та опублікування результатів.

У першому розділі наведено загальну інформацію з методів моделювання та розробки математичних моделей ЯПЦ, проведено критичний аналіз методологічних підходів та сучасних програмних засобів моделювання ЯПЦ, проаналізовано наявні підходи з критеріальної порівняльної оцінки ЯПЦ, надано інформацію із застосування аналізу чутливості та аналізу трендів для цілей прогнозного моделювання.

Показано інформацію з застосування аналітичного, імітаційного та оптимізаційного методів побудови моделей ЯПЦ. Проведено аналіз і порівняння наявних методів моделювання ЯПЦ. Для кожного з методів наведено перелік відповідних програмних засобів. Показано, що для цілей прогнозного аналізу ЯПЦ найбільшого застосування набули оптимізаційні комп'ютерні засоби, такі як FCOPT (США), MARKAL (США) та MESSAGE (МАГАТЕ). При цьому, на відміну від інших, комп'ютерний засіб MESSAGE (МАГАТЕ) дозволяє аналізувати динамічні властивості ЯПЦ, аналізувати паливообмін між технологіями та враховувати екологічний вплив технологій на навколишнє середовище. Разом з тим, MESSAGE застосовує спрощену загальну модель відкритого ЯПЦ, яка потребує доопрацювання для врахування більш складних конфігурацій ЯПЦ, заснованих на принципово інших технологічних рішеннях.

Наведено математичний опис програмного засобу MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts), який представляє собою динамічну лінійну модель цілочисельного програмування. У основу розрахункового алгоритму MESSAGE покладено оптимізацію цільової функції, яку можна представити у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
f = & \sum_t \left[\beta_m^t \Delta t \left\{ \sum_{svd} \sum_l z_{svd..lt} \times \epsilon_{svd} \times \left[ccur(svd,t) + \sum_i \sum_m ro_{svd}^{mlt} \times cari(ml,t) \right] + \right. \right. \\
& \sum_{svd} \epsilon_{svd} \times \sum_{e=0}^{e_d} U_{svd.e.t} \times \epsilon_{svd} \times \left[k_e \times \left(ccur(svd,t) + \sum_m ro_{svd}^{mt} \times car2(m,t) \right) + \right. \\
& cred(d,e) + \left. \left. \sum_m ro_{svd}^{mt} \times car1(m,t) \right] + \sum_{svd} \sum_{\tau=t-\tau_{svd}}^t \Delta \tau \times Yz_{svd..t} \times cfix(svd,\tau) + \right. \\
& \left. \sum_r \left[\sum_g \sum_l \sum_p Rzrgp.lt \times cres(rgpl,t) + \right. \right. \\
& \left. \left. \sum_c \sum_l \sum_p Izrcp.lt \times cimp(rcpl,t) - \sum_c \sum_l \sum_p Ezrcp.lt \times cexp(rcpl,t) \right] \right\} + \\
& \beta_b^t \times \left\{ \sum_{svd} \sum_{\tau=t}^{t+t_d} \Delta(t-1) \times Yz_{svd..t} \times [ccap(svd,\tau) \times fri_{svd}^{t_d} \right. \\
& \left. \left. \sum_i \sum_m rc_{svd}^{mt} \times cari(m,t) \times fra_{svd,m}^{t_d-\tau} \right] \right\}, \tag{1}
\end{aligned}$$

де складові, що входять до формули (1) описують змінні та постійні експлуатаційні витрати, витрати на використання енергетичних ресурсів, введення та виведення з експлуатації генеруючих потужностей після завершення проектного терміну їх експлуатації.

У методології МАГАТЕ «Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems» (TECDOC IAEA 1575) наведено системний підхід до критеріального аналізу розвитку ядерної енергетики та ЯПЦ, але застосування методології МАГАТЕ проекту INPRO не передбачає виконання прогнозової оцінки та не включає формалізованого алгоритму порівняльної оцінки різних ЯПЦ з пошуком раціонального рішення у довгостроковій перспективі. Також, для повноцінного аналізу ЯПЦ (особливо при розгляді інноваційних технологій) деякі індикатори можуть бути недоступними або можуть мати значну ступінь невизначеності (у тому числі, приймати якісні значення), що суттєво обмежує сферу застосування отриманих результатів.

Окремо слід акцентувати увагу на тому факті, що розробка моделей ЯПЦ проводиться з використанням незмінних у часі параметрів об'єкту дослідження як первинної інформації. Співставлення ретроспективних та фактичних даних з розвитку ЯПЦ показує їх суттєве розходження, що потребуватиме відповідного врахування з метою підвищення адекватності прогнозного моделювання. Одним зі шляхів являється використання методу ковзного середнього.

Для врахування впливу можливої невизначеності початкових вхідних даних на кінцевий результат розрахунку застосовується метод аналізу чутливості відгуку результатів розрахунків ЯПЦ на рівномірну зміну ($\pm M, \%$)

вхідного параметра у бік збільшення та зменшення. Показано, що застосування даного методу має недоліки у частині поганої кореляції з фактичними даними.

Таким чином, ідентифіковано наступні недоліки наявних методів та засобів моделювання ЯПЦ, а саме:

- сучасні методи засновані на розгляді відкритого ЯПЦ, що не дає можливості проводити аналіз частково-замкненого та замкненого ЯПЦ;
- для підготовки первинної інформації застосовуються незмінні у часі характеристики, що призводить до проблеми забезпечення адекватності моделей ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання;
- відсутній математичний метод агрегації результатів багатокритеріальної порівняльної оцінки ЯПЦ, який дозволяє використовувати різнофізичні критерії оцінки з метою забезпечення інтерпретації результатів прогнозного моделювання;
- відсутній математичний підхід до застосування аналізу чутливості результатів моделювання ЯПЦ на основі варіативності вхідного параметру для врахування змінності у часі техніко-економічних параметрів ЯПЦ та забезпечення адекватності моделі ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання.

Тому актуальною науковою та практичною задачею, що потребує вирішення, є удосконалення методів організації процесу прогнозного моделювання ЯПЦ за рахунок застосування аналізу трендів до підготовки первинної інформації, розробки відповідних математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, а також дослідження моделей у різних режимах їх функціонування та інтерпретації результатів моделювання.

У другому розділі запропоновано математичну модель розподілу потоків ядерного матеріалу для різних ЯПЦ, наведено метод формування ключових індикаторів (КІ) порівняльної оцінки ЯПЦ, запропоновано математичний метод багатокритеріальної оцінки ЯПЦ за множиною ключових індикаторів (КІ), запропоновано метод застосування часових трендів для аналізу первинної інформації та метод аналізу чутливості моделі ЯПЦ по вхідним даним для цілей прогновної оцінки ЯПЦ.

Показано, що основні обмеження, які враховуються при рішенні системи лінійних рівнянь, включають баланс видобування, експорту та імпорту паливних ресурсів, баланс потужностей виробництва електроенергії, баланс використання паливних ресурсів. Потік ядерних матеріалів у відкритому ЯПЦ може бути представлено у наступному вигляді:

$$M_f = \frac{(e_p - e_t)}{(0.711\% - e_t)} \cdot M_p \quad (2)$$

де M_f – маса природного урану, що потрібна для виробництва маси M_p збагаченого урану.

Врахування балансу паливного матеріалу у відкритому ЯПЦ забезпечується відповідністю кількості палива, що завантажується у активну зону енергоблоків АЕС, до палива, що отримано з використанням природного

урану як початкового ресурсу:

$$M = M_p, \quad M_p = \frac{N_e \cdot \varphi \cdot 365}{\eta \cdot B_d} \quad (3)$$

де N_e – потужність енергоблоку АЕС (електрична), B_d – середнє вигорання ядерного палива, φ – коефіцієнт використання встановленої потужності, η – коефіцієнт корисної дії енергоблоку.

Запропоноване удосконалення математичної моделі відкритого ЯПЦ з метою врахування інноваційних паливних циклів проведено виходячи з визначень частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, що передбачають у якості початкового паливного ресурсу використання урану та плутонію, які отримано після переробки ВЯП АЕС. Обмеження балансу потоку ядерного матеріалу включає наступні положення:

$$SWU \geq 0 \quad (4)$$

$$M_p \geq M_{Pu} + M_{RU} \quad (5)$$

де SWU - кількість одиниць роботи розділення (ОРР), що необхідно витратити для отримання M_p збагаченого урану,

$$M_{RU} = (1 - f_R) \cdot (x_{U235} + x_{U236} + x_{U238}) \quad (6)$$

$$M_{Pu} = (1 - f_R) \times (x_{Pu238} + x_{Pu239} + x_{Pu240} + x_{Pu242} + x_{Pu241} \cdot \exp(-\lambda_{Pu241} \cdot t_R)) \quad (7)$$

відповідно маса урану та плутонію після переробки відпрацьованого ядерного палива. Враховано, обмеження щодо використання плутонію у частково-замкненому ЯПЦ та урану у замкненому ЯПЦ. На підставі цього, обґрунтовано підхід до коректного моделювання варіантів ЯПЦ з застосуванням програмного засобу MESSAGE.

Запропоновано загальний метод формування КІ та проведено формування переліку КІ для цілей прогновної оцінки ЯПЦ, якій включає оперування кількісними (не якісними) показниками, проведення оцінки ЯПЦ при фіксованій кількості вхідних даних, врахування «непрямих» критеріїв оцінки типів реакторних технологій, що застосовуються в ЯПЦ, включення параметрів стійкості ЯПЦ відповідно до методологічних рекомендацій МАГАТЕ. Перелік КІ для цілей прогновної порівняльної оцінки варіантів конфігурацій ЯПЦ наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 - Ключові індикатори для порівняльної оцінки ЯПЦ

№	Критерій	Одиниця вимірювання	Оцінка
1.	Середня кількість виробленої енергії на одиницю маси природного урану	МВт×рік/т(ВМ)	Більш високе значення відповідає кращому показнику
2.	Споживання природного урану	т(ВМ)/МВт×рік	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
3.	Маса ВЯП що накопичується за рік на одиницю виробленої енергії	т(ВМ)/МВт×рік	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
4.	Обсяг накопичення ВЯП	т(ВМ)	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
5.	Обсяг накопичення урану (U) після переробки ВЯП	т(ВМ)	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
6.	Обсяг накопичення плутонію (Pu) після переробки ВЯП	т(ВМ)	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
7.	Обсяг накопичення високо-активних відходів (ВАО) після переробки ВЯП	т(ВМ)	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
8.	Обсяг напрацювання мінорних актинидів (МА)	кг(ВМ)	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
9.	Потужності із збагачення U на одиницю виробленої енергії	ОРР/МВт×рік	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
10.	Потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії	т(ВМ)/МВт×рік	Більш низьке значення відповідає кращому показнику
11.	Вартість виробництва електроенергії	долл.США/кВт×г	Більш низьке значення відповідає кращому показнику

Наведені у таблиці 1 ключові індикатори оцінки ЯПЦ можливо отримати з використанням розрахункових засобів, що виключає вплив експертного судження та тим самим підвищує адекватність отриманих результатів.

Враховуючи різнофізичність значень КІ порівняльної оцінки ЯПЦ, запропоновано метод їх агрегування результатів, якій включає:

- представлення матриці «розмірних» параметрів для оцінки критерію

$$[P_{i,j}] = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,j} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i,1} & P_{i,j} & \dots & P_{i,j} \end{bmatrix} \quad (9)$$

де $P_{i,j}$ – параметр i в сценарії j ;

- перехід від розмірних величин до безрозмірних коефіцієнтів (індексів) за допомогою перетворення:

$$I_{i,j} = \begin{cases} \frac{P_i^{max} - P_{i,j}}{P_i^{max} - P_i^{min}}, \text{ якщо } P_i^{max} \text{ є «гіршим» значенням в наборі параметрів з критерію } i \\ \frac{P_{i,j} - P_i^{min}}{P_i^{max} - P_i^{min}}, \text{ якщо } P_i^{min} \text{ є «гіршим» значенням в наборі параметрів з критерію } i \end{cases} \quad (10)$$

де $I_{i,j}$ – коефіцієнт (індекс) параметра i в сценарії j ,

$$P_i^{max} = \max(P_{i,j}), \text{ для критерію } i, \text{ де } i = 1 \dots n,$$

$$P_i^{min} = \min(P_{i,j}), \text{ для критерію } i, \text{ де } i = 1 \dots n.$$

- проведення розрахунків безрозмірних індикаторів $I_{i,j}$ для кожного з варіантів ЯПЦ (j визначатиме рейтинг сценарію):

$$R_j = \sum_{i=1}^n I_{i,j} \quad (11)$$

Запропоновано до використання метод трендів з аналізу первинної інформації для прогнозного моделювання з метою врахування зміни у часі техніко-економічних параметрів складових технологій ЯПЦ. Метод дозволяє забезпечити адекватність прогнозного моделювання в умовах відсутності верифікованих даних зі складових елементів ЯПЦ, їх змінності (часової, ринкової) та невизначеності джерел наявної інформації. Загальний метод до формування переліку первинної інформації наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 - Формування первинної інформації з застосуванням аналізу трендів

Статус технології ЯЕС	Джерело даних	Економічні параметри	Технічні параметри
Промислові	Масив даних проектувальника База експлуатаційних даних (національні, світові) Інформація МАГАТЕ, OECD, DOE, інш.	Економічні (вартісні) параметри: $\frac{1}{2} S_{max} < S_i \leq S_{max}$, якщо $S_i \rightarrow S_{max}$ $S_i = S_{min}$, якщо $S_i \rightarrow min$ де $S_i = \frac{1}{n} \sum_j S_{ij}$ Економічні (експлуатаційні) параметри $E_i = E_{min}$, якщо $E_i \rightarrow min$ $E_i = E_{max}$, якщо $E_i \rightarrow max$	$N_i = N_{max}$, якщо $N_i \rightarrow N_{max}$ $N_i = N_{min}$, якщо $N_i \rightarrow N_{min}$
Інноваційні	Масив даних проектувальника Інформація МАГАТЕ, OECD, DOE, інш.	$K_i = \frac{1}{n} \sum K_i$	$N_i = \frac{1}{n} \sum N_i$

Запропоновано метод аналізу чутливості для цілей прогнозного моделювання, якій включає:

- визначення КІ оцінки виходячи з цілей аналізу розвитку енергетичної системи;
- визначення стійкого тренду зміни вхідного параметру N_j ;
- визначення граничних умов зміни вихідного параметру: $[N_j - K; N_j + L]$ (%), де

$$K \geq L \text{ у разі } N_j \rightarrow N_{j \text{ min}},$$

$$K \leq L \text{ у разі } N_j \rightarrow N_{j \text{ max}},$$

- врахування рівнозначності вагових функцій КІ.

При проведенні аналізу чутливості для цілей прогнозу оцінки ЯПЦ на вході подається інформація з вартості свіжого урану, виготовлення ядерного палива, зберігання ВЯП у сухому сховищі, переробки ВЯП, захоронення ВЯП, транспортування ВЯП, зберігання продуктів переробки ВЯП (U, Pu) та технічні параметри ЯПЦ (приведене споживання природного урану на одиницю електроенергії, що виробляється, коефіцієнт корисної дії енергоблоку АЕС, та інш.). Як результат отримуємо залежність приведеної ціни електроенергії для кожного з ЯПЦ від зміни вхідного параметру.

У третьому розділі запропоновано метод врахування зв'язків між складовими елементами при побудові прогнозу моделі ЯПЦ, наведено алгоритм побудови комп'ютерних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, формування яких можливо здійснити в середовищі програмного засобу MESSAGE. Наведено приклади побудови комп'ютерних моделей ЯПЦ України.

Запропоновано підхід до розроблення розрахункових схем ЯПЦ та алгоритм побудови комп'ютерних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ з орієнтацією на середовище програмного засобу MESSAGE. Надано інформацію щодо наближень та обмежень, необхідних для врахування при побудові відповідних комп'ютерних моделей ЯПЦ з використанням MESSAGE.

Для коректного опису організаційно-технічної схеми ЯПЦ необхідним є отримання з використанням математичних співвідношень відповідних значень, що характеризують потоки ядерних матеріалів для кожного з типів ЯПЦ, виконати опис взаємозв'язків між елементами розрахункової схеми у термінах програмного засобу MESSAGE та перевести у розмірності MESSAGE наявну початкову інформацію. Запропонований алгоритм включає підготовку первинної інформації, опис особливостей моделювання всіх елементів ЯПЦ та рекомендації щодо врахування потоків урану та плутонію між елементами розрахункової схеми.

Одним з ключових елементів моделі являється енергоблок АЕС, тип та техніко-економічні параметри якого відрізняються для кожного з варіантів побудови ЯПЦ. Приклад опису енергоблоку АЕС як одного з вагомих елементів розрахункової схеми ЯПЦ у середовищі програмного засобу MESSAGE наведено на рисунку 1.

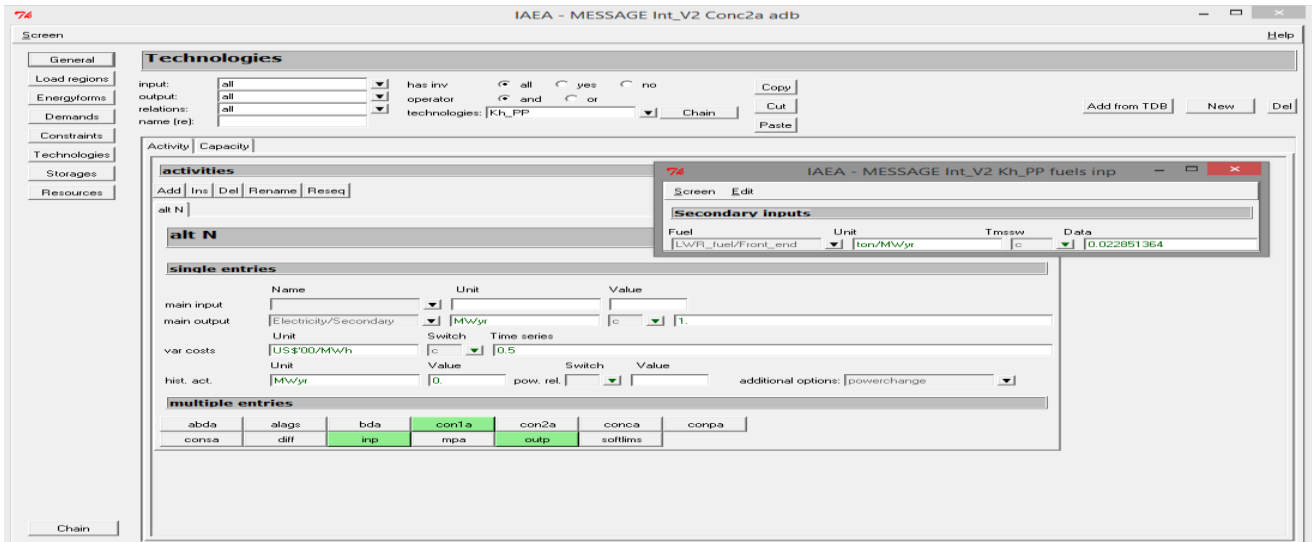


Рисунок 1 - Приклад опису енергоблоку АЕС у розрахунковій схемі ЯПЦ у середовищі програмного засобу MESSAGE

На вхід кожної моделі подається інформація щодо встановленої потужності енергоблоків АЕС, їх техніко-економічних параметрів (КВВП, КПД, ізотопний склад та загальну масу свіжого ядерного палива (ЯП), максимальне середнє значення досягнутого вигорання ЯП, обмеження щодо використання запасів природного урану). На виході кожної моделі отримуємо обсяги накопичення ВЯП, обсяги споживання природного урану (у тому числі, при у разі повторного використання урану та плутонію), обсяги накопичення урану та плутонію, який отримується як результат переробки ВЯП, тощо). З застосуванням запропонованого алгоритму у середовищі програмного засобу MESSAGE розроблено комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, які реалізовано на прикладі ядерної енергетики України. Загальні комп'ютерні моделі ЯПЦ, які розроблено у рамках дослідження, наведено на рисунку 2.

Врахування у моделі відповідної технології енергоблоку АЕС з описом параметрів «Постійні витрати», «Змінні витрати», об'ємів щорічного споживання (inp) та перевантаження ядерного палива (outp), дозволяє мінімізувати невизначеності опису потоку ядерного матеріалу як вхідного параметру кінцевої стадії ЯПЦ. Співвідношення об'ємів споживання ядерного палива до його вивантаження визначається як $inp/outp = M_{щорічне} / (КВВП \times W(e))$, де $M_{щорічне}$ – щорічне перевантаження ЯП (т(ВМ)), $W(e)$ – номінальна електрична потужність енергоблоку АЕС (МВт), КВВП – коефіцієнт використання встановленої потужності (%).

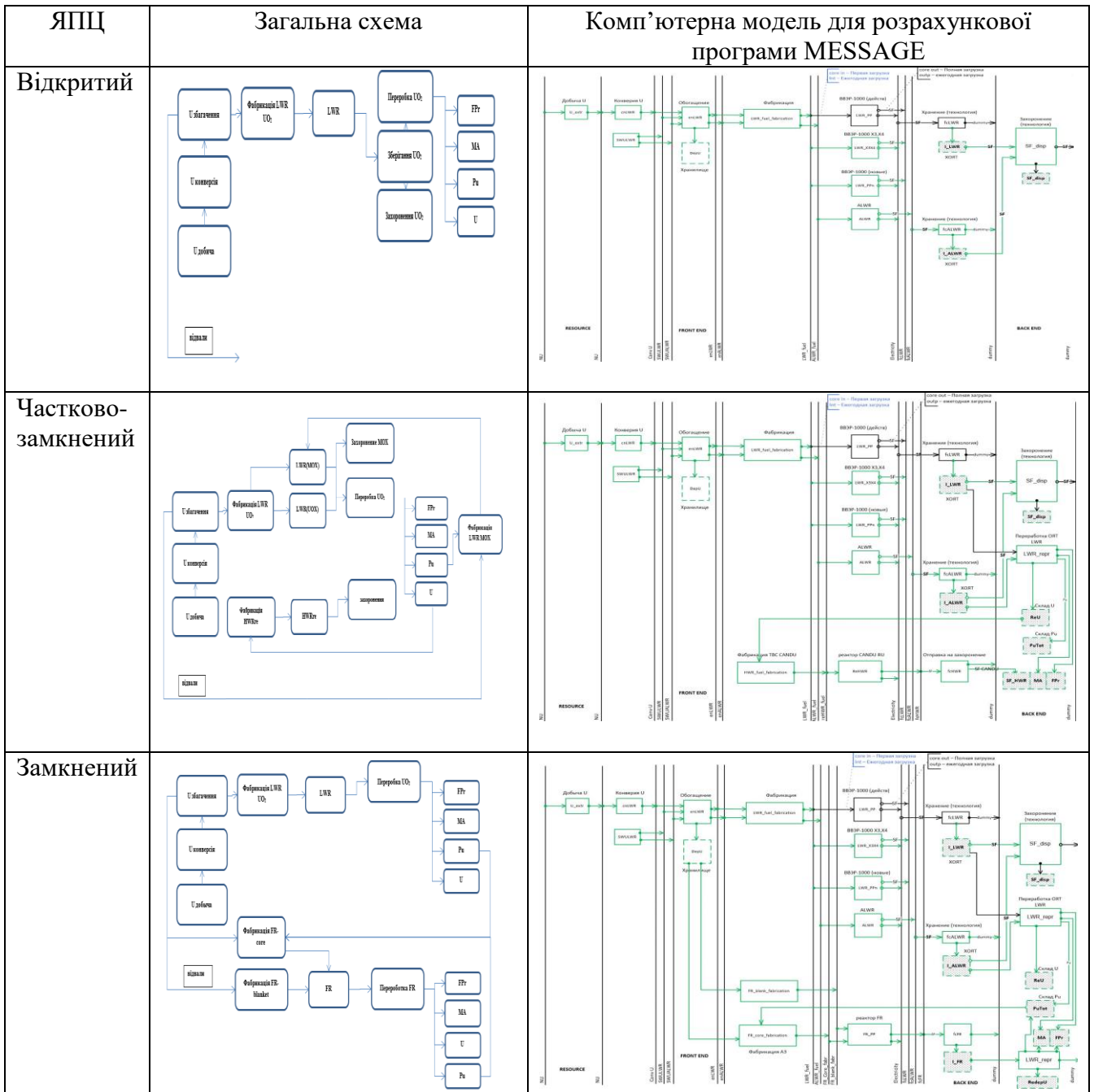


Рисунок 2 - Комп'ютерні моделі відкритого, частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для програмного засобу MESSAGE (розроблено автором)

У розділі 4 наведено результат апробації інструментарію прогнозного моделювання з використанням аналізу часових трендів до оцінки напрямків розвитку ЯПЦ України у довгостроковій перспективі та порівняння результатів моделювання з поточним світовим досвідом розвитку ЯПЦ.

Структурну схему загальної методики апробації комп'ютерних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ схематично наведено на рисунку 3. Приймаючи до уваги вплив вартості будівництва на приведену вартість виробництва електроенергії для кожного з варіантів конфігурацій ЯПЦ,

перевірку адекватності обраних варіантів ЯПЦ проведено за економічним індикатором з використанням розрахункової програми MAGATE NEST.

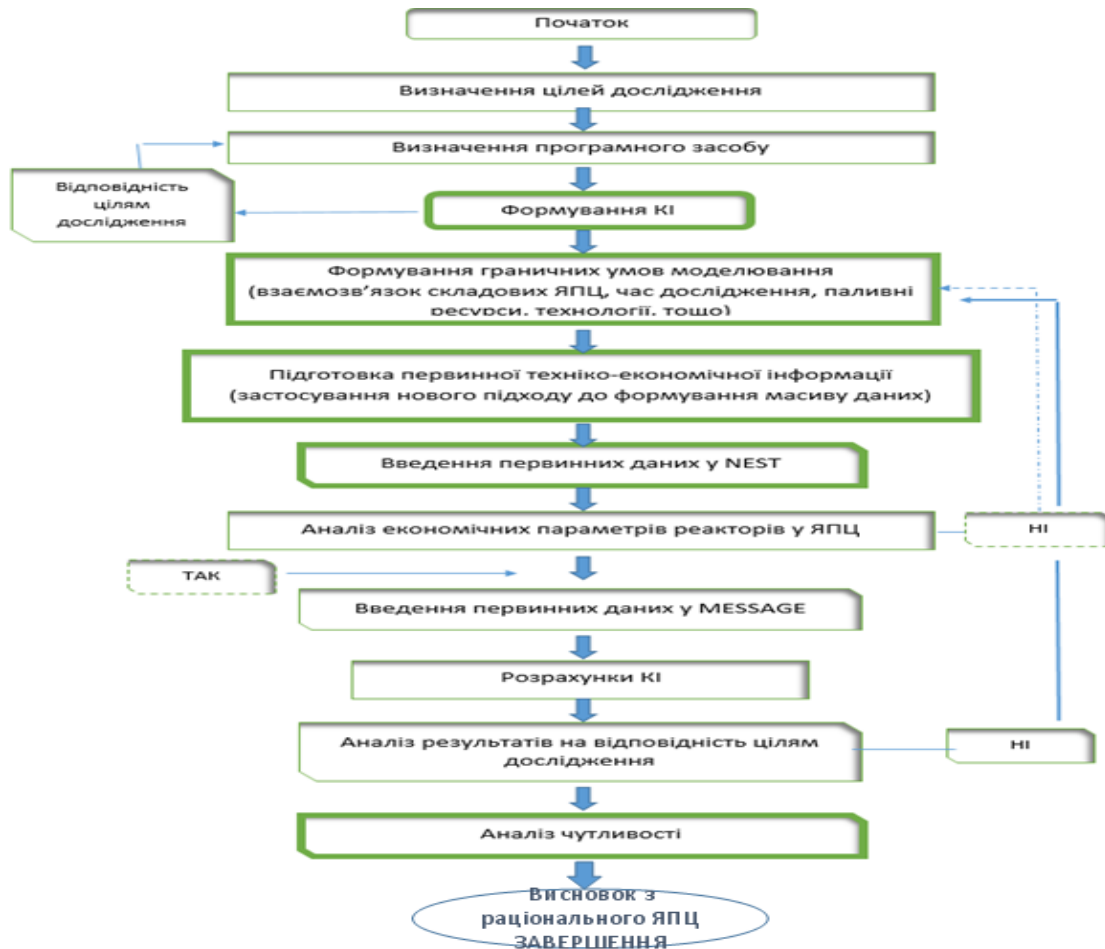


Рисунок 3 - Структурна схема методики апробації комп'ютерних моделей ЯПЦ для програмного засобу MESSAGE (розроблено автором)

Апробацію проведено на прикладі порівняльного аналізу довгострокових сценаріїв розвитку ЯПЦ України, якій проведено з застосуванням комп'ютерних моделей для отримання значень критеріїв КІ. Результати прогнозного моделювання на прикладі побудови частково-замкненого та замкненого ЯПЦ України на довгостроковий період наведено на рисунку 4.

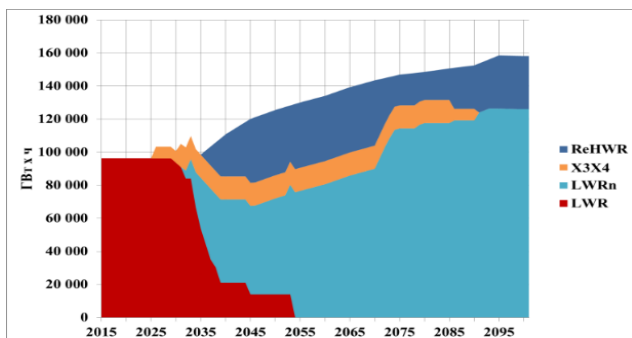


Рисунок 4 (а) - Структура генерації електроенергії для частково-замкненого ЯПЦ

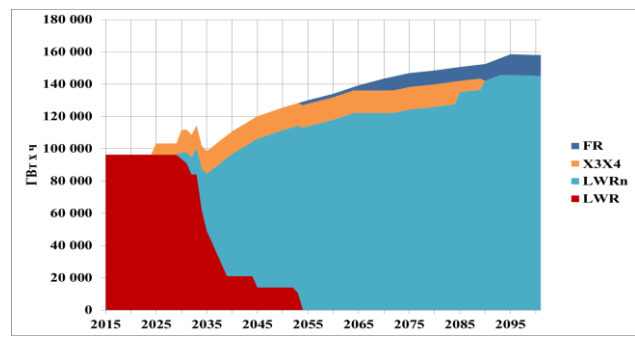


Рисунок 4 (б) - Структура генерації електроенергії для замкненого ЯПЦ

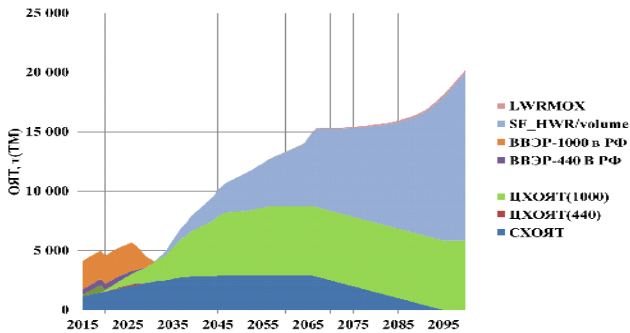


Рисунок 4 (в) - Об'єм накопичення ВЯП для частково-замкненого ЯПЦ

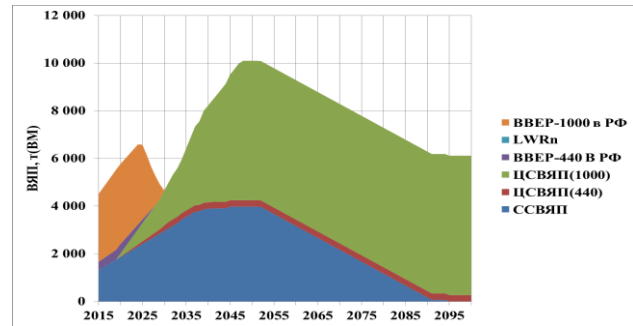


Рисунок 4 (г) - Об'єм накопичення ВЯП для замкненого ЯПЦ

Рисунок 4 - Результати розрахунків ЯПЦ з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE

Результати моделювання ЯПЦ України та отримані розрахункові значення вартості виробництва електроенергії для різних ЯПЦ (Levelized Cost of Electricity (LCOE)) наведено у Таблиці. 3.

Таблиця 3. Прогнозні значення LCOE долл.США/МВт для ЯПЦ України

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	24,30	25,34	25,38	25,37
З переробкою ВЯП	21,49	25,91	28,37	29,79	29,75	29,72

Верифікацію моделі ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання виконано з застосуванням комп'ютерної програми MAGATE ROADMAPS_ET (ROADMAPS-Excel Tool (ET)) за результатами аналізу об'ємів накопичення ВЯП на довгострокову перспективу за умов реалізації в Україні варіанту відкритого ЯПЦ. Оцінено потреби у послугах з ядерно-паливного циклу, у тому числі, в урані, його збагаченні з урахуванням диверсифікації постачальників ядерного палива, а також потреби у зберіганні відпрацьованого ядерного палива та послугах з його переробки. Результати прогнозних розрахунків об'ємів накопичення ВЯП та потреб у об'ємах сховищ ВЯП наведено на рисунку 5. Показано кореляцію отриманих результатів з результатами розрахунків з використанням комп'ютерних моделей відкритого ЯПЦ для програмного засобу MESSAGE.

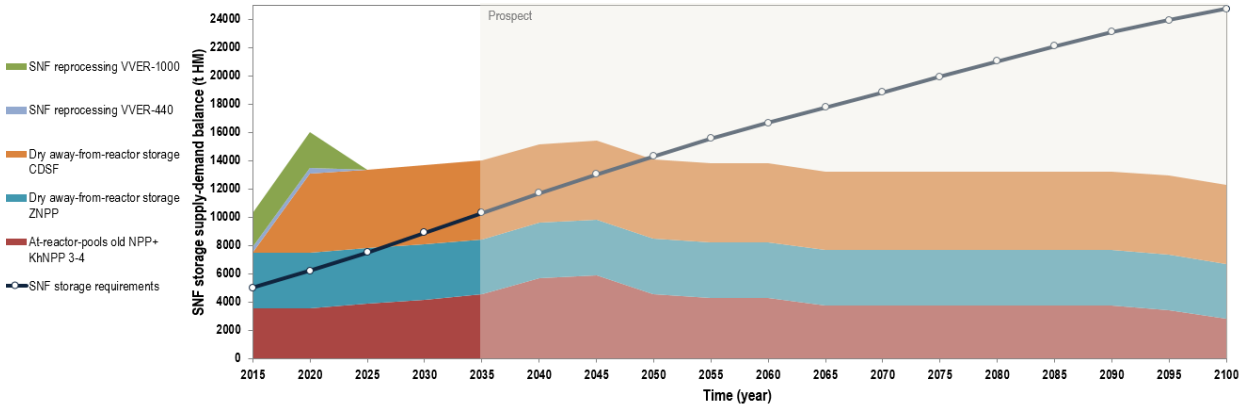


Рисунок 5 - Прогноз з накопичення ВЯП для варіанту відкритого ЯПЦ

Наведено результати застосування кількісної багатокритеріальної інтегральної порівняльної оцінки варіантів конфігурацій ЯПЦ для підвищення ступеню обґрунтованості рішень та проведено його верифікацію. Результати порівняльної оцінки раціонального варіанту кінцевого поводження з ВЯП наведено на Рисунок 6.

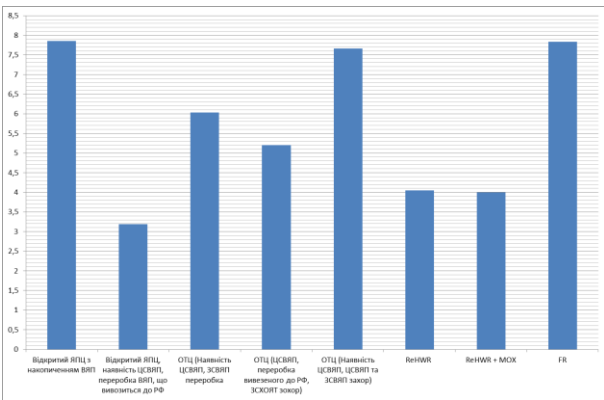


Рисунок 6 (а) - Результат бальної оцінки короткострокових варіантів ЯПЦ до 2035 року

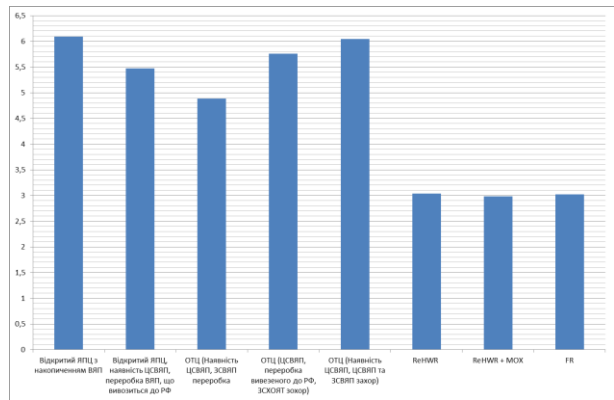


Рисунок 6 (б) - Результат бальної оцінки довгострокових варіантів ЯПЦ до 2100 року

Рисунок 6 - Результати порівняльної оцінки раціонального варіанту кінцевого поводження з ВЯП

Проведено апробацію запропонованого підходу з аналізу чутливості для цілей прогнозного моделювання на прикладі оцінки зміни приведеної вартості виробництва електроенергії (LCOE), яка є цільовим параметром обчислення витрат генерації та визначається як фінансові витрати на одиницю виробленої електроенергії, до зміни з використанням аналізу трендів вхідних параметрів розрахунків. Результати застосування запропонованого до використання методу аналізу чутливості, заснованого на аналізі трендів, наведено на рисунку 7.

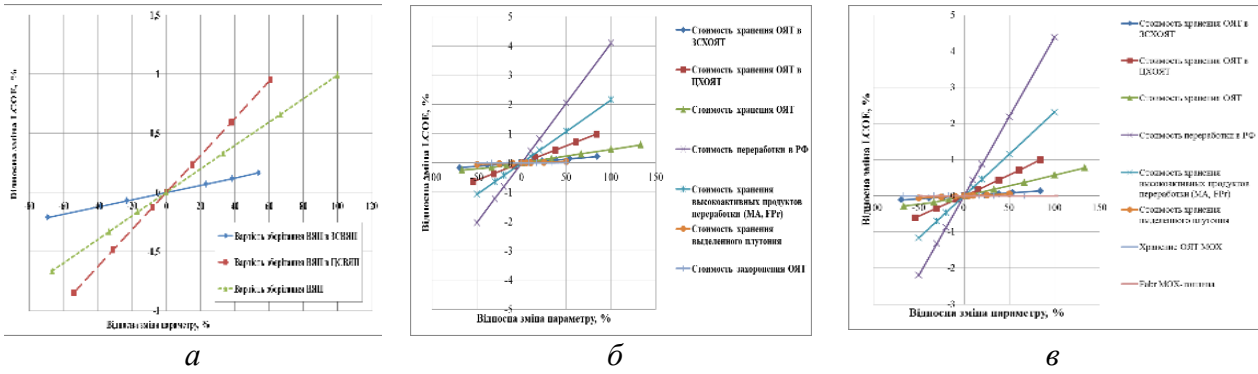


Рисунок 7 - Результати аналізу LCOE: а — ЯПЦ з накопиченням ВЯП; б — ЯПЦ з захороненням ВЯП у ГФ; в — ЯПЦ з переробкою ВЯП та повторним використанням ядерного матеріалу

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).

Результати порівняльної оцінки долі АЕС у виробництві електроенергії при врахуванні/неврахуванні впливу додаткових факторів, супутніх до виробництва електроенергії («Externalities»), наведено на рисунку 8.

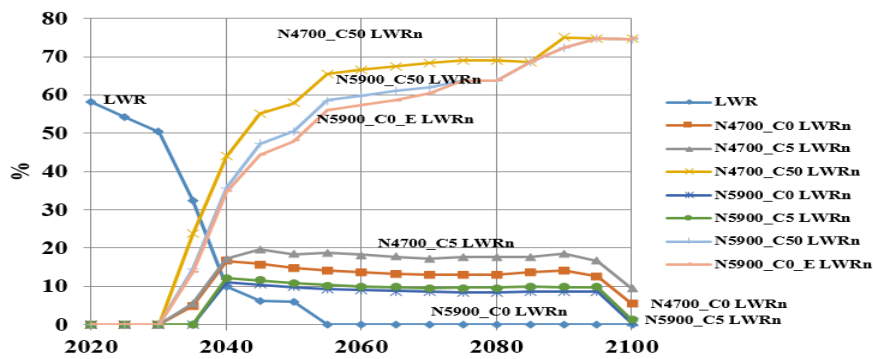


Рисунок 8 - Доля АЕС у виробництві електроенергії в Україні для різної вартості будівництва АЕС та значень податку на викиди CO₂ та “externalities” (сценарій N5900_C0_E LWRn)

Проведено порівняння отриманих результатів прогнозування розвитку ЯПЦ з вибором рішення щодо кінцевого поведіння з ВЯП АЕС України з аналогічним світовим досвідом. Отримані у рамках дисертаційної роботи результати підтверджують коректність запропонованого до використання методу прогнозного моделювання на основі аналізу трендів та розроблених комп’ютерних моделей ЯПЦ для середовища програмного засобу MESSAGE.

Адекватність моделей ЯПЦ підтверджується світовим досвідом розвитку ЯПЦ та прийнятими рішеннями Міністерством енергетики та захисту довкілля України та ДП «НАЕК «Енергоатом» у частині поводження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС України.

У **висновках** сформульовані основні результати дисертації.

У **додатках** наведені окремі результати розрахунків та акти, що підтверджують практичне використання результатів дисертаційної роботи у ДП «НАЕК «Енергоатом» та Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного Наукового Центру «Харківський фізико-технологічний інститут» НАН України.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу удосконалення методів організації процесу прогнозного моделювання ЯПЦ за рахунок застосування аналізу трендів до підготовки первинної інформації, розробки відповідних математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, а також дослідження моделей у різних режимах їх функціонування для інтерпретації результатів моделювання.

Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та отримані автором нові науково обґрунтовані результати, які у цілому визначають методологічну основу для забезпечення коректності прогнозних досліджень подальшого розвитку ЯПЦ. Отримані з використанням середовища розрахункового комп'ютерного програмного засобу МАГATE MESSAGE результати обґрунтовують прийняті на рівні України рішення щодо поводження з ВЯП АЕС на кінцевій фазі ЯПЦ, визначають умови оптимізації фінансових витрат держави на розвиток промислової інфраструктури з поводження з ВЯП та цінними продуктами його переробки.

За результатами виконаної дисертаційної роботи можна сформулювати наступні висновки:

1. Вперше визначено недоліки існуючих моделей, методів та засобів математичного моделювання ЯПЦ, та виявлено обмежені можливості їх використання для створення методологічних засад побудови математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для завдань прогнозного моделювання, а також дослідження моделей ЯПЦ у різних режимах функціонування та оцінювання результатів такого моделювання. Це дало можливість створити методологічні засади для побудови математичних моделей частково-замкненого та замкненого варіантів ЯПЦ для завдань прогнозного моделювання, а також провести дослідження моделей у різних режимах їх функціонування для інтерпретації результатів моделювання.

2. Удосконалено математичну модель відкритого ЯПЦ за рахунок опису взаємозв'язків у потоках ядерних матеріалів та врахування додаткових складових елементів, що дало можливості розгляду відмінних від відкритого ЯПЦ схем реалізації організаційно-технічної структури ЯПЦ. Вперше

запропоновано до використання математичні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання.

3. Отримав подальшого розвитку метод аналізу первинної інформації, що враховує часові тренди зміни техніко-економічних показників відповідних технологічних процесів, що дозволяє розглядати ЯПЦ як динамічну систему та забезпечити відповідність цілям прогнозного моделювання. Метод дозволяє врахувати змінні властивості техніко-економічних показників відповідних технологічних процесів для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ.

4. Вперше запропоновано метод порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком КІ, що дозволяє виконати багатокритеріальну інтегральну порівняльну оцінку ЯПЦ на відміну від підходу до порівняння варіантів ЯПЦ за одним обраним критерієм. Метод дозволяє проводити оцінку за множиною обраних критеріїв, що дозволяє порівнювати ЯПЦ з різними технологічними характеристиками. Проведено верифікацію методу на основі порівняння з даними МАГАТЕ.

5. Вперше запропоновано метод аналізу чутливості моделі ЯПЦ по визначеній множині даних з метою обґрунтування техніко-економічних показників ЯПЦ, що дозволяє врахувати змінність у часі техніко-економічних параметрів ЯПЦ та забезпечити адекватність моделі ЯПЦ при прогнозованому моделюванні.

6. На базі описаних методологічних принципів вперше розроблено комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ України, з застосуванням яких виконано прогнозного моделювання та порівняльну оцінку варіантів ЯПЦ на довгострокову перспективу. Вперше запропоновано раціональний варіант кінцевого поводження з ВЯП АЕС України.

Результати роботи знайшли застосування при реалізації участі ДП «НАЕК «Енергоатом» у проектах МАГАТЕ INPRO та при розробці Концепції Державної економічної програми поводження з відпрацьованим ядерним паливом вітчизняних атомних електростанцій на період до 2024 року (затвердженої Розпорядженням КМУ від 5 червня 2019 р. №385-р).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Годун О.В. Оценка сценариев развития ядерной генерации Украины после 2030 года / Н. И. Власенко, О. В. Годун, В. Н. Кирьянчук // Ядерна та радіаційна безпека. - 2014. - Вип. 1. - С. 8-13. (НДБД *Scopus*, *INIS*)

2. Годун О.В. Сравнительная оценка инновационных вариантов открытого ядерно-топливного цикла в Украине / Н.И. Власенко, О.В. Годун, В.Н. Кирьянчук // Ядерна та радіаційна безпека. - 2014. - № 3. - С. 10-13. (НДБД *Scopus*, *INIS*)

3. Годун О.В. Анализ обновленных сценариев развития атомной энергетики Украины до 2100 года / Н.И. Власенко, О.В. Годун, В.Н. Кирьянчук, Д.В. Пышная // Ядерна енергетика та довкілля. - 2016. - № 2 (8) - С. 15-22.

4. Годун О.В. Предложения по формированию критериев выбора проектов новых энергоблоков АЭС Украины / Н.И. Власенко, О.В. Годун,

В.Я. Шендерович // Ядерна та радіаційна безпека. - 2017. - № 1. - С. 10-15. (НДБД *Scopus, INIS*)

5. Годун О.В. Применение кода NEST для сравнительной экономической оценки энергетических систем / Ю.Г. Куцан, О.В. Годун, В.Н. Кир'янчук // Електронне моделювання. - 2018. - Т. 40, № 5. - С. 111-118. (НДБД *Index Copernicus International, CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar*)

6. Годун О.В. Альтернативна оцінка розвитку ядерної енергетики з моделюванням ОЕС України кодом МАГАТЕ MESSAGE / Ю.Г. Куцан, О.В. Годун, В.М. Кир'янчук // Моделювання та інформаційні технології. - 2018. - Вип. 82. - С. 12-19. (НДБД *Google Scholar*)

7. Годун О.В. Аналіз чутливості порівняльної оцінки варіантів ядерно-паливних циклів України / Ю.Г. Куцан, О.В. Годун, В.М. Кир'янчук // Електронне моделювання. - 2019. - Т. 41, № 3. - С. 81-92. (НДБД *Index Copernicus International, CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar*)

8. Годун О.В. Розробка дорожньої карти розвитку ядерної енергетичної системи України / Ю.Г. Куцан, О.В. Годун // Моделювання та інформаційні технології. - 2018. - Вип. 85. - С. 27-34. (НДБД *Google Scholar*)

9. Годун О.В. Розрахункова модель визначення раціональних конфігурацій інноваційних ядерно-паливних циклів / О.В. Годун // Електронне моделювання. - 2019. - Т. 41, № 4. - С. 103-114. (НДБД *Index Copernicus International, CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar*)

10. Годун О.В. Аналіз чутливості порівняльної оцінки варіантів ядерно-паливних циклів України. Зб. тез XXXVII науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, 15 травня 2019 р. / ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2019. – 100 с.

11. Годун О.В. Оценка развития атомной энергетики Украины на долгосрочную перспективу. Зб. Тез. XX Міжнародної конференції з фізики радіаційних явищ та радіаційного матеріалознавства (10 – 15 вересня 2012, м. Алушта, Україна) / ННЦ ХФТІ НАН України. – 2012. – 437 с.

12. Lessons Learned from Nuclear Energy System Assessments (NESA) Using the INPRO Methodology. A Report of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). — Vienna: IAEA, 2009. IAEA-TECDOC-1636. (ISBN:978-92-0-112509-5). 164 pp.

13. Nuclear energy development in the 21st century: Global scenarios and regional trends. — Vienna : IAEA, 2010. — 79 p. (IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NP-T-1.8)

14. Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability: Final Report of the INPRO Collaborative Project GAINS. — Vienna: IAEA, 2013. — 271 pp. — (IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-1.14).

15. Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project

SYNERGIES. — Vienna: IAEA, 2018. – 341 pp. (IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-4.9).

16. Experience in modeling nuclear energy systems with MESSAGE: Country case studies. – Vienna: IAEA, 2018. IAEA-TECDOC-1837. 280 pp. (ISBN:978-92-0-109417-9).

АНОТАЦІЯ

Годун О.В. Прогнозне моделювання ядерно-паливних циклів на основі аналізу трендів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Київ, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено актуальній проблемі створення методологічного підходу з прогнозного моделювання ЯПЦ. Виконано аналіз існуючих методів та засобів математичного моделювання, що дозволило виявити обмеження з їх застосування та відсутність моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання. Встановлено необхідність удосконалення існуючої практики оцінювання результатів моделювання варіантів ЯПЦ, підходів до підготовки первинної інформації, дослідження моделей ЯПЦ у різних режимах їх функціонування та інтерпретації результатів моделювання.

Для розробки методологічного підходу з прогнозного моделювання ЯПЦ удосконалено математичну модель відкритого ЯПЦ за рахунок розширеного опису взаємозв'язків у потоках ядерних матеріалів та врахування додаткових складових елементів. Запропоновано до використання метод формування первинної інформації на основі змінних у часі техніко-економічних параметрів з урахуванням трендів розвитку ЯПЦ.

Для забезпечення адекватності прогнозного моделювання ЯПЦ та інтерпретації результатів оцінювання запропоновано метод багатокритеріальної порівняльної оцінки варіантів ЯПЦ та метод проведення аналізу чутливості результатів моделювання ЯПЦ на основі варіативності вхідного параметру з застосуванням аналізу трендів.

Розроблено комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого варіантів конфігурацій ЯПЦ України, з застосуванням яких виконано прогнозного моделювання та порівняльну оцінку варіантів ЯПЦ на довгострокову перспективу. Вперше запропоновано раціональний варіант кінцевого поводження з ВЯП АЕС України у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: прогнозне моделювання, ядерно-паливний цикл, багатокритеріальна оцінка, аналіз чутливості, відпрацьоване ядерне паливо, аналіз трендів.

АННОТАЦИЯ

Годун О.В. Прогнозное моделирование ядерно-топливных циклов на основе анализа трендов. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - математическое моделирование и вычислительные методы. - Институт проблем моделирования в энергетике им. Е. Пухова НАН Украины, Киев, 2020.

Диссертационная работа посвящена актуальной проблеме создания методологического подхода из прогнозного моделирования ЯТЦ. Выполнен анализ существующих методов и средств математического моделирования, что позволило выявить ограничения по их применению и отсутствие моделей частично-замкнутого и замкнутого ЯТЦ для целей прогнозного моделирования. Установлена необходимость совершенствования существующей практики оценки результатов моделирования вариантов ЯТЦ, подходов к подготовке первичной информации, исследования моделей ЯТЦ в различных режимах их функционирования и интерпретации результатов моделирования.

Для разработки методологического подхода прогнозного моделирования ЯТЦ усовершенствована математическая модель открытого ЯТЦ за счет расширенного описания взаимосвязей в потоках ядерных материалов и учета дополнительных составляющих элементов. На основе анализа трендов изменяющихся во времени технико-экономических параметров ЯТЦ предложен метод формирования первичной информации.

Для обеспечения адекватности прогнозного моделирования ЯТЦ и интерпретации результатов оценки предложен метод многокритериальной сравнительной оценки вариантов ЯТЦ и метод анализа чувствительности результатов моделирования ЯТЦ на основе вариативности входного параметра.

Разработаны компьютерные модели частично-замкнутого и замкнутого вариантов конфигураций ЯТЦ Украины, с применением которых выполнено прогнозное моделирование и сравнительная оценка вариантов ЯТЦ на долгосрочную перспективу. Впервые предложен рациональный вариант конечного обращения с ОЯТ АЭС Украины в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: прогнозное моделирование, ядерно-топливный цикл, многокритериальная оценка, анализ чувствительности, отработанное ядерное топливо, анализ трендов.

ABSTRACT

Godun O.V. Predictive modeling of nuclear fuel cycles based on trend analysis. – As the manuscript.

Thesis for technical sciences candidate degree by 01.05.02 specialty – mathematical modeling and computational methods. – Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

Thesis is devoted to the actual problem of enhancing of methodological approach from predictive modeling of NFCs. The analysis of existing methods and mathematical modeling is carried out, which made it possible to identify approaches

on their application and the absence of models of partially-closed and closed NFCs for the purposes of predictive modeling. The need for improving the existing practice of assessment the results of modeling NFC options, approaches to preparing primary information, estimation NFC models in various modes of their functioning and interpreting modeling results is established.

To develop a methodological approach for the predictive modeling of NFCs, the mathematical model of an open NFC has been improved due to an expanded description of the relationships in the flows of nuclear materials with taking into account additional components. Based on the analysis of trends in the techno-economic parameters of NFCs that change over time, a method of forming primary information is proposed.

To ensure the adequacy of predictive modeling of NFCs and the interpretation of evaluation results, a multicriteria comparative assessment of NFC options and a method for analyzing the sensitivity of the results of NFC modeling based on the variability of the input parameter are proposed.

Computer models of partially-closed and closed NFC of Ukraine have been developed, with the use of which predictive modeling and a comparative assessment of the NFC options for the long term have been performed. For the first time, a rational option for the final management of spent nuclear fuel for Ukrainian NPP in the long term has been proposed. The data base of technical and economic parameters of the nuclear energy system has been developed and validated. A list of criteria for evaluating options for nuclear fuel cycles based on national interests and the need to ensure the energy security of Ukraine has been formed. Comparative analysis of spent nuclear fuel management options carried out using 11 criteria.

A model roadmap for the development of Ukraine's nuclear power system for the long term to 2100 has been developed. A detailed model map has been developed for commissioning new capacities of Ukrainian NPPs after 2030 for an optimistic scenario (the share of NPPs in electricity production is 50%), with an assessment for the long-term needs of the nuclear fuel cycle, including uranium and its enrichment taking into account the diversification of suppliers of nuclear fuel, as well as the needs for storage of spent nuclear fuel and services for its reprocessing.

Proposals have been developed for an alternative assessment of the development of nuclear generation as a component of the energy system taking into account the risks (externalities) arising from the implementation of various types of electricity generation and represent the average estimated cost of damage to the environment and humans, to predictive estimates of the development of the nuclear energy system.

Keywords: predictive modeling, nuclear fuel cycle, multicriteria assessment, sensitivity analysis, spent nuclear fuel, trend analysis.

Підписано до друку 11.08.2020
Формат 60 x 90 ¹/₁₆. Папір офсетний №2.

Друк трафаретний.
Ум. друк арк. 0,9 арк.

Тираж 100 прим. Замовлення № **296**

Віддруковано в міні-типографії ФОП Марченко В.М.
Дата та номер запису в Єдиному державному реєстрі
юридичних осіб, фізичних осіб-підприємців та громадських
формувань: 16.03.2018, 2 319 000 0000 012145.
02660, м. Київ, вул. Є. Сверстюка, 6.
тел.: (044) 223-29-39, E-mail: 2232939@ukr.net,
www.raz.com.ua