

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

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

ГОДУН Олег Вікторович

УДК 004.942 : 621.039.003

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи
Галузь знань – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ О.В. Годун

Науковий керівник Куцан Юлій Григорович, доктор технічних наук, старший
дослідник

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Годун О.В. Прогнозне моделювання ядерно-паливних циклів на основі аналізу трендів. – Кваліфікаційна наукова праця 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 їх застосування та відсутність моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання. Встановлено необхідність удосконалення існуючої практики оцінювання результатів моделювання 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 часових трендів зміни техніко-економічних параметрів, що характеризують складові елементи ЯПЦ.

Для забезпечення адекватності прогнозного моделювання та інтерпретації результатів оцінювання ЯПЦ запропоновано метод їх порівняльної оцінки за переліком різнофізичних критеріїв та метод аналізу чутливості результатів моделювання ЯПЦ до варіативності вхідного параметру, змына якого оцінюється з застосуванням аналізу трендів.

Розроблено комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ України, на підставі яких виконано прогнозне моделювання та порівняльну оцінку ЯПЦ на довгострокову перспективу з використанням реальних

експлуатаційних даних. Вперше запропоновано раціональний варіант кінцевого поводження з ВЯП АЕС України.

Наукове значення дисертаційної роботи полягає у отриманні наступних результатів:

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 ЯПЦ для завдань прогнозного моделювання, а також виконати дослідження моделей у різних режимах їх функціонування для інтерпретації отриманих результатів.

2. Удосконалено математичну модель опису взаємозв'язків у потоках ядерних матеріалів у ЯПЦ, що дало можливість розгляду відмінних від відкритого ЯПЦ схем побудови організаційно-технічної структури паливного циклу. 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 різнофізичних критеріїв, якій дозволяє виконати розширену оцінку розрахункових результатів застосування комп'ютерної моделі ЯПЦ на відміну від загального підходу з розглядом одного обраного критерію. Метод дозволяє збільшити кількість порівняльних параметрів, що опмисують ЯПЦ з різними

технологічними характеристиками. Проведено верифікацію методу на основі порівняння за 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.

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

Результати роботи знайшли застосування 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).

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

ABSTRACT

Godun O.V. Prognosis modelling 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”. - The Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering, National Academy of Sciences, Ukraine, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the actual problem of enhancing of methodological approach from forecast modelling of NFCs. The analysis of existing methods and mathematical modelling 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 forecast modelling. The needs for improving the existing practice of assessment the results of modelling NFC options, approaches to preparing primary information, estimation NFC models in various modes of their functioning and interpreting modelling results is established.

To develop a methodological approach for the forecast modelling 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 technical and economical parameters of NFCs that change over time, a method of forming primary information is proposed.

The method for analysis of NFC's initial technical and economical parameters was proposed. The NFC considered as dynamical system with variable non-freeze parameters. This is make possible to analyze of NFC with a time changeable parameters for predictive modulation aims. This method better correspond to retrospective information of NFC development. The non-freeze initial technical and economical parameters approaches can be helpful for different non-nuclear energy generating system modelling.

To ensure the adequacy of forecast modelling of NFCs and the interpretation of evaluation results the NFC multicriteria comparative assessment method is developed. Method based on NFC assessment by using quantity different parameters which obtained by developed of NFC models. The method for formulation of criteria for assessment of NFC is justified. Unlike existing practice the multicriteria comparative assessment method allows to exclude the performance of a comparative assessment of NFC only on the basis of the analysis of cost indicators.

Based on trend analysis the method of sensitivity analysis for NFC forecast modelling is proposed. The method allows to take into account the variability in the time of the technical and economic parameters of the NPP and to ensure the adequacy of the NPP model in forecast modelling.

Computer models of partially-closed and closed NFC of Ukraine have been developed, with the use of which forecast modelling 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 block diagram of a general methodology for testing computer models of partially-closed and closed NFC has been developed. Taking into account the impact of NFC elements prices on the generating electricity cost the NFC models adequacy has been verified by an economic indicator using the IAEA NEST calculation program. On the second step the NFC models adequacy tested by comparison of calculating data and world NFC development information.

Additionally the NFC models adequacy for forecast modelling tested by a model roadmap for the development of Ukraine's nuclear power system for the long term to 2100. 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.

The scientific significance of the thesis lies in obtaining the following results:

1. The shortcomings of the existing models, methods and means of mathematical modelling of the nuclear fuel cycles and the limited possibilities of their use for creation of methodological bases for the construction of mathematical models of the partially-

closed and closed nuclear fuel cycles for the problems of forecast modelling were identified for the first time. Also the problems of using of the nuclear fuel cycles models in different modes of functioning are revealed. This made it possible to create methodological foundations for constructing mathematical models of variants of partially-closed and closed nuclear fuel cycle for problems of forecast modelling, as well as to study models in different modes of their functioning and interpretation of simulation results.

2. The mathematical model of open nuclear fuel cycle has been improved by describing the interconnections in the nuclear material flows and taking into account additional constituent elements. This made it possible to consider the schemes of the organizational and technical structure of the nuclear fuel cycle which is different from current open nuclear fuel cycles. For the first time, mathematical models of partially-closed and closed nuclear fuel cycles are proposed for the purposes of forecast modelling.

3. The method of primary information analysis was further developed, taking into account the time trends of changes in the technical and economic indicators of the respective technological processes. This allows to consider of nuclear fuel cycle as a dynamic system and to ensure compliance with the goals of forecast modelling. The method allows to take into account the variable properties of the technical and economic indicators of the respective technological processes for the purposes of forecast modelling of the nuclear fuel cycles.

4. For the first time a method of comparative assessment of nuclear fuel cycles according to the key indicator's list is proposed. This allows to perform multicriteria integral comparative evaluation of NPPs in contrast to the approach to comparison of NPPs by one selected criterion. The method makes it possible to evaluate according to a set of selected criteria, which allows to compare nuclear fuel cycles with different technological characteristics. The method has been verified on the basis of comparison with the IAEA data.

5. For the first time, a sensitivity analysis method of nuclear fuel cycle prognosis model is proposed. Method use the certain set of data in order to substantiate

the feasibility of the nuclear fuel cycles, which allows to take into account the variability in the time initial parameters and to ensure the adequacy of the model in forecast nuclear fuel cycles modelling.

6. The computer models of partially-closed and closed nuclear fuel cycles of Ukraine have been developed for the first time, with the use of which forecast nuclear fuel cycles modelling and comparative evaluation of NPS variants for the long term is performed. For the first time a rational variant of the final management of SNF of the Ukrainian NPP has been proposed.

The results of the work were applied in the IAEA INPRO projects and in the development of the Concept of the state economic program for spent fuel management of national nuclear power plants for the period up to 2024 (approved by Cabinet of Ministry of Ukraine's Ordinance of June 5, 2019 No. 385-p).

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

Список публікацій здобувача

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати 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. Альтернативна оцінка розвитку ядерної енергетики з моделюванням ОЕС України кодом МАГATE MESSAGE / Ю.Г. Куцан,

О.В. Годун, В.М. Кир'янчук // Моделювання та інформаційні технології. - 2018. - Вип. 82. - С. 12-19.

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

6. 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.

Автором розроблено загальний алгоритм формування вхідних техніко-економічних даних складових технологій ядерно-паливних циклів, моделювання ядерної енергетичної системи України

7. 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*)

Автором розроблено та обгрунтовано метод формування критеріїв оцінки проектів РУ нових АЕС щодо взаємозв'язку з ЯПЦ.

8. 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*)

9. 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.

Автором розроблено та обгрунтовано метод аналізу чутливості на основі оцінки трендів зміни у часі техніко-економічних характеристик ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання.

10. 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.

11. 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*)

Автором розроблено та застосовано математичного алгоритму порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком ключових індикаторів для цілей прогнозного моделювання.

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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. — 164 pp. IAEA-TECDOC-1636. (ISBN:978-92-0-112509-5).

13. Nuclear energy development in the 21st century: Global scenarios and regional trends. — Vienna : IAEA, 2010. — 79 pp. (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).

Автором розроблено підходи до побудови прогнозної моделі ЯПЦ, у тому числі України, з використанням програмного засобу MESSAGE

ЗМІСТ

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ | 15 |
| | ВСТУП | 18 |
| РОЗДІЛ 1 | ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЯПЦ. КРИТЕРІЙНА ОЦІНКА. СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ З МОДЕЛЮВАННЯ ЯПЦ | 27 |
| | 1.1 Ядерна енергетика України. Поводження з ВЯП АЕС | 27 |
| | 1.2 Підходи з порівняльної оцінки ЯПЦ | 33 |
| | 1.3 Огляд моделей ЯПЦ | 37 |
| | 1.4 Сучасні програмні засоби з моделювання ЯПЦ | 39 |
| | 1.5 Математичний опис програмного засобу MESSAGE | 46 |
| | 1.6 Застосування аналізу чутливості до розгляду результатів моделювання ЯПЦ | 52 |
| | 1.7 Аналіз трендів | 56 |
| | 1.8 Висновки до Розділу 1 | 58 |
| РОЗДІЛ 2 | БАЛАНС ЯДЕРНОГО МАТЕРІАЛУ У ЯПЦ. МЕТОД КРИТЕРІЙНОЇ ОЦІНКИ ЯПЦ. МЕТОДИ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯПЦ | 60 |
| | 2.1 Визначення балансу ядерного матеріалу у ЯПЦ | 60 |
| | 2.2 Формування ключових індикаторів порівняльної оцінки ЯПЦ | 66 |
| | 2.3 Метод агрегації результатів багатокритеріальної порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком різнофізичних ключових індикаторів | 71 |
| | 2.4 Метод аналізу трендів з формування техніко-економічних початкових даних для розробки комп'ютерних моделей ЯПЦ | 74 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| | | 13 |
| | 2.5 Аналіз чутливості моделі ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання | 78 |
| | 2.6 Висновки до Розділу 2 | 81 |
| РОЗДІЛ 3 | ПОБУДОВА КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ ЧАСТКОВО-ЗАМКНЕНОГО ТА ЗАМКНЕНОГО ЯПЦ | 82 |
| | 3.1 Зв'язок елементів у комп'ютерних моделях ЯПЦ | 82 |
| | 3.2 Комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ України для розрахункової програми MESSAGE | 85 |
| | 3.3 Алгоритм побудови комп'ютерної моделі ЯПЦ у програмному середовищі MESSAGE | 91 |
| | 3.4 Висновки до Розділу 3 | 98 |
| РОЗДІЛ 4 | АПРОБАЦІЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯПЦ З ВИКОРИСТАННЯМ АНАЛІЗУ ТРЕНДІВ | 99 |
| | 4.1 Апробація інструментарію прогнозного моделювання з використанням часового аналізу трендів для розрахункової оцінки ЯПЦ | 99 |
| | 4.1.1 Застосування розрахункової програми NEST для визначення економічних параметрів ЯПЦ | 101 |
| | 4.1.2 Порівняльний аналіз ЯПЦ у довгостроковій перспективі | 102 |
| | 4.1.2.1 Відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП | 104 |
| | 4.1.2.2 Відкритий ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП | 106 |
| | 4.1.2.3 Відкритий ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП, який зберігається у ССВЯП ЗАЕС, після завершення проектного терміну зберігання 50 років, без використання урану та плутонію | 108 |

| | | |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.2.4 | Відкритий ЯПЦ з накопиченням та захороненням ВЯП у геологічних формаціях | 111 |
| 4.1.2.5 | Відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП, частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію, та захороненням всього обсягу ВЯП у геологічних формаціях | 113 |
| 4.1.2.6 | Частково-замкнений ЯПЦ з використанням урану у CANDU | 116 |
| 4.1.2.7 | Частково-замкнений з використанням урану у CANDU та плутонію у легководних реакторах LWR | 119 |
| 4.1.2.8 | Замкнений ЯПЦ з використанням плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR | 121 |
| 4.2 | Апробація методу порівняльної критерійної оцінки ЯПЦ | 124 |
| 4.3 | Апробація методу аналізу чутливості результатів порівняльної оцінки ЯПЦ | 125 |
| 4.4 | Верифікація комп'ютерної моделі ЯПЦ | 128 |
| 4.5 | Застосування інструментарію прогнозного моделювання до альтернативної оцінки розвитку ядерної енергетики | 131 |
| 4.6 | Висновки до Розділу 4 | 136 |
| ВИСНОВКИ | | 139 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | | 142 |
| ДОДАТОК А | Складові елементи та вхідні дані моделі ЯПЦ для комп'ютерного засобу MESSAGE | 155 |
| ДОДАТОК Б | Аналіз чутливості результатів прогносної оцінки відкритого, частково-замкненого та замкненого ЯПЦ | 170 |
| ДОДАТОК В | Список публікацій за темою дисертації і відомості про апробацію результатів дисертації | 178 |
| ДОДАТОК Г | Акти про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи | 182 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

| | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CANDU | Canada Deuterium Uranium (важководний водо-водяний ядерний реактор виробництва Канади) |
| DESAE | Dynamics of Energy System of Atomic Energy (динаміка атомної енергетичної системи) |
| EUR | European Utility Requirements (Вимоги європейських експлуатуючих організацій) |
| FR | fast reactor (реактор на швидких нейтронах) |
| GAINS | Global Architecture of Innovative Nuclear Energy Systems Based on Thermal and Fast Reactors Including a Closed Fuel Cycle (глобальна архітектура інноваційної ядерної енергетичної системи, заснованої на теплових та швидких реакторах, включаючи замкнений ЯПЦ) |
| HWR | Heavy Water Reactor (реактор з важкою водою) |
| INFCE | International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (міжнародна оцінка циклу ядерного палива) |
| INPRO | International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, IAEA (Міжнародний проект з інноваційних ядерних реакторів та паливних циклів, МАГАТЕ) |
| IRR | Internal Rate of Return (внутришня норма прибутку) |
| KIND | kind indicator (ключовий індикатор) |
| LCOE | Levelised Cost of Energy (нормована вартість електроенергії) |
| LUEC | Levelised Unit Electricity Cost (нормована вартість електроенергії одного енергоблоку) |
| MAVT | multiple–attribute value theory (теорія значень багатьох атрибутів) |

| | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MESSAGE | Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impacts (модель з оцінки альтернатив енергетичного споживання та загального впливу на навколишнє середовище) |
| MOX | Mixed OXide fuel (тип ядерного палива, що вміщує декілька ізотопів подільних матеріалів) |
| NPV | net present value (чиста приведена вартість) |
| PWR | Pressurised Water Reactor (реактор з водою під тиском) |
| ROI | Return of Investment (коефіцієнт, що характеризує ступінь повернення інвестицій) |
| SYNERGIES | Synergistic Nuclear Energy Regional Group Interactions Evaluated for Sustainability (Стійка синергетична регіональна взаємодія ядерної енергетики) |
| VISTA | Nuclear Fuel Cycle Simulation System |
| WENRA | Western European Nuclear Regulators Association (Асоціація регуляторів Західної Європи/Західноєвропейська асоціація органів регулювання ядерної безпеки) |
| WNA | World Nuclear Association (Всесвітня ядерна асоціація) |
| АЕС | атомна електростанція |
| АПК | атомно-промисловий комплекс |
| ВАН | високо-активні відходи (радіоактивні) |
| ВВЕР | водо-водяний енергетичний реактор |
| ВМ | важкий метал |
| ВЯП | відпрацьоване ядерне паливо |
| ГФ | геологічна формація |
| ДП | державне підприємство |
| ЗППЕ | загальне первинне постачання енергії |
| МА | мінорний актинид |

| | |
|--------|----------------------------------------|
| МАГАТЕ | Міжнародне агентство з атомної енергії |
| ОЕС | об'єднана енергетична система |
| ОП | оціночний параметр |
| ОРР | одиниця роботи розділення |
| РАВ | радіоактивні відходи |
| ТВЕЛ | тепловиділяючий елемент |
| ТВЗ | тепловиділяюча збірка |
| ЦПП | цільовий продукт поділу |
| ЯЕС | ядерна енергетична система |
| ЯПЦ | ядерно-паливний цикл |
| ЯРБ | ядерна та радіаційна безпека |

ВСТУП

Відповідно до Енергетичної стратегії до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (затверджено розпорядженням КМУ від 18.08.2017 №. 605-r) [1] в Україні передбачається зростання виробництва електроенергії від АЕС. У разі поступового виведення енергоблоків з експлуатації після 2030 року, виконання положень енергетичної стратегії можливе лише за умов будівництва заміщуючих та нових енергоблоків.

В Україні реалізовано відкритий ЯПЦ, у якому відпрацьоване ядерне паливо (надалі ВЯП) вивантажується з реактора до басейну витримки для зберігання протягом до 10 років для зниження остаточного енерговиділення виходячи з умов забезпечення ядерної безпеки. Після цього, ВЯП Запорізької АЕС направляється для довгострокового зберігання протягом 50 років у сховище ВЯП сухого типу. ВЯП Южно-Української АЕС, Рівненської АЕС та Хмельницької АЕС направляється для довгострокового зберігання та переробку до іншої країни. З метою мінімізації фінансових витрат та для забезпечення енергетичної безпеки, Законом України «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 (ВВР), 2012, № 40, ст. 476) [2] передбачено будівництво та введення в експлуатацію централізованого сховища ВЯП сухого типу у зоні відчуження Чорнобильської АЕС.

Разом з тим, щороку з АЕС України вивантажується близько 240 т ВМ ВЯП. Враховуючи строк експлуатації енергоблоків АЕС до 60 років, можливо очікувати поступове накопичення значного обсягу ВЯП, що потребує розгляду на державному рівні питання з визначення шляхів мінімізації його накопичення та створення відповідних умов безпечного зберігання у довгостроковій перспективі продуктів його переробки. Енергетична стратегія на період до 2035 року у частині поводження з ВЯП АЕС передбачає так зване «відкладене

рішення» [3] з невизначеністю напрямку поводження з ВЯП після закінчення проектного строку його зберігання у відповідних сховищах. Але для забезпечення сталого розвитку ядерної енергетики та мінімізація її впливу на навколишнє середовище у Директиві від 19.07.2011 №2011/70/EURATOM [4] наголошується на принциповій необхідності визначення національної стратегії кінцевого поводження з ВЯП. Це потребує розгляду відмінних від відкритого ЯПЦ варіантів поводження з ВЯП, заснованих на принципово інших технологіях, та їх порівняльну оцінку у довгостроковій перспективі до 2100 року.

Прогнозний аналіз інноваційного розвитку ЯПЦ на довгостроковий період можна провести з застосуванням засобів моделювання, оскільки потрібно оперувати значним переліком техніко-економічних параметрів, що характеризують складові елементи ЯПЦ, враховувати змінні властивості потоків матеріалів та характеристик ЯПЦ на тривалому часовому інтервалі тощо. Для прогнозних розрахунків притаманна значна невизначеність отриманих результатів, мінімізація якої можлива за умов використання сучасних засобів моделювання та принципово іншого підходу з формування переліку техніко-економічних даних, що описують складові елементи ЯПЦ.

Методологічні основи аналізу ЯПЦ на довгостроковий період викладені у Методології МАГАТЕ INPRO (TECDOC IAEA 1575) [5] та у результатах ряду досліджень у рамках міжнародних проектів під егідою МАГАТЕ (наприклад, GAINS [6] та SYNERGIES [7]). Разом з тим, не існує універсального формалізованого підходу до проведення прогнозної оцінки розвитку ЯПЦ у довгостроковій перспективі. До того ж, на даний час прогнозне моделювання засновано на застосуванні незмінних у часі (заморожених) первинних вхідних даних, що може призводити до збільшення невідповідності отриманих результатів та, як слідство, до промислової реалізації невиправданих технічних рішень поводження з ВЯП та ядерним матеріалом. Отже, необхідним є підвищення адекватності результатів прогнозного моделювання ЯПЦ, що фактично мистить забезпечення придатності первинної інформації, послідовне

врахування взаємозв'язків між складовими компонентами різних ЯПЦ та достатність інтерпретації результатів моделювання.

Приймаючи до уваги значні фінансові витрати на розгортання ЯПЦ, а також невизначеність у вартості складових елементів різних ЯПЦ при розгляді на довгостроковому часовому періоді, доцільно застосування аналізу чутливості при проведенні інтерпретації отриманих результатів. При цьому, застосування аналізу чутливості у класичному розумінні з аналізом впливу рівномірної зміни ($\pm M, \%$) вхідного параметру не може вважатись прийнятним для цілей прогнозного моделювання виходячи з наявності часової залежності технічних та економічних характеристик складових елементів ЯПЦ. Таким чином, підвищення адекватності інтерпретації результатів прогнозних розрахунків ЯПЦ можливе шляхом впровадження методу аналізу чутливості з використанням трендів зміни у часі технічних та економічних показників, які застосовуються у якості первинної інформації при формуванні комп'ютерної моделі паливного циклу.

Окремим питанням є коректність інтерпретації результатів прогнозного аналізу розвитку ЯПЦ, заснованих на різних технологічних складових, з метою забезпечення всебічної оцінки об'єкту дослідження та мінімізації часових витрат для отримання результатів розрахунку. Для цього необхідна формалізація методу формування ключових індикаторів (КІ) оцінки ЯПЦ та математичного методу порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком різнофізичних КІ, що дозволяє виконати багатокритеріальну інтегральну порівняльну оцінку ЯПЦ на відміну від підходу з порівняння за одним обраним критерієм.

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

Метою цієї 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:

1. Виконати критичний огляд існуючих методів та засобів математичного моделювання, а також існуючої практики оцінювання результатів прогнозного моделювання ЯПЦ, з метою виявлення обмежень, обумовлених відсутністю відповідних моделей та підходів до підготовки первинної інформації, дослідження моделей ЯПЦ у різних режимах їх функціонування та інтерпретації результатів моделювання.

2. Удосконалити математичну модель відкритого ЯПЦ, зокрема, шляхом врахування потоку ядерних матеріалів для забезпечення можливості коректного використання характеристик частково-замкненого та замкненого ЯПЦ.

3. Розробити процедуру аналізу первинної інформації, що враховує часові тренди зміни техніко-економічних показників відповідних технологічних процесів.

4. Розробити та провести верифікацію математичного методу порівняльної оцінки ЯПЦ за множиною ключових індикаторів (КІ), якій дозволяє застосовувати різнофізичні параметри, отримані як результат використання відповідних прогнозних моделей;

5. Розробити метод аналізу чутливості прогнозних моделей ЯПЦ до зміни первинної інформації для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ;

6. Підтвердити ефективність запропонованих методів шляхом їх застосування для прогнозного моделювання частково-замкненого та замкненого ЯПЦ відповідно до АЕС України та провести порівняння результатів моделювання з сучасним світовим досвідом поводження з ВЯП.

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

- науково-дослідних робіт за темами: «Розробка концепції поводження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС України» (план-замовлення від

15.06.2015 №619-06-15/41) [8], «Дослідження напрямків міжнародної співпраці у розвитку ядерно-енергетичної системи України на середню та довгострокову перспективу (SYNERGIES)» (план-замовлення від 18.03.2013 № 525-03-13/41) [9], «Участь України у проекті «Розробка глобальної архітектури ядерно-енергетичних систем на основі замкненого ЯПЦ з реакторами на теплових та швидких нейтронах (у рамках проекту МАГАТЕ GAINS)»» (план-замовлення від 06.11.2009 № 256-11-09/41) [10];

- 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). Vienna : IAEA, 2009. (IAEA-TECDOC-1636)) [11], 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 . — Vienna : IAEA, 2013. — 271 p. — (IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-1.14)) [12], досліджень у рамках INPRO у проекті МАГАТЕ SYNERGIES з міжнародної кооперації у рамках забезпечення «стійкості» ЯПЦ на підставі порівняння сценаріїв розвитку ядерної енергосистеми (Final report of the INPRO collaborative project on Synergistic Nuclear Energy Regional Group Interactions Evaluated for Sustainability (SYNERGIES) (30.05.2016)), досліджень у рамках INPRO у проекті МАГАТЕ ROADMAPS [13] з визначення перспективних напрямків міжнародної кооперації;

- заходу «Аналіз практики, технологій з довгострокового зберігання, переробки відпрацьованого ядерного палива та поводження з цінними продуктами його переробки» [14] Стратегічних напрямків поводження з відпрацьованим ядерним паливом атомних електростанцій України з реакторами ВВЕР на період до 2030 року (Наказ Міністерства енергетики від 19.06.2015 № 386) [15].

Автор брав безпосередню участь як виконавець згаданих науково-дослідних робіт з боку ДП «НАЕК «Енергоатом» за темою дисертації, а також виконував відповідні науково-дослідні роботи у ході реалізації міжнародних проектів під егідою МАГАТЕ (GAINS, SYNERGIES, ROADMAPS, тощо).

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 завдань прогнозного моделювання, а також дослідження моделей ЯПЦ у різних режимах функціонування та оцінювання отриманих результатів. Це дало можливість створити методологічні засади для побудови математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ для завдань прогнозного моделювання, а також дослідження даних моделей у різних режимах їхнього функціонування для інтерпретації результатів моделювання.

2. Удосконалено математичну модель відкритого ЯПЦ за рахунок опису взаємозв'язків між потоками ядерних матеріалів урану та плутонію, що дало можливість розгляду більш складніших схем організаційно-технічної побудови ЯПЦ. 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 часового аналізу трендів, що дозволяє розглядати ЯПЦ як динамічну систему та забезпечити відповідність цілям прогнозного моделювання. Метод дозволяє врахувати часові тренди зміни техніко-економічних показників відповідних технологічних процесів для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ.

4. Вперше запропоновано метод порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком КІ, що дозволяє виконати багатокритерійну 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 за визначеною множиною даних з метою обґрунтування техніко-економічних показників ЯПЦ, що дозволяє врахувати змінність у часі техніко-економічних параметрів ЯПЦ та забезпечити адекватність їх моделей для цілей прогнозного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що результатам досліджень на довгостроковий період притаманна значна похибка, яка у свою чергу може призводити (або призводить) до некоректних рішень на державному рівні. Отримані у даній дисертаційній роботі методологічні підходи з формування первинної інформації з техніко-економічних параметрів ЯПЦ з використанням аналізу трендів, формування критеріїв порівняльної оцінки різних сценаріїв ЯПЦ з урахуванням обраних КІ на національному рівні та алгоритму проведення аналізу чутливості з використанням трендів зміни техніко-економічних показників ЯПЦ дозволяють мінімізувати чинники впливу невизначеностей при проведенні прогнозного аналізу з застосуванням програмних комп'ютерних засобів моделювання ЯПЦ та покращити адекватність моделей ЯПЦ. Сформовано та верифіковано масив первинної техніко-економічної інформації ЯПЦ України. Вперше для умов України визначено структуру доцільного для реалізації на довгостроковий період варіанту ЯПЦ та проведено порівняння результатів розрахунків із наявними даними з реалізації ЯПЦ у світі, що дозволяє підтвердити ефективність запропонованих підходів для вирішення практичних завдань. Отримані у даній дисертаційній роботі результати можуть бути застосовані при проведенні прогносної оцінки розгортання різних типів генерації, відмінних від атомної генерації.

Достовірність методів оцінки розвитку ЯПЦ на довгостроковий період визначається порівнянням отриманих результатів розрахунків з наявною

світовою практикою реалізації ЯПЦ та трендами його подальшого розгортання, що у випадку застосування оптимізаційних розрахункових програмних засобів фактично є більш показовим у порівнянні з верифікацією за результатами інших розрахункових програм. Результати роботи обговорювались з міжнародними експертами на нарадах в МАГАТЕ та включені до звітних документів МАГАТЕ.

Особистий вклад автора. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У публікаціях, виконаних у співавторстві, автору належать (Додаток Б):

- формування підходів до вхідних техніко-економічних даних технологій ЯПЦ, моделювання ядерної енергетичної системи України;
- формування критеріїв оцінки проектів РУ нових АЕС щодо взаємозв'язку з ЯПЦ;
- побудова моделі ядерної енергетичної системи України;
- формування підходів до критерійної оцінки ЯПЦ;
- 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 результати та положення дисертаційної роботи опубліковано в 11 наукових роботах, з яких 6 статей у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України, 5 опубліковано у якості видань МАГАТЕ.

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.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗНОЇ ОЦІНКИ ЯПЦ. СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ З МОДЕЛЮВАННЯ ЯПЦ

1.1 Ядерна енергетика України. Поводження з ВЯП АЕС

В «Енергетичній стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (далі – Енергетична стратегія) [1], яка визначила стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України, атомну енергетику визнано одним з найбільш економічно ефективних низьковуглецевих джерел енергії, а подальший розвиток ядерного енергетичного сектору на період до 2035 року прогнозується виходячи з того, що частка атомної генерації в загальному обсязі виробництва електроенергії зростатиме.

На даний час генерація електроенергії здійснюється на 15 енергоблоках чотирьох АЕС зі встановленою потужністю 13,835 ГВт [16]. Строки експлуатації 10-ти енергоблоків, які встановлені їх початковими проектами, закінчилися та, за результатами реалізації заходів із продовження експлуатації, були продовжені (на 10-20 років); проектні строки експлуатації двох енергоблоків закінчуються в 2020 році, у цьому ж році очікується прийняття рішення щодо їх продовження.

Продовження терміну експлуатації діючих енергоблоків АЕС реалізується на виконання розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.04.2004 № 263-р та постанови Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 №1270 [17].

Водночас, після 2030 року частину енергоблоків з тих, строк експлуатації яких був продовжений, має бути зупинено для подальшого виведення з експлуатації. Відповідно, сумарне виробництво електроенергії на АЕС суттєво знижуватиметься, що вимагає прийняття завчасних рішень щодо заміщення потужностей, які вибувають.

Надійне постачання свіжого ядерного палива для АЕС України, зокрема диверсифікація поставок та поводження з ВЯП, має визначальне значення для забезпечення енергетичної безпеки держави [18].

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 09.11.2016 № 943 схвалено Концепцію «Державної цільової економічної програми розвитку атомно-промислового комплексу на період до 2020 року» [19], якою передбачено заходи із розвитку уранового виробництва та будівництва заводу з виробництва ядерного палива.

Указом Президента України № 104/2019 «Про заходи з підтримки розвитку ядерної енергетики та підвищення рівня безпеки у сфері використання ядерної енергії» [20] одним з пріоритетних напрямків визначено створення власного виробництва ядерного палива для вітчизняних атомних електростанцій із залученням до створення такого виробництва суб'єктів, які здійснюють виробництво електричної енергії на атомних електростанціях.

Відповідно до Закону України «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом щодо розміщення, проектування та будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій» № 4384-VI від 9.02.2012р. [21], з метою створення єдиної системи та оптимізації структури поводження з відпрацьованим ядерним паливом вітчизняних атомних електростанцій, проводиться будівництво централізованого сховища ВЯП «сухого» типу (ЦСВЯП) для енергоблоків ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 АЕС України. Проект ЦСВЯП затверджено розпорядженням КМУ від 7 червня 2017р № 380-р [22]. Експлуатуючою організацією ЦСВЯП визначено ДП «НАЕК «Енергоатом».

Після вивантаження з активної зони РУ відпрацьоване ядерне паливо ВЯП енергоблоків ВВЕР-440 розміщується у приреакторному басейні витримки (БВ). Термін витримки у БВ складає від 3 до 7 років в залежності від строку експлуатації ТВЗ у складі паливного завантаження. Після витримки у БВ паливо енергоблоків ВВЕР-440 направляється на завод РТ-1-ФДУП ВО «Маяк» (РФ) для

подальшого збереження у сховищі ВЯП «мокрого» типу та для переробки з використанням PUREX-технології.

За рік до введення в експлуатацію ЦСВЯП передбачено завершити вивезення ВЯП ВВЕР-440 до РТ-1-ФДУП «Маяк» (РФ). Розміщення осклованих високоактивних відходів (ВAB) для зберігання після переробки ВЯП ВВЕР-440 передбачається у сховищі Комплексу «Вектор» у Чорнобильській зоні відчуження.

Після вивантаження з активної зони РУ, ВЯП енергоблоків ВВЕР-1000 розміщується у приреакторному БВ. Термін витримки у БВ – від 5 до 10 років в залежності від строку експлуатації ТВЗ у складі паливного завантаження.

Після витримки у БВ паливо енергоблоків ВВЕР-1000 ВП ЮУАЕС, ВП РАЕС та ВП ХАЕС направляється на завод ФДУП «КГХК» (РТ-2, РФ) для подальшого зберігання у сховищі ВЯП «мокрого» типу. Переробка ВЯП на даний час не здійснюється. За рік до введення в експлуатацію ЦСВЯП передбачається завершити вивезення ВЯП ВВЕР-1000 до ФДУП «ГХК» (РТ-2, РФ). Паливо ВВЕР-1000 ВП «Запорізька АЕС» направляється на довготривале зберігання до пристанційного сховища ВЯП «сухого» типу (ССВЯП), яке розташоване на майданчику атомної станції.

Відповідно до діючої угоди і контракту планова дата повернення першої партії ВAB від переробки ВЯП передбачається у 2025 році. Також передбачається повернення в Україну цільових (або цінних) продуктів переробки ВЯП (змішані оксиди урану, плутонію та нептунію).

Розміщення осклованих ВAB після переробки ВЯП ВВЕР-1000 передбачається у сховищі Комплексу «Вектор» у Чорнобильській зоні відчуження.

Технологічні рішення у проекті будівництва ЦСВЯП [23] ґрунтуються на технології та устаткуванні корпорації «Holtec International» (США). Технологія «Holtec International» передбачає використання багатоцільового контейнера (БЦК), розрахованого на зберігання 31 ВЯП ВВЕР-1000 або 85 ВЯП ВВЕР-440. Повна проектна потужність ЦСВЯП (458 контейнерів) має забезпечити

розміщення та зберігання ВЯП ВВЕР-1000 – 12 010 од. та ВЯП ВВЕР-440 – 4 519 од. Загальна проектна місткість ЦСВЯП складає 5 650 тонн ВМ.

Проектна річна потужність ЦСВЯП складає для ВТВЗ ВВЕР-1000 - не менше 504 од./рік, для ВТВЗ ВВЕР-440 – не менше 192 од./рік. Проектний термін експлуатації ЦСВЯП складає 100 років. Експлуатація ЦСВЯП передбачає два основних етапи: активний (45-50 років), упродовж якого проводиться перевезення БЦК з ВЯП з поступовим заповненням ЦСВЯП та пасивний період (50-55 років), упродовж якого реалізується зберігання ВЯП.

Сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП) [24] спроектоване для довгострокового безпечного зберігання ВЯП ВВЕР-1000 Запорізької АЕС. Використовуються сухі вентильовані металобетонні контейнери (ВКЗ-ВВЕР). Дата початку дослідно-промислової експлуатації - 24.08.2001 (Ліцензія ЕО № 000014 від 16.07.2001). Дата початку промислової експлуатації - 10.08.2004 (Ліцензія ЕО № 000196 від 10.08.2004). Загальний об'єм ССВЯП – 9120 ВТВЗ. Проектна кількість контейнерів – 380 од. Проектний термін зберігання ВЯП – 50 років.

Існуючий стан поводження з цінними продуктами переробки ВЯП у світовому та українському ЯПЦ показує, що щороку з активної зони енергоблоків у світі вивантажується більше 10,5 тис. тонн ВМ відпрацьованого палива, з яких 8,5 тис. тонн ВМ направляється на довгострокове зберігання, 2 тис. тонн ВМ на переробку. Паливна таблетка відпрацьованого ВЯП – це керамічна матриця, яка при початковому збагаченні 4,4% містить близько 93,4% ізотопів урану (зміст ^{235}U складе 0,8%), 5,2% ізотопів продуктів ділення, 0,2% мінорних актиноїдів (МА) Np , Am , Cm і до 1,2% ізотопів плутонію [25]. Таким чином, після вивантаження з активної зони, відпрацьоване паливо вміщує значний енергетичний ресурс у вигляді урану та плутонію, якій потенційно може бути використаний для подальшого виробництва електроенергії із загальним зниженням потреб ядерної енергетики у свіжому природному урані.

Дослідження щодо привабливості повторного використання урану та плутонію (рециклу) містять аналіз стійкості прийнятих рішень використання

ЦПП у ЯПЦ за критеріями дотримання принципів стійкості ЯПЦ у частині ресурсного забезпечення, забезпечення гарантій нерозповсюдження у ЯПЦ та гарантії постачання енергетичних ресурсів (енергетична безпека) [26 - 28].

Згідно з даними документу "Червона Книга" (Uranium 2016: Resources, Production and Demand) [29], Україна за покладами урану посідає 11 місце в світі та володіє 1,8% світових запасів.

Відсутність впливу на навколишнє середовище при поводженні з ВЯП на АЕС та при його довгостроковому зберіганні забезпечується дотриманням вимог ЯРБ і контролем цілісності фізичних (конструкційних) бар'єрів. Світовий досвід експлуатації довгострокових сховищ ВЯП свідчить про відсутність виходу радіоактивних продуктів протягом проектного терміну експлуатації сховища [30]. Зберігання ЦПП реалізується у вигляді закису-окису ізотопів урану і плутонію або у вигляді змішаних діоксидів. Дані форми є хімічно стабільними і слаборозчинними у воді, що фактично виключає їх міграцію у випадку порушень умов нормальної експлуатації або при аваріях у системах поводження з ВЯП.

Забезпечення умов гарантії нерозповсюдження ЯМ для потреб цивільної ядерної промисловості у світі регулюється виконанням рекомендацій МАГАТЕ та Угодою про нерозповсюдження (Non-Proliferation Treaty) [31]. В остаточній фазі ЯПЦ найбільша увага приділяється ізотопам плутонію, який є найбільш небезпечним продуктом поділу у ВЯП щодо визначень гарантій нерозповсюдження ЯМ.

У відповідності з прийнятими у МАГАТЕ підходами, які відображені у методології INPRO TECDOC-1575 [5], при розгляді ЯПЦ та/або шляхів поводження з ВЯП та ЦПП, у частині відповідності вимогам гарантій нерозповсюдження необхідно забезпечити:

- низьку привабливість ядерного матеріалу для можливого подвійного призначення;
- відсутність можливого переключення ядерного матеріалу (виключення можливості фізичного вилучення ядерного матеріалу);

- врахування внутрішньо властивих відповідному ЯМ властивостей.

Зведену інформацію в частині забезпечення вимог гарантій нерозповсюдження при поводженні з ЦПП та ВЯП неведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Аналіз забезпечення вимог гарантій нерозповсюдження (ГН) при поводженні з ЦПП та ВЯП

| Тип палива/ етап | Властивості, що забезпечують дотримання ГН | Властивості, що не забезпечують дотримання ГН |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ВЯП у вигляді збірки | Значні геометричні розміри Велика наведена активність Велике залишкове енерговиділення Необхідність використання спецобладнання під час поводження в ВЯП Відсутність поділу окремих фракцій урану і плутонію | - |
| ЦПП у вигляді окремих фракцій | Зберігання у вигляді змішаних оксидів урану і плутонію | Наявність переробки Поділ фракцій у процесі переробки ВЯП Зберігання у вигляді окремих фракцій (виділений плутоній) Низьке залишкове енерговиділення на етапі зберігання Можливість зберігання малих об'ємів (можливість несанкційного переміщення) |
| МОХ-паливо | Зберігання у вигляді змішаних оксидів урану і плутонію Відсутність опції рециркуляції з переробкою ВЯП МОХ Велика наведена активність Велике залишкове енерговиділення Необхідність використання спецобладнання при поводженні | Наявність переробки Роз'єднання фракцій урану і плутонію в процесі переробки ВЯП |
| REMIX-паливо | Відсутність роз'єднання фракцій урану і плутонію в процесі переробки ВЯП Велика наведена активність Велике залишкове енерговиділення Необхідність використання спецобладнання при поводженні | Наявність переробки Можливість рециркуляції з переробкою ВЯП REMIX |
| DUPIC-паливо | Відсутність роз'єднання фракцій урану і плутонію в процесі переробки ВЯП Велика наведена активність Велике залишкове енерговиділення Необхідність використання спецобладнання при використанні. | Наявність переробки |

| Тип палива/ етап | Властивості, що забезпечують дотримання ГН | Властивості, що не забезпечують дотримання ГН |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Геологічне захоронення ВЯП | Відсутність переробки Відсутність роз'єднання фракцій урану і плутонію Наявність фізичних бар'єрів обмеження доступу | - |

Можна зазначити, що найбільш привабливим в частині дотримання гарантій нерозповсюдження є напрямок, що виключає переробку ВЯП та вилучення ЦПП та мінорних актинідів. Найменш привабливим є напрямок з накопичення ЦПП у вигляді окремих фракцій або у вигляді уран-плутонієвої суміші.

Відповідно до наявних даних OECD (Nuclear Energy Data) [32] середньостроковому періоді до 2035 року буде спостерігатись стабілізація на постійному рівні доля АЕС у виробництві е/е у США (прогнозна частка АЕС складе 17 – 20 % від загального виробництва е/е), та зниження частки АЕС у виробництві е/е буде спостерігатись для Франції, Японії, Німеччини. Разом з тим, прогнозується зростання частки АЕС у виробництві е/е у Великій Британії.

Для країн, що мають технології ЯПЦ, зацікавленість у переробці ВЯП визначається наявністю потужностей з переробки, можливістю забезпечення власних потреб у МОХ-паливі та не залежить від прогнозованої до 2035 року частки АЕС у виробництві е/е.

Таким чином, на даний час в Україні реалізований відкритий ЯПЦ, що враховує світовий досвід поводження з ВЯП, але не є стійким відповідно до підходів МАГАТЕ та Директиви від 19.07.2011 № 2011/70/EURATOM.

1.2 Підходи до порівняльної оцінки ЯПЦ

Проведення порівняльної оцінки ЯПЦ пов'язано з вибором найбільш прийнятної схеми організації взаємозв'язків між елементами паливного циклу для забезпечення відповідної мети його розгортання [33 - 34]. При цьому,

завдання порівняльної оцінки ЯПЦ може містити розгляд економічних, фізичних та інших параметрів. Виходячи з цього визначається напрямок та засоби порівняльної оцінки ЯПЦ. Досвід проведення порівняльної оцінки ЯПЦ враховує застосування розрахункових та аналітичних методів, з використанням яких визначається кількісні або якісні характеристики одного або багатьох критеріїв. На прикладі реалізації проектів МАГАТЕ у рамках INPRO можна сформулювати основні підходи з порівняльної оцінки ЯПЦ.

Методологічні підходи, визначені у проекті МАГАТЕ GAINS (Global Architecture of Innovative Nuclear Energy Systems Based on Thermal and Fast Reactors Including a Closed Fuel Cycle (GAINS)) [6], враховують дослідження інноваційних реакторних установок для створення стійких конфігурацій ядерної енергетики на перспективу до 2050 і 2100 років та містять наближення та опис граничних умов з оцінки глобальної архітектури ЯПЦ та приклади з аналізу сценаріїв переходу від існуючих до інноваційних ЯПЦ.

Методологічні підходи до оцінки стійкості ЯПЦ в динамічному переході від існуючої глобальної архітектури до майбутнього стану інновацій проведено на основі десяти ключових показників (КІ) та деяких пов'язаних з ними оціночних параметрів (ОП). Цей спрощений набір КІ та ОП визначений для оцінок архітектур глобальних систем з урахуванням більше ста критеріїв за всіма напрямками методології INPRO [5]. Критерії не встановлюють граничні значення за кожним з параметрів, а лише визначають напрямок дослідження ЯПЦ для підтвердження його стійкості.

У рамках реалізації проекту МАГАТЕ GAINS створено набір КІ і ПО для порівняння глобальних архітектур ЯПЦ, загальний перелік яких наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Критерії оцінки ЯПЦ у рамках проекту GAINS

| | Ключовий індикатор або параметр оцінки | Одиниця виміру | Примітка |
|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------|
| Виробництво електроенергії | | | |
| КІ-1 | Потужність енергоблоку (ел) | ГВт | Встановлена електрична потужність енергоблоків одного проекту (типу) |

| | | | |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОП-1.1 | Коефіцієнт врахування (а) Інфраструктури будівництва (б) Зняття з експлуатації | ГВт/рік | Необов'язковий параметр для визначення рівня інфраструктури для ланцюга постачання технології реактору та його виведення з експлуатації |
| Ресурсне забезпечення | | | |
| КІ-2 | Виробництво електроенергії на одиницю маси природнього урану | ГВт/кілотонн ВМ | Розраховані річні та сукупні значення |
| ОП-2.1 | Споживання природнього урану | кілотонн ВМ | Розрахункова кількість споживання урану або торію |
| КІ-3 | Приведене споживання урану на одиницю енергії | кг/ГВт*рік | Розраховують діленням кумулятивної маси матеріалу прямого використання в межах групи на сукупну кількість електричної енергії |
| Ядерне паливо, що вивантажується | | | |
| КІ-4 | Кількість вивантаженого ВЯП на одиницю енергії, що виробляється | т ВМ/ГВт*рік | Розраховується шляхом ділення кумулятивної кількості вивантаженого палива на зберігання або утилізацію на кількість (нетто) електричної енергії |
| КІ-5 | Кількість радіоактивних відходів, що напрацьовується на одиницю енергії, що виробляється | м ³ /ГВт*рік | Розраховується шляхом ділення сукупної кількості утворених радіоактивних відходів (за винятком скинутого палива, яке охоплюється КІ-4 вище) за сукупною чистою електричною енергією |
| ОП-5.1 | Радіотоксичність та остаточне енерговиділення (враховується ВЯП, що направляється до геологічного сховища) | Зв/кВт*год та кВт/т ВМ | Розраховується для довгоіснуючих елементів, що у наявності у радіоактивних відходах або у ВЯП як функція часу |
| ОП-5.2 | Накопичення мінорних актинідів на енергію, що виробляється | кг/ГВт*рік | Розраховується діленням кумулятивної маси дрібних актинідів на сукупну чисту електричну енергію, вироблену на АЕС |
| Послуги ядерно-паливного циклу | | | |
| КІ-6 | (а) приведений об'єм потужностей зі збагачення урану на одиницю енергії, що виробляється (б) приведений об'єм потужностей з переробки ВЯП на одиницю енергії, що виробляється | (ОРР/рік)/ГВт т ВМ/рік/ГВт | (а) Розраховується шляхом ділення загальної потужності зі збагачення урану в одиницях роботи розділення (ОРР) у рік на об'єм енергії (б) Розраховується шляхом поділу об'єму ВЯП, що вивантажується з реактора у рік, на об'єм енергії |
| КІ-7 | Річний об'єм ядерного палива або РАВ | кілотонн ВМ/рік | Розраховується для гетерогенних систем з використанням |

| | | | |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | комп'ютерних програм з оцінки параметрів паливного циклу |
| ОП-1 | Категорія ядерного матеріалу, що транспортується між групами | Категорії (1 - 3) | Категорії визначаються на основі положень Конвенції з фізичного захисту ядерних матеріалів |
| КІ-8 | Приведене на рік значення колективного ризику | ризик/МВт | Розрахунок щорічного колективного ризику, приведеного на одиницю чистої енергії |
| Витрати та інвестиції | | | |
| КІ-9 | Приведена вартість електроенергії на один енергоблок | долл /МВт*год | Параметр має значну невизначеність |
| КІ-9.1 | Капітальні витрати на будівництво першого у серії енергоблока | долл /кВт | |
| КІ-10 | Оцінки витрат на науково-технічні роботи з будівництва та введення в експлуатацію першого (у серії) енергоблока | долл | Приблизний порядок величини інвестицій |
| ОП-10.1 | Додаткові вигоди, що досягаються за наявності розвитку ЯПЦ | визначається окремо | Опис якісних показників, які не є кількістю генерації електроенергії |

Методологічні підходи, визначені у проекті МАГАТЕ SYNERGIES [7] спрямовані на виявлення та оцінку взаємовигідних форм співпраці у ЯПЦ та ідентифікацію перешкод з його розвитку. Заходи проекту містили перегляд основного набору ключових критеріїв та показників, сформованих у рамках проекту GAINS, та розробку оновленої бази даних оціночних параметрів для оцінки ЯПЦ та ядерних реакторів.

Сформульовано позитивні чинники та ризики у розвитку міжнародної кооперації у ядерній енергетиці, що у свою чергу дозволяє застосовувати відповідні наближення при формуванні моделей можливих синергетичних та несинергетичних сценаріїв розвитку ЯПЦ. Загальну інформацію проекту SYNERGIES з позитивних факторів (drivers) та негативних (impediments) сторін міжнародної кооперації наведено у таблиці 1.3. Аналіз сценаріїв SYNERGIES визначає конкурентоспроможну економіку як основний чинник співпраці між країнами у ЯПЦ.

Таблиця 1.3 - Напрямки з позитивних чинників та ризиків міжнародної кооперації у ЯПЦ відповідно визначень проекту SYNERGIES

| Позитивні (drivers) чинники міжнародної кооперації | Ризики (impediments) міжнародної кооперації |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Мінімізація витрат на розвиток технологій ЯПЦ | Необхідність великих об'ємів для мінімізації витрат |
| Накопичення ВЯП | Ціна на природні ресурси, вартість природнього урану |
| Впровадження інновацій | Політична або економічна нестабільність |
| Контроль накопичення плутонію, урану, РАВ | Суспільна підтримка ядерної генерації |
| | Національне законодавство щодо трансграничного транспортування та повернення |

Результати застосування методологічних підходів проекту SYNERGIES для аналізу ЯПЦ демонструють, що порівняння ЯПЦ за одним параметром, що характеризує вартість вироблення електроенергії (LUEC), не є показовим та не враховує можливі ризики впливу економічної нестабільності на розвиток ЯПЦ.

1.3 Огляд моделей ЯПЦ

Для вирішення завдань планування і прогнозування розвитку ЯПЦ широкого поширення набули оптимізаційні, імітаційні і аналітичні моделі. Для цілей комплексного аналізу ЯПЦ доцільним є застосування різних моделей та їх поєднання у ході дослідження. Разом з тим, такий підхід є затратним у часі, потребує переведення вихідних даних з формату одного розрахункового засобу до формату вхідних даних іншого та не набув широкого застосування на практиці.

Оптимізаційні моделі [35 - 36] призначені для визначення найкращих щодо певного обраного критерію ЯПЦ. Частину параметрів моделі відносять до вхідних даних, змінюючи які у обраних та обгрунтованих обмеженнях можливо отримати набір значень досліджуваної характеристики ЯПЦ та тим самим проводити дослідження його доцільного сценарію. Відповідні обмеження залежать від умов функціонування ЯПЦ що досліджується. Оптимізаційні моделі частіше за все застосовуються для пошуку припустимих меж зміни

вхідних даних, при яких цільовий функціонал досягає свого найкращого значення. Оптимізаційні моделі дозволяють визначити чутливість режиму експлуатації системи до зміни технічних, екомічних параметрів і системних обмежень. Разом з тим, одним з недоліків оптимізаційної моделі є складний процес інтерпретації отриманих результатів дослідження. На інтерпретацію впливає спектр взаємопов'язаних факторів, внаслідок чого він стає менш контролюємим, ніж в імітаційному підході. Також необхідно враховувати наявність крайових ефектів, які проявляються у зміні переваг в системі при її розгляді на значному горизонті прогнозування. При розробці оптимізаційних моделей ЯПЦ, як правило, необхідне застосування відповідних спрощень. Типовим є наближення про відсутність перерозподілу ядерного матеріалу у ЯПЦ, а також невизначенність у описі характеристик ВЯП та відповідного ізотопного складу.

Розвиток моделей, заснованих на імітаційному підході для завдань прогнозування розвитку ЯПЦ, пов'язаний зі складністю об'єкту дослідження. Імітаційні моделі застосовуються у випадках, якщо проводиться спостереження за поведінкою системи протягом певного обмеженого періоду часу. До переваг імітаційного підходу [37 - 38] можна віднести опис системи зі значною у порівнянні з оптимізаційними моделями точністю. При цьому забезпечується можливість оцінити реакцію системи на зміну її структури, виділити непрямі і прямі наслідки від здійснення заданої стратегії розвитку ЯПЦ.

Аналітичні моделі [39] не знаходять широкого використання порівняно з сучасними програмними продуктами. При побудові аналітичних моделей застосовуються суттєві спрощення для опису загальних властивостей, що у свою чергу призводить до невідповідності моделей складних ЯПЦ. До переваг відноситься можливість встановлення зв'язків між зовнішніми і внутрішніми параметрами ЯПЦ, що дозволяє визначати найбільш доцільні технологічні характеристики складових елементів системи. Також, можливо визначати граничні виробничі можливості кожного з варіантів ЯПЦ. Аналітичні методи аналізу ЯПЦ можуть доповнювати інші підходи.

1.4 Сучасні програмні засоби з моделювання ЯПЦ

Комп'ютерний програмний засіб MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) [40 - 41] набув широкого використання для побудови великомасштабної динамічної моделі ЯПЦ. MESSAGE дозволяє визначити оптимальну стратегію розвитку енергосистеми з урахуванням визначених користувачем припущень.

MESSAGE розроблено як оптимізаційну модель системного проектування. Економічні показники містять інвестиційні витрати, постійні і змінні витрати на експлуатацію та обслуговування, зовнішні і внутрішні витрати на паливо, оцінки рівня витрат та інш. Паливо і технології об'єднані, щоб побудувати енергетичні ланцюжки, за якими енергія постачається від пропозиції до попиту. Модель враховує існуючі установи, їх термін експлуатації та строк виведення з експлуатації. Інвестиційні потреби можуть бути розподілені по часу будівництва об'єкта генерації і можуть бути розділені на різні категорії для більш точного відображення. Потреби на основні матеріали і неенергетичні витрати під час будівництва та експлуатації об'єкта генерації енергії також можуть бути враховані шляхом аналізу відповідних енергетичних потоків.

Екологічні аспекти можуть бути оцінені шляхом генерації і обмежень забруднюючих речовин, що викидаються різними технологіями на кожному етапі енергетичного ланцюжка. Це також допомагає оцінити вплив екологічних норм на розвиток енергосистеми.

Моделювання з використанням MESSAGE є гнучким, що дозволяє формувати модель ЯПЦ виходячи з відповідних завдань. Кожен компонент може бути представлений з необхідним ступенем деталізації. У простих моделях атомну станцію можливо навести шляхом завдання вхідних потоків (свіже паливо, витрати на експлуатацію) і вихідними потоками (відпрацьоване паливо і витрати на забезпечення безпечного поводження з ВЯП). На рисунку 1.1 наведено схему простої моделі ЯПЦ, побудованої на потоках матеріалів до та після АЕС.

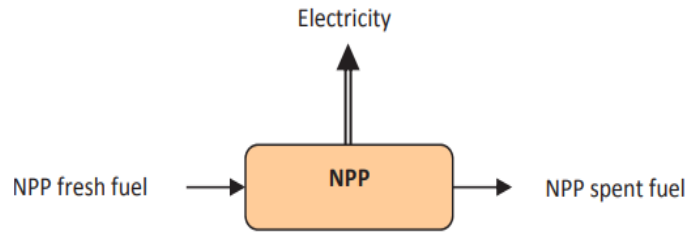


Рисунок 1.1 - Проста модель ЯПЦ з АЕС у MESSAGE

Основа MESSAGE – математичний опис техніко-економічних параметрів енергосистеми, якій містить визначення і категоризацію енергетичних потоків (наприклад, первинна енергія, кінцева енергія і корисна енергія). Програмний засіб MESSAGE передбачає два способи опису елементів системи:

- елемент ЯПЦ моделюється як «технологія», тобто, виробництво розгортається на окремій території;
- елемент ЯПЦ моделюється як «послуга», придбана на внутрішньому ринку, або по імпорту.

Мінімальною необхідною інформацією для опису елементу в термінах «технологія» є наступна інформація:

- матеріальний баланс сировини та кінцевого продукту;
- капітальні витрати, час будівництва і термін експлуатації складових технологічних елементів енергетичної системи (life time);
- постійні витрати на обслуговування і підтримку виробництва, які не залежать від обсягу виробленої продукції (зарплата персоналу, вода, електроенергія, витратні матеріали, оренда, кредити і т. д.);
- змінні витрати на виробництво продукції (сировину, паливо і т. д.).

Спрощену схему моделі енергетичної системи України з урахуванням ЯПЦ наведено на рисунку 1.2.

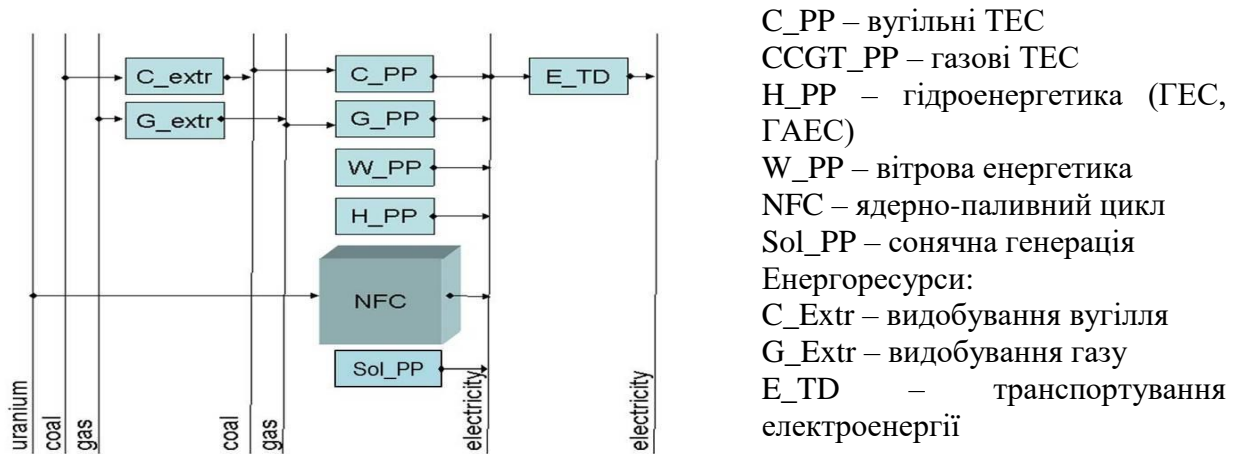


Рисунок 1.2 – Спрощена схема моделі енергетичної системи України для програмного засіб MESSAGE

В моделі наведено теплову генерацію на базі вугільних та газових ТЕС, генерацію на базі відновлюваних ресурсів (ГЕС, ГАЕС, вітрова, сонячна енергетика), ядерну енергетику (на схемі ядерну енергетику наведено у вигляді одного елемента ЯПЦ, який вміщує всі етапи поводження з ядерним паливом). На рівні «electricity» задається прогнозна лінія споживання електроенергії.

Програмний комплекс COSI (COmelini-SIccard) [42 - 43] розроблено у Франції для вивчення короткострокових, середньострокових і довгострокових сценаріїв розвитку ядерної енергетики і ЯПЦ. Він дозволяє досліджувати ЯПЦ, які побудовані на легководних реакторах і реакторах на швидких нейтронах, та оцінювати відповідні потоки ядерних матеріалів різного ізотопного складу. Основні особливості програмного комплексу COSI включають:

- можливість аналізу об'єктів ЯПЦ (шахти, збагачувальні і виробничі потужності / заводи, реактори, переробні підприємства, склади для зберігання відходів, поховання в геологічних формаціях);
- можливість проведення аналізу на основі вхідних даних, які містять попит на енергію і потреби в ядерному паливі;
- можливість аналізу потоків ядерних матеріалів;

- можливість розрахунку зміни ізотопного складу ядерного палива на основі даних за часом опромінення, часу витримки після вивантаження в басейн витримки.

Сценарії моделювання описані в основному за датою введення в експлуатацію або виведення з експлуатації реакторів і базуються на потребах реакторів в ядерних матеріалах для отримання необхідної енергогенерації. Фактично, COSI виконує фізичний розрахунок реактору. Ця функція є основною відмінною рисою від інших програмних комплексів, таких як MESSAGE, DESAE та ін. COSI поєднується з кодом розрахунку зміни ізотопного складу CESAR [44 - 45]. COSI в поєднанні з розрахунковою програмою CESAR5.3 відстежує 109 важких нуклідів ($Tl \rightarrow Cf$) і 212 продуктів поділу ($Zn \rightarrow Ho$).

Рішення проблеми оптимізації вимагає великої кількості сценарних розрахунків, які можуть бути трудомісткими. Розрахунковий час може варіюватися від декількох хвилин до декількох годин в залежності від припущень сценарію та кількості ізотопних ланцюгів. Оскільки розрахунки CESAR складають приблизно 95% часу розрахунків COSI, використовується спрощення розрахункових моделей зміни ізотопного складу, що в свою чергу накладає похибка на точність аналізу потоку ядерних матеріалів.

Програмний комплекс FAMILY (FAMILY21) [46 - 47] розроблений в Японії з метою управління та контролю технічних ризиків для майбутніх планів розвитку ЯПЦ. FAMILY21 містить інструменти введення початкової інформації, інструмент розрахунку, графічні інструменти і пост-процесор і може імітувати баланси мас в цілому або частини системи. Крім того, цей програмний комплекс може обчислювати одночасно до 15 реакторів (до 9 енергоблоків типу LWR, один енергоблок типу HWR та 5 енергоблоків типу FR) у поєднанні з різними теплоносіями і видами палива.

Крім того, можна обирати один з трьох типів заводів з переробки відпрацьованого MOX-палива з реакторів типу LWR, а саме: спеціальний завод з переробки відпрацьованого MOX-палива легководних реакторів, завод з переробки відпрацьованого палива з LWR (змішана переробка LWR-UOX

палива і MOX-палива, відпрацьованого в LWR) і завод з переробки відпрацьованого палива швидких реакторів (FR).

Вхідні дані, необхідні для розрахунку по FAMILY21, класифікуються на опціональні дані ЯПЦ і системні параметри. Дані опцій ЯПЦ враховують наявність або відсутність переробки, метод переробки відпрацьованого палива LWR-MOX, умови рециркуляції актинідів (МА), номінальну теплову потужність реактора на швидких нейтронах і потужність заводів з переробки ВЯП, тощо.

Кількість ізотопних елементів, яку можливо обчислити у розрахунках, обмежено 20, число ланцюжків трансформації ізотопів становить 38 і включає ізотопи урану (^{233}U - ^{236}U , ^{238}U), плутонію (^{238}Pu - ^{242}Pu), нептунію (тільки ^{237}Np), америцію (^{241}Am - ^{243}Am) і кюрію (^{242}Cm - ^{246}Cm).

Програму DESAE (Dynamics of Energy System of Atomic Energy - Динаміка атомної енергетичної системи) [48], розроблено Національним дослідницьким центром "Курчатовський інститут" (РФ) у рамках проекту МАГАТЕ INPRO. DESAE дозволяє виконати розрахунок ресурсів (фінансових, матеріальних), які необхідні для задоволення певних енергетичних потреб заданим набором реакторів як функції часу. Відповідно, користувач може досліджувати практичність запропонованої системи і матеріальні баланси, включаючи потреби в урані як функції часу, утворенні відповідних відходів, рецикл плутонію, і т.д. Однак проблема детального опису матеріальних потоків палива і відходів у DESAE вирішується наближено.

DESAE це динамічна інтерактивна комп'ютерна розрахункова програма, призначена для кількісної оцінки параметрів ядерної енергетичної системи на глобальному, регіональному та національному рівнях. Програма базується на математичному інструменті MATLAB. Користувач має можливість обирати кілька типів АЕС, заводів, тип ЯПЦ (відкритий або замкнений); вказати темпи розвитку ЯЕС.

Підходи при розробці сценаріїв для розрахунку з використанням коду DESAE враховують:

- зміни встановленої потужності парку реакторів з часом;

- зміни встановленої потужності кожного з розглянутих типів реакторів з часом;
- облік наявності або відсутності переробки ВЯП і їх відповідні потужності (враховується зміна потужності переробних заводів з часом).

Вироблення електроенергії і наявність відпрацьованого ядерного палива (в тому числі, ядерного матеріалу) приймаються рівними нулю на початку будь-якого сценарію. Тому сценарій, що вимагає врахування існуючого парку реакторів, не може бути змодельовано.

Для розрахунків DESAE використовує метод кінцевих різниць, де досліджуваний період поділяють на інтервали 1/10 року. Великим плюсом DESAE є швидкодія. Окремо варто відзначити неможливість проведення модернізацій даного програмного комплексу для сторонніх розробників. Модернізація DESAE доступна тільки авторам даної програми.

Програмний продукт VISTA [49] є комп'ютерною програмою для розрахунку загального потоку ядерних матеріалів у ЯПЦ різної конфігурації. Додатково, VISTA дозволяє оцінювати накопичення ізотопів у відпрацьованому ядерному паливі.

Опис потоків матеріалів проводиться для кожного з елементів ЯПЦ. Програма VISTA дозволяє враховувати ядерне паливо різного вмісту урану та плутонію, та побудову ЯПЦ на основі енергоблоків різного дизайну.

Вхідні параметри, що використовуються в моделі VISTA, можуть бути розділені на три групи:

- параметри стратегії - варіанти загальної потужності АЕС та стратегій поводження з ВЯП, типи реакторів, коефіцієнти навантаження, щорічно;
- параметри палива - середнє вигоряння, середнє початкове збагачення та середні втрати урану у результаті збагачення;
- параметри контролю - частка змішаного оксидного палива в ядрі реакторів, що використовують цей тип ядерного, збіднений або збагачений уран і кількість циклів переробки.

Результати поділяються на наступні групи: Front End (вимоги до природного урану, вимоги до конверсії, вимоги до свіжого палива) та Back End (відпрацьоване паливо, що утворюється, загальна кількість окремих нуклідів, у тому числі уран, накопичення плутонію та мінорних актинідів, вимоги до переробки). Програма VISTA також враховує втрати ядерного матеріалу на кожному з етапів ЯПЦ.

У розрахунках враховується час затримки процесу, який визначається як необхідний для отримання кінцевого продукту (наприклад, час на збагачення урану, виготовлення ядерного палива у вигляді тепловиділяючої збірки, тощо). Час затримки процесу визначається як час між двома процесами. Наприклад, переробку можна здійснити тільки після очікування певного періоду часу після вивантаження ВЯП з реактора.

Таким чином, VISTA призначений для оцінки балансу ядерного матеріалу та визначення об'ємів відповідних послуг у ЯПЦ, які розраховуються як сума відповідних щорічних потреб. Разом з тим, VISTA не дозволяє розраховувати економічні характеристики ЯПЦ.

Співставлення властивостей оптимізаційних та імітаційних розрахункових комп'ютерних засобів широкого використання наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Властивості оптимізаційних та імітаційних розрахункових комп'ютерних засобів з аналізу ЯПЦ

| Програмний засіб | COSI Франція | VISTA MAGATE | DESAE MAGATE | FAMILY21 Японія | FCOPT США | MARKAL США | MESSAGE MAGATE |
|----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------|---------------|-------------------|
| | Імітаційні | | | | Оптимізаційні | | |
| Розрахунок ізотопного стану | + | +/- | + | + | - | - | - |
| Врахування першого паливного завантаження реактору | + | + | + | + | +/- | +/- | +/- |
| Можливість врахування | + | + | + | + | + | + | + |

| | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------|-----|--------|-----|
| рециклу U , P_u | | | | | | | |
| Можливість врахування переробки ВЯП | вручну | вручну | вручну | LWR: вручну FR: + | - | вручну | + |
| Врахування виведення АЕС з експл. | +/- | - | + | LWR: вручну FR: + | - | - | + |
| Введення АЕС в експл. | +/- | - | + | LWR: вручну FR: + | - | - | + |
| Зберігання ВЯП | + | - | + | + | + | + | + |
| Застосуванн я для прийняття керівних рішень | - | - | + | - | +/- | +/- | +/- |
| Оперування економічни ми параметрами | - | - | + | - | +/- | +/- | +/- |
| Підтверджен ня економічної ефективност і АЕС | - | - | - | - | - | - | - |
| Динамічні властивості ЯПЦ | - | - | + | - | + | + | + |

1.5 Математичний опис програмного засобу MESSAGE

Програмний засіб MESSAGE [50] дозволяє будувати динамічні моделі енергетичних систем засобами лінійного програмування. Всі співвідношення, які математично визначають структуру моделі енергетичної системи у MESSAGE, є лінійними функціями з неперервними змінними.

Опис технологій у MESSAGE проводиться з урахуванням наявних у енергетичній системі типів потужностей з генерації теплової або електричної енергії, у тому числі АЕС. Технології перетворення енергії моделюються з

використанням змінних двох типів з опису питомої кількості енергії, яку перетворюється на рік, та відповідних генеруючих потужностей, що вводяться у експлуатацію (або виводяться з експлуатації) щорічно в певний інтервал часу. Тип технології перетворення енергії у MESSAGE у загальному випадку описується як:

$$zsvd.elt, \quad (1.1)$$

де z - ідентифікатор рівня споживання енергії від окремої технології, s - ідентифікатор постачання енергії (енергетичного ресурсу) для окремої технології (якщо технологія не споживає енергетичний ресурс, $z = \langle \dots \rangle$ (наприклад, сонячні технології)), v - ідентифікатор технології перетворення енергії, d - ідентифікатор, що характеризує потрібний відпуск енергії окремою технологією (попит), e - рівень зниження споживання за рахунок еластичності цінової політики (відбувається лише на рівні попиту, в інших випадках або якщо цей попит не має еластичності $e = \langle \dots \rangle$), l - ідентифікує область споживання енергії, $l \in \{1,2,3,\dots\}$ ($l = \langle \dots \rangle$ у випадку, якщо технологія не моделюється за областями), t - період часу.

Для технологій без ділення на регіони (у випадку гомогенної структури енергетичної системи) виробництво визначається шляхом опису загальної встановленої потужності та відповідним коефіцієнтом, що характеризує ступень використання окремої технології у загальній енергетичній системі. Обмеження з використання окремої технології у енергетичній системі у загальному випадку описується у вигляді наступного співвідношення:

$$\epsilon_{svd} \times zsvd \dots t - \sum_{\tau=t-\tau_{svd}}^{\min(t, k_{svd})} \Delta(\tau-1) \times \pi_{svd} \times f_i \times Yzsvd \dots \tau \leq hc_{svd}^t \times \pi_{svd}. \quad (1.2)$$

де $zsvd.t$ - потужність технології v у період часу t для регіону l , $Yzsvd \dots \tau$ - загальна максимальна потужність технології v , ϵ_{svd} - ефективність технології v

щодо перетворення енергії на вході s до енергії на виході d , k_{svd} - період часу, у якому технологію ν може бути побудовано, π_{svd} - КВВП технології ν , τ_{svd} - час використання технології ν , hc_{svd}^t - потужність установок технології ν , побудованих на час дослідження.

Програмний засіб MESSAGE має можливість враховувати кілька типів виробництва (перетворення) енергії в одному обмеженні. При цьому враховується коефіцієнт, який визначає максимальну доступну потужність окремої технології. Обмеження щодо використання потужності окремої технології визначається відповідно до наступного співвідношення:

$$\sum_{\sigma'\delta} rel_{\sigma'\delta}^{svd} \times \epsilon_{\sigma'\delta} \times z_{\sigma'\delta} \dots t - \sum_{\tau=t-\tau_{svd}}^{\min(t, k_{svd})} \Delta(\tau-1) \times \pi_{svd} \times f_i \times Yz_{svd} \dots \tau \leq hc_{svd}^t \times \pi_{svd}, \quad (1.3)$$

де $z_{svd} \dots lt$ - встановлена потужність технології ν у період часу t для регіону l , $Yz_{svd} \dots \tau$ - загальна встановлена потужність технології ν , ϵ_{svd} - ефективність технології ν щодо перетворення енергії на вході s до енергії на виході d , k_{svd} - період часу, у якому технологію ν може бути побудовано, π_{svd} - КВВП технології ν , τ_{svd} - час використання технології ν , hc_{svd}^t - встановлена потужність технології ν , яку побудовано до часового горизонту дослідження, $\pi(l_m, svd)$ - доля енергетичного продукту, якій постачається у окремий регіон l_m , $rel_{\sigma'\delta}^{svd}$ - відносна доля технології svd до загальної встановленої потужності енергетичної системи.

Обмеження щодо введення або виведення потужностей зі зберігання енергетичних ресурсів у окремому регіоні враховуються у MESSAGE шляхом визначення об'ємів їх щорічного використання (об'ємів з заповнення та з вивільнення сховища) згідно наступного співвідношення:

$$\epsilon_{sv} \times SIzsv.lt - \sum_{m=l+1}^{l+m_{sv}} \frac{1}{\zeta_{l,m}} \times Ozsv.lmt \geq 0, \quad (1.4)$$

де $SIzsv.lt$ - кількість палива s що потрапляє до сховища v в період часу l , $Ozsv.lmt$ - кількість палива s що виходить зі сховища v в період часу m , яке знаходиться у регіоні l , m_{sv} - кількість регіонів.

Кількість внутрішніх ресурсів, що видобувається на рік для окремого регіону, описується змінними, які характеризують об'єми щорічного їх споживання, та визначається як $Rzrgp..t$, де R - загальний ідентифікатор типу ресурсу, z - рівень, на якому визначається ресурс (зазвичай = R), r - ідентифікатор вилученого ресурсу, g - категорія споживання ресурсу r , p - еластичність попиту на ресурс, t - період часу.

Обмеження з щорічного використання внутрішніх ресурсів у окремий період часу визначається відповідно до наступного виразу:

$$\sum_g \sum_p RRrgp..t \leq Rrt, \quad (1.5)$$

де $Rrgt$ - об'єм ресурсу r , класу g , який може бути видобуто за рік, $RRrgp..t$ - щорічний видобуток ресурсу r , класу g і класу еластичності p в період t .

Обмеження з імпорту палива протягом всього горизонту дослідження визначається відповідно до наступного виразу:

$$\sum_p \sum_t \Delta t \times Izrcp..t \leq Irc, \quad (1.6)$$

де $Izrcp..t$ - річний об'єм імпорту r з країни c у період t , Irc - загальна обмеження імпорту ресурсу для країни c , Δt - тривалість періоду t в році.

Енергетичні потоки у MESSAGE моделюються виключно шляхом врахування потужностей різних технологій щодо перетворення та видобування енергетичних ресурсів, його імпорту та експорту, та відповідних обмежень. Ці обмеження гарантують, що витрачається лише кількість доступної енергії. Обмеження із споживання енергії визначається відповідно до наступного співвідношення:

$$\sum_{svd} \epsilon_{svd} \times \sum_{e=0}^{e_d} k_e \times U_{svd.e.t} + \sum_{sv\delta} \beta_{sv\delta}^d \times \sum_{e=0}^{e_\delta} k_e \times U_{sv\delta.e.t} \geq U_{d.t}, \quad (1.7)$$

де $U_{d.t}$ - річне споживання енергії типу d у період часу t , $U_{svd.e.t}$ - потужність технології v кінцевого використання енергії у період часу t , клас еластичності e у період часу t , ϵ_{svd} - ефективність технології кінцевого використання v у перетворенні s до d , $\beta_{sv\delta}^d$ - ефективність технології кінцевого використання v у виробництві продукту d із s , e_d - кількість етапів зниження попиту на енергію d (для врахування еластичності енергетичного продукту), k_e - фактор, що визначає відношення сукупного попиту на енергію типу d до попиту, зниженого до рівня e через еластичність попиту на d .

Імпорт та експорт вторинної енергії визначається відповідно до наступного співвідношення:

$$\sum_{rvs} \epsilon_{rvs} \times X_{rvs..lt} + \sum_{rv\sigma} \beta_{rv\sigma}^s \times X_{rv\sigma..lt} - \sum_{svs} T_{svs..lt} + \sum_{c,p} IX_{scp.lt} - \sum_{c,p} EX_{scp.lt} \geq 0, \quad (1.8)$$

де $X_{rvs..lt}$ - потужність технології v у області l у період часу t , ϵ_{rvs} - ефективність технології v при перетворенні енергоносія r у форму вторинної енергії s , $\beta_{rv\sigma}^s$ - ефективність технології v при перетворенні енергоносія r у побічний продукт s , $\beta_{sv\delta}^s$ - використання енергоносія s відносно палива σ технологією v .

У загальному вигляді цільову функцію з опису перетоків енергії у моделі енергетичної системи програмного засобу у MESSAGE можливо представити у даному наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
& \sum_t \left[\beta_m^t \Delta t \left\{ \sum_{svd} \sum_l z_{svd..lt} \times \epsilon_{svd} \times \left[ccur(svd,t) + \sum_i \sum_m ro_{svd}^{mlt} \times cari(ml,t) \right] + \right. \\
& \sum_{svd} \epsilon_{svd} \times \sum_{e=0}^{e_d} U_{svd.e.t} \times \epsilon_{svd} \times \left[k_e \times \left(ccur(svd,t) + \sum_m ro_{svd}^{mt} \times car2(m,t) \right) + \right. \\
& cred(d,e) + \sum_m ro_{svd}^{mt} \times car1(m,t) \left. \right] + \sum_{svd} \sum_{\tau=t-\tau_{svd}}^t \Delta \tau \times Yz_{svd..t} \times cfix(svd,\tau) + \\
& \sum_r \left[\sum_g \sum_l \sum_p Rzrgpl.t \times cres(rgpl,t) + \right. \\
& \left. \sum_c \sum_l \sum_p Izrcp.lt \times cimp(rcpl,t) - \sum_c \sum_l \sum_p Ezrcp.lt \times cexp(rcpl,t) \right] \left. \right\} + \\
& \beta_b^t \times \left\{ \sum_{svd} \sum_{\tau=t}^{t+t_d} \Delta(t-1) \times Yz_{svd..t} \times [ccap(svd,\tau) \times fri_{svd}^{t_d} \right. \\
& \left. \sum_i \sum_m rc_{svd}^{mt} \times cari(m,t) \times fra_{svd.m}^{t_d-t} \right] \left. \right\}, \tag{1.9}
\end{aligned}$$

де $z_{svd..lt}$ - річне споживання технології v області палива l та періоду t , $ccur(svd,t)$ - змінні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування технології v у період t , $car1(m,t), cari(ml,t)$ - коефіцієнти цільової функції, $U_{svd.e.t}$ - щорічне споживання палива s технології v у період t та клас еластичності e , $cimp(rcpl,t)$ - вартість імпорту енергетичного ресурсу r у період t з країни c у регіоні l та класу пружності p , $dr(i)$ - ставка дисконтування в періоді i у відсотках, $cfix(svd,t)$ - фіксовані операційні витрати на технічне обслуговування технології v у процесі життєвого циклу, $ccap(svd,t)$ - інвестиційна вартість технології v у період t , $Yz_{svd..t}$ - щорічні темпи введення потужності технології v у період t , fri_{svd}^n - частка інвестиції fri_{svd}^n , яка повинна бути сплачена продовж n періодів до першого року роботи технології, $Rzrgpl.t$ - річне споживання ресурсу r класу g , класу пружності P в області l і періоді t , $Izrcp.lt$ - річний імпорт палива r з країни c у область

навантаження l , період t та клас еластичності p , $Ezrcp.lt$ - річний експорт палива r до країни c у регіоні l , у періоді t та класу пружності p , $\beta_b^t = \prod_{i=1}^{t-1} \left[\frac{1}{1 + \frac{dr(i)}{100}} \right]^{\Delta i}$.

У своїй звичайній формі цільова функція містить суму всіх дисконтованих витрат, які можуть бути враховані. Витрати дисконтуються з року, на період якого проводиться розрахунок, до першого року часового інтервалу. Вартість, що характеризує будівництво технології генерації енергії, також дисконтуються з періоду, на якій проводиться дослідження, до першого року. Використовуючи засоби розподілу інвестицій або бухгалтерського обліку під час будівництва, ці витрати можуть бути розподілені протягом певних періодів часу.

1.6 Застосування аналізу чутливості до розгляду результатів моделювання ЯПЦ

У загальному визначенні, аналіз чутливості є оцінка зміни індикатора, що досліджується, відповідно до варіацій вхідних параметрів. Розрізняють аналіз чутливості за окремим індикатором та аналіз чутливості обраних сценаріїв. Аналіз чутливості за окремим індикатором проводиться при розгляді зміни економічного або технічного, обраного для вивчення, параметру. Наприклад, при розгляді інвестиційної привабливості проекту розраховується оптимальне значення економічного параметру чистого прибутку NPV (Net Present Value) у залежності від інших параметрів, які характеризують макроекономічний стан обраної системи (наприклад, величина капітальних витрат на будівництво технології). При проведенні аналізу чутливості розглядається вплив зміни декількох параметрів, що характеризують різні сценаріїв. Але у загальному випадку, аналіз чутливості враховує вивчення впливу зміни одного параметру на стан системи при незмінних значеннях інших параметрів, що характеризують об'єкт дослідження.

Відповідно до [51] при вивченні чутливості моделей виникають три типи завдань:

- прямі завдання аналізу чутливості - відомі межі зміни вхідних параметрів і необхідно оцінити їх вплив на вихідний параметр як функцію його стану;
- обернені завдання аналізу чутливості – за відомими змінами вихідних параметрів оцінюється межі зміни вхідних параметрів;
- завдання аналізу чутливості змішаного типу включають елементи прямих і обернених задач.

Розрізняють декілька варіантів реалізації аналізу чутливості, вибір кожного з котрих обумовлено ступенем невизначеності та аналізом прийнятності отриманих результатів дослідження. Всі варіанти реалізації аналізу чутливості об'єднуються методом аналітичної ієрархії (MAI) [52 - 54], якій ґрунтується на ієрархічному уявленні елементів складної проблеми та використовує жорсткі оцінки у шкалі відношень. Побудова ієрархії починається з окреслення проблеми дослідження. Далі будується ієрархія, що містить мету (корінь ієрархії), проміжні рівні (аспекти мети, критерії) та альтернативи.

Аналіз на чутливість від «найгіршої» до «найкращої» оцінки полягає у проведенні аналізу ієрархії для двох випадків: коли альтернатива, оцінка якої невідома, є найкращою, і коли вона є найгіршою серед альтернатив, оцінки яких відомі. Так ми можемо побачити, чи впливає зміна оцінки альтернативи на вектор глобальних пріоритетів і наскільки сильним є цей вплив. Щоб знайти найкращу оцінку, потрібно сформуванати нову матрицю попарних рівнянь, вилучивши з існуючої матриці рядок і стовпець, що відповідають альтернативі, оцінки якої невідомі. Розрахувавши власний вектор такої матриці, ми визначимо локальні пріоритети. З отриманих оцінок нас будуть цікавити максимальна і мінімальна, щоб визначити, як зміниться головний власний вектор пріоритетів ієрархії із зміною оцінок у межах від найкращої до найгіршої.

Аналіз на чутливість від «істотно гіршої» оцінки до «істотно кращої» є певною видозміною попереднього. Спочатку потрібно знайти найкращу і найгіршу альтернативу серед тих, оцінки яких відомі. Після цього необхідно побудувати два варіанти ієрархії. Повертаючись до початкової матриці, заповнюємо рядок і стовпець для альтернативи з невідомими оцінками значеннями, що відповідають оцінкам «значно краща за найкращу оцінку» і «значно гірший за найгіршу». Зрозуміло, що в обох випадках діагональний елемент дорівнюватиме одиниці. Отримавши два варіанти ієрархії, обчислюємо для них глобальні пріоритети. Якщо в обох випадках результати відрізняються незначно (зберігається порядок ранжування або оцінки альтернатив в багатьох випадках близькі), то оцінка альтернативи, яка була невідома, є неважливою або мало важливою для ієрархії загалом і не впливає на глобальні пріоритети.

Аналіз «середньої» оцінки є доповненням до аналізу на чутливість від «найгіршої» оцінки до «найкращої». Середню оцінку визначаємо як середнє геометричне серед відомих оцінок. Щоб знайти середню оцінку, потрібно спершу сформулювати нову матрицю попарних порівнянь, вилучивши з існуючої матриці рядок і стовпець, що відповідають альтернативі, оцінки якої невідомі. Обчисливши середнє геометричне елементів кожного рядка (один із способів визначення власного вектора (локальних пріоритетів)) такої матриці, ми визначимо середні оцінки. Ці оцінки записуємо у стовпець, що відповідає альтернативі, оцінки якої не відомі. А у відповідний рядок записуємо обернені значення. Діагональний елемент, звичайно, дорівнює одиниці. Так отримуємо новий варіант ієрархії. Порівнявши вектор пріоритетів такої ієрархії з векторами двох ієрархій (з найкращою і найгіршою оцінкою невідомого елемента), можна зробити висновки про те, чи альтернатива з невідомими оцінками зміщена у бік кращих чи гірших альтернатив. Якщо оцінка цієї альтернативи у векторі пріоритетів є середньою між оцінками, отриманими в результаті аналізу за «найкращою» та «найгіршою» альтернативами, то можна вважати, що оцінки цієї альтернативи розподілені рівномірно. Інакше можна робити висновок про зміщення оцінок у бік кращих або гірших оцінок.

Разом з тим можна стверджувати, що не існує загального алгоритму з аналізу чутливості для обраного об'єкту дослідження. Дане ствердження характерно як для оцінки інвестиційних проектів, так і для оцінок впровадження нових типів реакторних установок або порівняння різних сценаріїв реалізації ЯПЦ. Аналіз чутливості проводиться на підставі оцінки зміни деякого вихідного параметру при варіаціях вхідних параметрів. Таким чином, проводиться визначення критичних показників, 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 являється темою окремого дослідження. У роботах [55 - 60] розподіл значень вхідних параметрів відповідає рівномірної їх зміні на деяку обрану величину $\pm M$ (%) від базового значення. Застосування даного підходу широко поширене у світовій практиці.

Аналіз чутливості результатів моделювання ЯПЦ у застосуванні до розгляду техніко-економічних параметрів об'єкту дослідження має основний недолік - при застосуванні у класичному наближенні зміна вхідного параметру моделі не дозволяє врахувати напрямок розвитку системи у часі. Це фактично призводить до неможливості врахувати динамічні властивості об'єкту дослідження та, таким чином, забезпечити адекватність інтерпретації отриманих у ході аналізу результатів розрахунків.

При розгляді варіантів розвитку ядерно-паливних циклів або окремих його складових (наприклад, будівництво нових енергоблоків АЕС або інфраструктури з поводження з відпрацьованим ядерним паливом), виникає необхідність у вивченні умов реалізації проекту з урахуванням інших, відмінних від попередніх (базових), вхідних умов. Приймаючи значну вартість реалізації елементів ЯПЦ, застосування аналізу чутливості дозволяє дослідити розвиток окремого ЯПЦ або провести порівняльну оцінку впливу різних значень окремого параметру на варіанти розвитку декількох ЯПЦ.

1.7 Аналіз трендів

Відповідно до класичного розуміння [61 - 62], тренд це загальна тенденція при різнонаправленому русі. Вивчення трендів набуло широкого використання при прогнозуванні зміни економічних факторів у часі. При цьому, завдання включає пошук пріоритетного напрямку зміни параметра що досліджується.

При формуванні прогнозів за допомогою екстраполяції зазвичай виходять із статистично створених тенденцій зміни тих чи інших кількісних характеристик об'єкта. Екстраполюються оціночні функціональні системні і структурні характеристики. Екстраполяційні методи є одними з найпоширеніших і найбільш розроблених серед всіх методів прогнозування.

Можна створити деяке уявлення про послідовність дій при статистичному аналізі тенденцій і екстраполюванні, яке полягає в тому що необхідно зробити вибір системи параметрів, уніфікацію різних одиниць виміру, що відносяться до кожного параметру окремо, провести збір і систематизацію даних та виявити тенденції або симптоми зміни досліджуваних величин. У екстраполяційних прогнозах особливо важливою є не стільки передбачення конкретних значень досліджуваного об'єкта або параметра в такому-то році, скільки своєчасне фіксування об'єктивно намічених зрушень, що лежать в основі назриваючих тенденцій.

Під трендом розуміється характеристика основної закономірності руху в часі, в деякій мірі вільною від випадкових впливів. Тренд це тривала тенденція зміни показників. При розробці моделей прогнозування тренд виявляється основною складовою прогнозованого часового ряду, на яку вже накладаються інші складові. Результат при цьому пов'язаний виключно з часом. Передбачається, що через певний час можна виразити вплив всіх основних факторів.

Під тенденцією розвитку розуміють деякий його загальний напрямок, довготривалу еволюцію. Зазвичай тенденцію прагнуть навести у вигляді більш-менш гладкою траєкторії.

Аналіз показує, що жоден з існуючих методів не може дати достатньої точності прогнозів на 20-25 років при розгляді економічних параметрів.

Разом з тим, при аналізі ЯПЦ враховуються економічні та технічні параметри, що дає можливість застосувати наявні методи аналізу трендів, наприклад, рівняння прямої лінії тренду. Відповідно до [63] рівняння має вид:

$$\hat{y}_i = a + bt_i, \quad (1.14)$$

де \hat{y}_i – тренд для періоду або моменту з номером t_i ; a – вільний член рівняння, який дорівнює середньому рівню тренду для періоду (моменту) з нульовим номером t_i ; b – головний параметр лінійного тренду – середня абсолютна зміна за прийняту в ряді одиницю часу.

Величини параметрів a і b визначаються за методом найменших квадратів шляхом прирівнювання перших похідних функції

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bt_i)^2 \text{ до нуля.}$$

$$\frac{df}{da} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bt_i) \cdot (-1) = 0, \quad (1.15)$$

$$\frac{df}{db} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bt_i) \cdot (-t) = 0. \quad (1.16)$$

Після алгебраїчних перетворень отримуємо два «нормальних рівняння» методу найменших квадратів для прямої:

$$na + b \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n y_i, \quad (1.17)$$

$$a \sum_{i=1}^n t_i + b \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i t_i). \quad (1.18)$$

Вирішуючи ці рівняння з двома невідомими за даними фактичного часового ряду y_i ($i = 1 - n$), отримуємо значення a і b . Якщо номери періодів (моментів) часу відраховуються від початку ряду так, що перший період (момент) позначений номером $t = 1$, то вільний член a є рівнем тренду для

попереднього періоду (моменту), а не першого в ряду, як часто помилково вважають. Для першого періоду рівень тренду \hat{y}_1 дорівнює $a + b$, для другого $\hat{y}_2 = a + 2b$ і т.д.

1.8 Висновки до розділу 1

Невирішеність напрямку кінцевого поведіння з ВЯП визначається світовою спільнотою як вагомий чинник, що негативно впливає на привабливість ядерної енергетики. Це, у свою чергу, потребує запровадження інших ЯПЦ, побудованих на складних організаційно-технічних схемах з перерозподілу ядерних матеріалів.

У світовій практиці набули широкого використання комп'ютерні програми для аналізу ЯПЦ, враховуючи необхідність оперування значним обсягом вхідної техніко-економічної інформації. Для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ знайшли широке застосування оптимізаційні розрахункові програми, які у своїй більшості мають обмеження щодо аналізу складних ЯПЦ.

Приймаючи до уваги строк експлуатації АЕС, аналіз ЯПЦ проводиться у значному часовому інтервалі дослідження. Результати досліджень залежать від адекватності прогнозної моделі ЯПЦ, що у більшості випадків забезпечується урахуванням взаємозв'язків між потоками ядерних матеріалів та формуванням достатньої первинної техніко-економічної інформації. Також, необхідним є врахування тренду змін первинної інформації у всьому прогнозному інтервалі дослідження. Таким чином, потребуватиме розроблення метод формування первинної інформації для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ.

У загальній практиці визначення прийнятного ЯПЦ забезпечується застосуванням відповідної порівняльної оцінки за єдиним критерієм, що звужує область дослідження та погіршує показовість результатів. В умовах обмеженості первинної інформації, для забезпечення адекватності результатів прогнозного моделювання доцільним є застосування критеріальної порівняльної оцінки ЯПЦ.

Це потребує розроблення методу агрегації отриманих результатів та інтерпретації отриманих результатів для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ.

Таким чином, за результатами аналізу наявної інформації ідентифіковано такі недоліки наявних методів та засобів моделювання ЯПЦ, а саме:

- сучасні програмні засоби та розроблені комп'ютерні моделі засновані на розгляді відкритого ЯПЦ, що призводить до обмежень у їх застосуванні для всебічного аналізу частково-замкненого та замкненого ЯПЦ;

- для підготовки первинної інформації застосовуються незмінні у часі характеристики, що призводить до проблем забезпечення адекватності моделей ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання;

- відсутній математичний підхід до агрегації результатів критерійної порівняльної оцінки ЯПЦ, який дозволяє співставити ЯПЦ за переліком різнофізичних критеріїв з метою забезпечення повної інтерпретації результатів прогнозного моделювання;

- відсутній математичний підхід до застосування аналізу чутливості результатів моделювання ЯПЦ на основі варіативності вхідного параметру для врахування змінних у часі їх техніко-економічних параметрів та забезпечення адекватності моделі ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання.

Тому, актуальним науково-практичним завданням, що потребує вирішення, є удосконалення методів організації процесу прогнозного моделювання ЯПЦ шляхом застосування аналізу трендів до формування первинної інформації з розробки комп'ютерних моделей, розробки відповідних математичних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, а також дослідження моделей у різних режимах їх функціонування для інтерпретації результатів прогнозного моделювання.

**РОЗДІЛ 2. БАЛАНС ЯДЕРНОГО МАТЕРІАЛУ У ЯПЦ.
МЕТОД КРИТЕРІЙНОЇ ОЦІНКИ ЯПЦ.
МЕТОДИ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯПЦ**

2.1 Баланс ядерного матеріалу у ЯПЦ

Вихідна система рівнянь з опису зв'язків ядерних матеріалів в диференціальному вигляді визначає процес паливозабезпечення енергетичних реакторів в конкретному регіоні [64 - 65]:

$$F_{ik}^j(t) \frac{dN_i^{c^j}(t)}{dt} + B_{ik}^j(t) N_i^j(t) = q_{ik}^{e^j}(t) + q_{ik}^{r^j}(\vec{N}(t)), \quad (2.1)$$

де $i=1..n$ - номер установки, $j=1..m$ - номер регіону, $k=1..l$ - тип палива, $F_{ik}^j(t)$ – первинне завантаження ядерного палива в реактор, $B_{ik}^j(t)$ – щорічні потреби у ядерному паливі.

Ліва частина рівняння (2.1) визначає попит на паливо заданого типу, який складається за рахунок потреб у забезпеченні введення нових потужностей (перший доданок), а також у заміні ВЯП в енергетичних реакторах (другий доданок). Права частина рівняння (2.1) описує наявність конкретного типу ядерного палива, що визначається структурою паливостачання в регіоні, що розглядається, та можливістю імпорту ядерного палива з інших регіонів.

Введемо наступні позначення: $N(t)$, $N^c(t)$, $N^d(t)$ – відповідно встановлена потужність реакторів в році t , повна потужність реакторів, введених до року t , і повна виведена потужність реакторів до року t , які пов'язані таким співвідношеннями:

$$N(t) = N^c(t) - N^d(t); N^d(t) = N^c(t - T_l); N^d(t) = \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{t}{T_l} \rfloor} N(t - iT_l) \quad (2.2)$$

У загальному випадку сума усіх потужностей АЕС в j -му регіоні має бути не менше потреб в АЕС в цьому регіоні. Ця вимога накладає наступне обмеження:

$$N_{\text{ЯЕ}}^j(t) \leq \sum_i N_i^j(t). \quad (2.3)$$

Величина $q_i^e(t)$ у рівнянні (2.1) визначає витрату i -го запасу ядерного палива, на яку можуть бути накладені певні обмеження залежно від постановки конкретного завдання. Так, наприклад, обмеження у вигляді

$$\int_{T_1}^{T_2} q_i^e(t) dt \leq Q_i \quad (2.4)$$

відповідає обмеженню на загальну кількість палива типу i , яке може бути спожите протягом проміжку часу $[T_1, T_2]$. Якщо відбувається зростання ємності джерела на відому величину $\Delta Q_i(t_j)$ в послідовні моменти часу t_j , то обмеження (2.4) прийме вигляд:

$$\int_{T_1}^{T_2} q_i^e(t) dt \leq Q_i + \Delta Q_i(t_j). \quad (2.5)$$

Витрату вторинного ядерного палива, напрацьованого на АЕС, $q_{ik}^{ij}(\vec{N}(t)) = q_{ik}^{ij} \left(\left\{ N_j^i(t) \right\}_{\substack{i=1..N \\ j=1..M}} \right)$, надамо у вигляді:

$$q_{ik}^{rj}(\vec{N}(t)) = \hat{f}_{ik}^j(\vec{q}^{\text{out}}(\vec{N}(t))). \quad (2.6)$$

Оператор $\hat{f}_{ik}^j(\cdot)$ зв'язує паливні потоки, що виходять з реакторів із паливними потоками, що входять до реактору та містить в собі інформацію про особливості організації структури ЯПЦ і стратегії поводження з матеріалами, що діляться.

Паливні потоки, що виходять з реактора, можуть бути наведені у наступному вигляді:

$$q_{ik}^{\text{out}j}(N_i^j(t)) = F_{ik}^j(t) \frac{dN_i^{dj}(t)}{dt} + B_{ik}^j(t) N_i^j(t). \quad (2.7)$$

Перший доданок рівняння (2.7) визначає останнє вивантаження палива з реакторів, що виводяться з експлуатації. Другий доданок відповідає щорічному вивантаженню ВЯП з енергетичних реакторів, що експлуатуються.

Будь-який елемент ЯПЦ можливо описати за допомогою матеріальних потоків, що входять до нього та виходять з нього. За відомими потоками можливо розрахувати кількість накопиченого матеріалу на відповідному елементі ЯПЦ:

$$Q(t) = Q_0 + \int_{t_0}^t (q^{in}(t) - q^{out}(t)) dt, \quad (2.8)$$

де $q^{in}(t)$ – вхідний потік, $q^{out}(t)$ – вихідний потік.

Зрозуміло, що у разі моделювання елемента для відкритого ЯПЦ без акумуляції ядерних матеріалів, потоки, що входять і виходять, за часом рівні між собою:

$$q^{in}(t) = q^{out}(t). \quad (2.9)$$

Часова затримка тривалістю T_{lag} (у загальному випадку залежить від часу t) в певній ланці ЯПЦ імітується наступним чином (за умови відсутності трансформації форми потоку, що входить):

$$q^{out}(t) = q^{in}(t - T_{lag}). \quad (2.10)$$

Типовим обмеженням, що має бути враховано при моделюванні, є співвідношення, що забезпечує невід’ємний запас ядерного матеріалу у сховищі:

$$\int_{-\infty}^t q^{out}(t') dt' \leq \int_{-\infty}^t q^{in}(t') dt'. \quad (2.11)$$

Врахування обмеженості потужності підприємств ЯПЦ може бути здійснене наступним чином:

$$q^{in}(t) \leq C(t) \quad \text{або} \quad q^{out}(t) \leq C(t) \quad (2.12)$$

де $C(t)$ – гранична виробнича потужність елемента ЯПЦ, на вхід якого потрапляє потік $q^{in}(t)$ (або з якого виходить потік $q^{out}(t)$). З урахуванням цього обмеження може бути визначено потік, який виходить з елемента ЯПЦ, що розглядається.

У разі потреби також можна описати радіоактивний розпад ізотопів в зовнішньому паливному циклі. Нехай $m_i(t)$ – швидкість напрацювання i -го ізотопу в окремому ЯПЦ, λ – постійна розпаду. Тоді сумарна кількість ізотопу $M_i(t)$ з урахуванням його радіоактивного розпаду можна навести наступним чином:

$$M_i(t) = \int_{-\infty}^t m_i(t') \exp(-\lambda(t-t')) dt'. \quad (2.13)$$

Швидкість зміни ізотопу $M_i(t)$ у циклі визначається наступним рівнянням:

$$\bar{m}_i(t) = \frac{d}{dt} M_i(t) = m_i(t) - \int_{-\infty}^t \lambda m_i(t') \exp(-\lambda(t-t')) dt'. \quad (2.14)$$

На основі розрахованих потреб в різних видах палива за відомими співвідношеннями можна визначити потреби у природному урані, послугах з конверсії, збагачення, виробництва палива та ін.

Можливості ресурсної бази визначають масштаби розвитку енерготехнології у ЯПЦ. Передісторія витрат і прогностичні потреби в ресурсах з урахуванням факту їх обмеженості визначають момент необхідних своєчасних заміщень енергоресурсу, які не допускають виникнення проблем з паливозабезпеченням у перспективі, зокрема, за інтервалом прогнозування. Як правило, в сучасних моделях розвитку ЯПЦ врахування цієї обставини не відбувається, тобто припускається, що ресурси урану необмежені.

Разом з тим, питання ресурсного забезпечення розвитку ядерної енергетики призводить до необхідності розгляду складних ЯПЦ, для яких необхідне врахування не тільки природного урану як вхідного паливного ресурсу, а також розгляд наявних вторинних паливних ресурсів у вигляді урану та плутонію, який можливо отримати після переробки ВЯП.

При розгляді складних ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання необхідним є визначення залежності потреб у потужностях складових елементів ЯПЦ від початкового потоку природнього урану. Це фактично визначатиме витратну частину, що може призводити до доцільності або відсутності доцільності розгортання відповідного ЯПЦ. При цьому, природній уран на вході до ЯПЦ визначатиме обсяги ВЯП на виході з ЯПЦ та відповідне напрацювання урану та плутонію, які буде отримано після переробки ВЯП у разі реалізації відповідних складних схем паливних циклів.

Основні обмеження, які враховуються при рішенні системи лінійних рівнянь з опису ЯПЦ, містять баланс видобування, експорту та імпорту паливних ресурсів, баланс потужностей з виробництва електроенергії, баланс використання паливних ресурсів та інші обмеження. У загальному випадку потік ядерних матеріалів у відкритому ЯПЦ можливо представити у наступному вигляді:

$$M_f = \frac{(e_p - e_t)}{(0.711\% - e_t)} \cdot M_p, \quad (2.15)$$

де M_f – маса природнього урану, що потрібна для виробництва маси M_p збагаченого урану. При розгляді сучасної АЕС на теплових нейтронах $M_p = 10 \times F_{ik}^j(t)$ від первинного завантаження палива в реактор та фактично дорівнює $B_{ik}^j(t)$ щорічному перевантаженню палива у реакторі.

Врахування балансу паливного ядерного матеріалу у відкритому ЯПЦ забезпечується відповідністю кількості палива, що завантажується у активну зону енергоблоків АЕС, до палива, що отримано з боку виробника з використанням природнього урану як початкового ресурсу:

$$M = M_p, \text{ де } M = \frac{N_e \cdot \varphi \cdot 365}{\eta \cdot B_d} \quad (2.16)$$

де Ne – потужність енергоблоку АЕС (електрична), Vd – середнє вигорання ядерного палива, φ – КВВП, η – коефіцієнт корисної дії енергоблоку.

Баланс ядерного матеріалу для інноваційних паливних циклів можливо визначити виходячи з понять частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, у яких як початковий паливний ресурс використовується уран та плутоній, що отримано після переробки ВЯП АЕС. Таким чином враховується взаємозв'язок між початковим та вторинним паливними ресурсами у ЯПЦ. Обмеження щодо балансу у потоці ядерного матеріалу накладаються на збагачення ядерного палива та на використання вторинного ресурсу:

$$SWU \geq 0 \quad (2.17)$$

$$Mp \geq MPu + MRU \quad (2.18)$$

де SWU - кількість одиниць роботи, яку необхідно витратити для отримання збагаченого урану масою Mp , а

$$M_{RU} = (1 - f_R) \cdot (x_{U235} + x_{U236} + x_{U238}) \quad (2.19)$$

$$M_{Pu} = (1 - f_R) \times (x_{Pu238} + x_{Pu239} + x_{Pu240} + x_{Pu242} + x_{Pu241} \cdot \exp(-\lambda_{Pu241} \cdot t_R)) \quad (2.20)$$

відповідно маса урану та плутонію після переробки відпрацьованого ядерного палива.

Враховані обмеження щодо використання плутонію у частково-замкненому ЯПЦ та урану у замкненому ЯПЦ. На підставі цього, обґрунтовано підхід до коректного моделювання різних ЯПЦ з застосуванням програмного засобу MESSAGE.

2.2 Формування індикаторів порівняльної оцінки ЯПЦ

У рамках прогнозної оцінки важливим є обґрунтування вибору та формування широкого переліку технічних та економічних індикаторів, які дозволять провести всебічну оцінку ЯПЦ з застосуванням розрахункових програм. Відповідно до наявної практики прогнозні дослідження економічних систем проводяться за одним показником - ціною. Такий підхід не може вважатись прийнятним при розгляді ЯПЦ враховуючи його складну організаційно-технічну структуру. Потрібним є розгляд набору індикаторів, які характеризують різні аспекти функціонування ЯПЦ та дозволяють застосувати комп'ютерні розрахункові засоби у тому числі, для аналізу можливості ЯПЦ у забезпеченні цілей стійкого розвитку [66].

На даний час проведено ряд міжнародних досліджень з розвитку ядерної енергетики та формуванням індикаторів оцінки [67 - 71], які не можуть бути застосовні до оцінки ЯПЦ враховуючи необхідність застосування більшого набору параметрів оцінки, так як ядерна енергетика є лише складовою паливного циклу. Таким чином, порівняльна оцінка ЯПЦ доцільна з використанням індикаторів, які дозволяють дослідити ЯПЦ за економічними, екологічними, гарантії нерозповсюдження ядерних матеріалів.

Оцінка економіки ЯПЦ враховує аналіз витрат на створення, експлуатацію та виведення з експлуатації його складових елементів, та оцінку відповідних фінансових ризиків [72]. Зазвичай у якості чисельного індикатора використовується приведена вартість виробленої електроенергії (LCOE) [73]. 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 (LUFC). Цей параметр може бути описаний з використанням рівняння 2.21:

$$LCOE = LUAC + LUOM + LUFC, \quad (2.21)$$

де

$$LUAC = \frac{\left(\frac{CI}{P}\right)_{ON} + \left(\frac{CI}{P}\right)_{DC}}{Lh_{FP}} + LUAC_{BF} + LUAC_D \quad (2.22)$$

$$LUOM = \frac{\left(\frac{O \& M}{P}\right)_{FIX}}{8760 \cdot Lf} + \left(\frac{O \& M}{KWh}\right)_{VAR} \quad (2.23)$$

$$LUFC = \frac{\left(\frac{\$}{Kg}\right)_{FE,1^{st}Core}}{\eta \cdot \delta_{th} \cdot Lh_{FP}} + \frac{\left(\frac{\$}{Kg}\right)_{FE,REF}}{Q \cdot \eta} + \frac{\left(\frac{\$}{Kg}\right)_{SF}}{Q \cdot \eta} \quad (2.24)$$

Критерієм, що також впливає на LCOE та характеризує ЯПЦ є параметр, який описує поведження з відходами. Збільшення виробництва електроенергії на АЕС призводить до прямопропорційних витрат на поведження з ВЯП, та відповідно до рівняння 2.21, до збільшення LCOE.

Критерій з аналізу стійкості ЯПЦ до розповсюдження ядерних матеріалів залежить від внутрішніх властивостей та зовнішніх заходів, які необхідно впроваджувати протягом усього життєвого циклу ЯПЦ, щоб гарантувати, що система стане непривабливим засобом для отримання вільного ядерного матеріалу. Взагалі, традиційні показники фізичного захисту важко оцінити для ЯПЦ через необхідність детального проектування супутніх споруд. Разом з тим, можливо говорити про необхідність мінімізації накопичення вільних форм урану та плутонію [74].

Критерій з аналізу впливу на навколишнє середовище характеризує використання природних ресурсів та вплив ЯПЦ на навколишнє середовище, що може визначатись кількістю корисної енергії, виробленої системою (від видобутку до сьогодні захоронення, включаючи збагачення, експлуатацію реактора, розділення) на одиницю видобутого природного урану та інше.

При формуванні переліку КІ враховується можливість підтвердження досягнення цілей дослідження. Попередні оцінки з ЯПЦ, виконані у рамках

міжнародних проектів INFCE та GEN IV, були орієнтовані на опис ядерної технології. Разом з тим, при комплексному аналізі ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання використання всіх раніше сформованих КІ може призводити до надмірного витрачання розрахункового часу та до аналізу наявності технології у ЯПЦ, але не до оцінки самого ЯПЦ, що знижує до нуля цінність порівняльної оцінки. Також враховується досвід застосування теорії багатозначних рішень (MAVT) [75 - 76] при опрацюванні результатів аналізу КІ з використанням розрахункових засобів.

Таким чином, враховуючи цілі прогнозої оцінки ЯПЦ, приймаючи до уваги необхідність застосування розрахункових програмних засобів, набір КІ для порівняльної оцінки ЯПЦ повинен забезпечити:

- аналіз ЯПЦ на підставі кількісної оцінки;
- проведення всебічного аналізу ЯПЦ на підставі оцінки його технічних та економічних показників;
- однозначну характеристику організаційно-технічної структури ЯПЦ та взаємозв'язок його складових елементів;
- не враховувати критерії оцінки енергетичної системи у цілому.

У рамках міжнародних проектів МАГАТЕ розроблено методологічний інструментарій з оцінки інноваційних РУ та відповідних паливних циклів. Застосування документу передбачає наявність значного об'єму початкової інформації, проведення аналізу на предмет відповідності обраної технології критеріям стійкого розвитку (діяльність, яку проводиться на даний час, не повинна призводити до відповідальності наступних поколінь) та включає значну кількість індикаторів оцінки. Використання методології МАГАТЕ INPRO не являється оптимальним для порівняльного розгляду ЯПЦ без урахування відповідних РУ.

У рамках проекту МАГАТЕ GAINS розроблено та верифіковано так звані ключові індикатори і параметри оцінки для використання у рамках аналізу динамічних ядерно-енергетичних систем, які в більший мірі відповідають цілям

порівняльної оцінки різних типів ЯПЦ. Але набір індикаторів не включає якісні оцінки з типу реакторів, які застосовуються для виробництва електроенергії, кількості введення/виведення з експлуатації аналіз радіоактивності ВАВ, кількості ядерного палива та ВАВ, що перевозиться між країнами та оцінку необхідних науково-технічних робіт з подальшого розвитку частково-замкненого та замкненого ЯПЦ.

Згідно протоколу №1 засідання науково-технічної ради ДП «НАЕК «Енергоатом» від 22.04.2015 [77] розроблено та погоджено критерії оцінки енергоблоків різних типів для подальшої можливості їх імплементації в Україні. Взаємозв'язок з ЯПЦ включає перелік критеріїв, які дозволяють провести порівняльну оцінку ядерно-паливних циклів з урахуванням «фактору важливості». Критерії відповідають наведеним у проекті МАГАТЕ GAINS, але також враховують оцінку ЯПЦ з урахуванням РУ.

Враховуючи цілі порівняльної оцінки при застосуванні прогностичного аналізу ЯПЦ, загальний перелік критеріїв оцінки ЯПЦ наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Критерії оцінки варіантів ЯПЦ

| № індикатора | КІ | Одиниці вимірювання/ характеристики | Оцінка |
|--------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1. | Середнє вироблення енергії на одиницю маси природного урану | МВт×рік/т ВМ | Більш високе значення відповідає кращому виконанню критерія |
| 2. | Приведене споживання природного урану | т ВМ/МВт×рік | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |
| 3. | Приведена маса ВЯП що накопичується за рік на одиницю енергії | т ВМ/МВт×рік | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т ВМ | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т ВМ | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т ВМ | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |

| | | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7. | Обсяг накопичення ВАВ (у вигляді продуктів поділу FPr) після переробки ВЯП. Не враховує технологічні обсяги ВАВ від переробки | т ВМ | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | Включаючи ізотопний склад. Більш низький обсяг накопичення відповідає кращому виконанню критерія |
| 9. | Приведені необхідні потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/МВт | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |
| 10. | Необхідні потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т ВМ/рік/МВт | Включаючи розгляд числа ТВЗ підживлення |
| 11. | Приведена вартість виробництва електроенергії | долл США/кВт×г | Більш низьке значення відповідає кращому виконанню критерія |

Рекомендації щодо формування ключових індикаторів при проведенні прогнозного моделювання для порівняльної оцінки ЯПЦ наведено в таблиці 2.2. Ці рекомендації спрямовані на зменшення ризику чутливості альтернатив та були перевірені у низці досліджень для демонстрації їх ефективності.

Таблиця 2.2 - Рекомендації з формування ключових індикаторів (КІ)

| Параметр | Рекомендація | Пояснення |
|-----------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Загальна кількість КІ | Не більш ніж 20 | <ul style="list-style-type: none"> - Можливість прогнозного аналізу ЯПЦ при обмеженій кількості вхідних даних; - Застосування взаємозалежності параметрів, що характеризують ЯПЦ; - Зменшення розрахункового часу на оцінку взаємозалежних КІ |
| Розмірність КІ | Використання кількісних (не якісних) показників | <ul style="list-style-type: none"> - Збільшення адекватності КІ; - Обмеження застосування «експертного судження»; - Можливість верифікації результатів розрахунків КІ з застосуванням комп'ютерних програмних засобів; - Оперування ваговими коефіцієнтами для кожного КІ |

| | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Оцінка ЯПЦ за основними властивостями | <ul style="list-style-type: none"> - Економіка - Вплив на навколишнє середовище - Гарантії нерозповсюдження ядерних матеріалі - Зрілість технології | <ul style="list-style-type: none"> - Всебічність прогновної оцінки ЯПЦ; - Використання параметрів ідентифікації стійкості ЯПЦ у понятійному полі МАГАТЕ; - Врахування «непрямих» критеріїв оцінки типів генерації у ЯПЦ; - 3-рівневе дерево цілей, прямий метод та ієрархічність вагових коефіцієнтів |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

2.3 Метод агрегації результатів критерійної порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком різнофізичних КІ

Одним з етапів порівняльної оцінки є математична обробка результатів прогнозного моделювання з застосуванням критерійного аналізу. Поглиблення аналізу параметрів, що характеризують ЯПЦ, призводить до необхідності оперування переліком критеріїв, які мають різну фізичну природу та розмірності (вартість, об'єм, вага, тощо). Збільшення чисельного значення одного індикатора може призводити до зменшення іншого, що часто не відповідатиме завданню порівняльної оцінки ЯПЦ (наприклад, ризик реалізації інноваційної системи та вигода, що може бути отримана шляхом її реалізації).

У рамках проекту МАГАТЕ KIND [78] розроблено та верифіковано комп'ютерний розрахунковий засіб критерійної оцінки ЯПЦ KIND-ET, у якому алгоритм порівняльної оцінки побудовано на використанні методу MAVT. Застосування KIND-ET передбачає тривалу роботу з заповнення відповідних форм вхідних даних та використання машинного часу на проведення відповідних розрахунків. Це у свою чергу може призводити до накопичення помилок та збільшення ризику отримання невідповідного результату. У випадку порівняльної критерійної оцінки ЯПЦ проведення агрегації результатів розрахунків КІ є затратним за часом завданням.

На відміну від визначених вище методів агрегації КІ для цілей прогновної порівняльної оцінки більш продуктивним є застосування наступного математичного алгоритма.

Передбачається, що всі КІ є рівнозначними за вагою. Таким чином, виключається експертне судження щодо впливу параметру на загальний результат порівняльної оцінки ЯПЦ. Формуються у вигляді таблиці розрахункові значення різнофізичних параметрів $P_{i,j}$ (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3 – Формування вхідних чисельних (розмірних) КІ

| № критерія | ЯПЦ 1 | ЯПЦ 2 | ... | ЯПЦ j |
|------------|-----------|-----------|-----|-----------|
| 1 | $P_{1,1}$ | $P_{1,2}$ | | $P_{1,j}$ |
| 2 | $P_{2,1}$ | $P_{2,2}$ | | $P_{2,j}$ |
| ... | | | | |
| i | $P_{i,1}$ | $P_{i,2}$ | | $P_{i,j}$ |

Представлення параметрів $P_{i,j}$ у матричному вигляді має наступний вигляд:

$$[P_{i,j}] = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,j} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i,1} & P_{i,2} & \dots & P_{i,j} \end{bmatrix}, \text{ де } P_{i,j} \text{ – параметр } i \text{ в сценарії } j$$

Враховуючи необхідність проведення порівняльної оцінки ЯПЦ за різнофізичними параметрами, приведення КІ до нерозмірних одиниць та визначення відповідного чисельного рейтингу ЯПЦ проводиться шляхом формування таблиці у наступному вигляді (таблиця 2.4):

Таблиця 2.4 - Формування вхідних чисельних (безрозмірних) КІ

| № критерія | ЯПЦ 1 | ЯПЦ 2 | ... | ЯПЦ j |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-----|------------------------|
| 1 | $I_{1,1}$ | $I_{1,2}$ | ... | $I_{1,j}$ |
| 2 | $I_{2,1}$ | $I_{2,2}$ | ... | $I_{2,j}$ |
| ... | ... | ... | ... | |
| i | $I_{i,1}$ | $I_{i,2}$ | ... | $I_{i,j}$ |
| Рейтинг сценарію j, R_j | $R_1 = \sum_i I_{i,1}$ | $R_2 = \sum_i I_{i,2}$ | ... | $R_j = \sum_i I_{i,j}$ |

Представлення параметрів $I_{i,j}$ у матричному вигляді має наступний вигляд:

$$[I_{i,j}] = \begin{bmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & \dots & I_{1,j} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & \dots & I_{2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{i,1} & I_{i,j} & \dots & I_{i,j} \end{bmatrix}, \text{ де } I_{i,j} - \text{значення параметра } i \text{ сценарію } j$$

Кількісні значення параметрів $I_{i,j}$ визначаються с застосуванням наступного рівняння:

$$I_{i,j} = \begin{cases} \frac{P_i^{max} - P_{i,j}}{P_i^{max} - P_i^{min}}, \text{ якщо } P_i^{max} \text{ є «гіршим» значенням в наборі параметрів з критерію } i \\ \frac{P_{i,j} - P_i^{min}}{P_i^{max} - P_i^{min}}, \text{ якщо } P_i^{min} \text{ є «гіршим» значенням в наборі параметрів з критерію } i \end{cases} \quad (2.27)$$

де

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

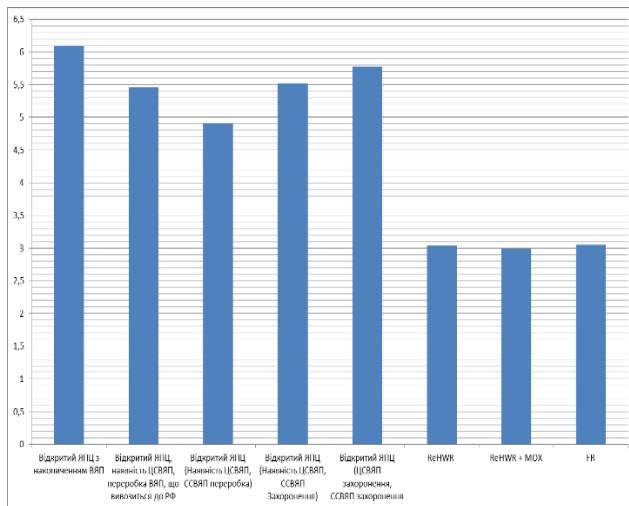
$$P_i^{min} = \min(P_{i,j}), \text{ для критерію } i, \text{ де } i = 1 \dots n.$$

Сума безрозмірних індикаторів $I_{i,j}$ для сценарію j визначатиме рейтинг сценарію:

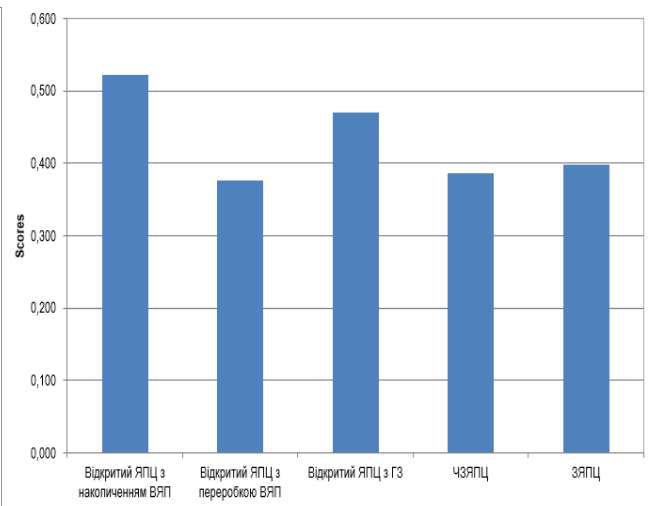
$$R_j = \sum_{i=1}^n I_{i,j} \quad (2.28)$$

Порівняльну оцінку наведеного математичного алгоритму з результатами аналізу ЯПЦ з використанням методу MAVT наведено на рисунку 2.1.

Спостерігається кореляція результатів порівняльних розрахунків з застосуванням інструментарію МАГАТЕ KIND-ET на основі методу MAVT та розробленого у рамках дисертаційної роботи методу багатокритеріальної оцінки ЯПЦ.



(a)



(б)

Рисунок 2.1 Співставлення результатів використання методу багатокритеріальної оцінки (а) та KIND-ET (б)

2.4 Метод аналізу трендів з формування первинної інформації для розробки комп'ютерних прогнозних моделей ЯПЦ

На даний час відомо багато методів та моделей прогнозування, у тому числі для аналізу технічних та економічних показників. Всі методи можуть бути поділені на якісні або кількісні [79]. Якісним методам прогнозування притаманна значна залежність від експертного судження. Якісні моделі або методи прогнозування не можуть бути сформовані у вигляді математичних співвідношень, що не дозволяє виконати на достатньо прийнятному рівні верифікацію та валідацію результатів їх застосуванні. Якісні моделі використовуються у випадку дефіциту вхідної інформації або у разі неможливості адекватно, на кількісному рівні, врахувати взаємозв'язки між параметрами, що досліджуються. Таким чином, застосування кількісних методів є найбільш прийнятним.

Моделі з короткостроковим горизонтом прогнозування не є пріоритетними для застосування, приймаючи до уваги необхідність оцінки ЯПЦ на часовому інтервалі до 100 років. На середньостроковому часовому горизонті вплив на

техніко-економічні показники ЯПЦ мають чинники, що пов'язані з факторами реалізації обраного напрямку поводження з ВЯП та впровадження технічних інновацій. У довгостроковому періоді прогнозування зміну техніко-економічних показників характеризують фактори впровадження технічних інновацій та ретроспективні фактори з реалізації обраного типу ЯПЦ. Таким чином, для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ можуть бути застосовані моделі, побудовані на аналізі часових рядів.

Одним з методів прогнозування, що входить до складу неструктурних моделей, є метод ковзної середньої [80 - 81]. Метод є одним найбільш широко відомим з методів згладжування часових рядів. Застосування методу дозволяє нехтувати випадковим коливанням і отримати значення, які відповідають впливу головних чинників. Згладжування за допомогою методу ковзної середньої засноване на погашенні випадкових відхилень при визначених середніх значень. Отримане значення середньої арифметичної відноситься до середини обраного періоду.

Алгоритм застосування методу ковзної середньої включає наступні етапи, а саме:

- для часового ряду y_1, y_2, \dots, y_n визначається інтервал згладжування m ($m < n$);
- для перших m рівнів часового ряду обчислюється їх середнє арифметичне значення. Це значення рівня згладжування застосовується на один рівень вправо, та проводиться обчислення середньої арифметичної і так далі.

Разом з тим, приймаючи квазістаціонарний характер техніко-економічних параметрів, що характеризують ЯПЦ, можливо стверджувати, що застосування перерахунку середнього арифметичного фактично призведе до зменшення інтервалу згладжування рівнів часового ряду без суттєвого підвищення кореляції результатів обчислень на ретроспективних даних, на основі яких проводиться формування вхідних даних з моделювання.

Обґрунтування застосування методу ковзної середньої як методу аналізу трендів для формування техніко-економічних початкових даних для подальшої

розробки комп'ютерних моделей ЯПЦ проведено на прикладі тенденції розвитку енергетичної системи України. Загальну інформацію щодо прогнозних оцінок основних показників енергетичної системи України наведено у таблиці 2.5.

У 2015 році сумарна встановлена потужність електростанцій України становила 55,1 ГВт, з яких 62,49% належить до теплових (ТЕС, ТЕЦ, блок-станції), 25,38% припадає на АЕС, 10,7% на гідроелектростанції та гідроакумуючі електростанції, 1,43% на електростанції, що працюють на поновлюваних джерелах енергії (ВЕС, СЕС, енергія біомаси). За період 2009-2015 рр. спостерігалась незначна зміна структури генерації і істотний перерозподіл відпуску електроенергії за типами генерації, при якому максимум виробництва електроенергії припадав на 2012 рік (198 ГВт×г), мінімум - на 2015 рік (163 ГВт×г). Сумарний спад виробництва електроенергії у 2015 році склав 18,5%.

Згідно з даними Світового Банку [82] у 2014 році падіння ВВП України в порівнянні з 2013 роком склало 8,2%, в 2015 році даний показник склав 9,9%. Споживання електроенергії в 2014 році скоротилося в порівнянні з 2013 роком на 8,8% і склало 134 млрд.кВт×г, в 2015 році в порівнянні з 2014 скоротилося на 12% і склало 118 млрд.кВт×г. Внаслідок стабільного відпуску електроенергії АЕС в 2014 і 2015 роках (виробництво електроенергії склало по 88 млрд.кВт×г) і зниження вироблення електроенергії на ТЕС і ГЕС з 75 до 55 млрд.кВт×г, в 2015 році частка АЕС у виробництві електроенергії в Україні склала 56%.

За останні десять років прогнозні оцінки споживання електроенергії в 2030 році для України знизилися з 420 до 272 млрд.кВт×г. Редакція стратегії розвитку ТЕК України 2006 року передбачала в 2030 році загальну встановлену електричну потужність АЕС на рівні 29,5 ГВт в базовому сценарії при продовженні проектного терміну експлуатації на 15 років. Редакція Стратегії 2013 року приводить загальну встановлену потужність енергоблоків на рівні 17,8 ГВт в базовому сценарії (15,8 ГВт - для песимістичного сценарію) з продовженням терміну експлуатації у понадпроектний на 20 років. Вжиті в 2015 році спроби переглянути енергетичну стратегію не змінили темпи введення

нових енергоблоків і зберегли обсяги сумарною встановленою електричною потужністю АЕС на рівні 18 ГВт у 2030 році, виходячи з частки АЕС у виробництві електроенергії в Україні на рівні 50%.

Таблиця 2.5 - Співставлення прогнозних даних енергетичних стратегій України

| | Стратегія у редакції 2006 [83] | | Оновлена стратегія у редакції 2013 [84] | | | Стратегія у редакції 2015 [85] |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------------------------|--------------|------------|--------------------------------|
| | 2006 | 2030 базовий | 2030 песим | 2030 базовий | 2030 оптим | 2030 базовий |
| Загальна встановлена електрична потужність, ГВт | 52 | 88,5 | 56,7 | 65,5 | 73,8 | 60,6 |
| Загальна встановлена електрична потужність АЕС, ГВт | 13,8 | 29,5 | 15,8 | 17,8 | 18,8 | 15,0 |
| Частка АЕС у загальній встановленій у ОЕС потужності, % | 26 | 33,3 | 28 | 27 | 25,4 | 24,8 |
| Частка АЕС в виробництві електроенергії, % | 47,9 | 52,1 | 50 | 48,8 | 46,3 | 50 |
| Виробництво електроенергії, млрд.кВт×г | 185,2 | 420,1 | 234 | 272 | 304 | 258,3 |
| Виробництво електроенергії на АЕС, млрд.кВт×г | 88 | 219,0 | 118 | 133 | 141 | 105,0 |
| Строк продовження експлуатації енергоблоків АЕС, років | 15 | | 20 | | | |

Наведені дані демонструють наявність тренду у зміні прогнозних показників з часом. Основні проблеми, що виникають при прогнозних оцінках розвитку паливних циклів мистять:

- відсутність масиву верифікованих даних;
- невизначеність наявних джерел інформації;
- варіативність (часова, ринкова, регіональна);
- недостатність початкових даних для опису інноваційних технологій;

- непрогнозований характер змін факторів, що можуть мати вплив на технічні та економічні показники ЯПЦ (ризики (невраховані фактори) – політика, ринок, суспільство).

Використання методу часових трендів на основі методу ковзної середньої для аналізу первинної інформації з метою врахування зміни у часі технічних та економічних параметрів технологій, що входять до складу ЯПЦ, 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 формування переліку первинної інформації наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - 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. | $K_i = \frac{1}{n} \sum K_{ij}$ | $N_i = \frac{1}{n} \sum N_{ij}$ |

2.5 Аналіз чутливості для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ

Аналіз чутливості шляхом зміни вхідних параметрів є одним з методів інтерпретації отриманих результатів розрахунків. Аналіз чутливості полягає у зміні окремих параметрів в певних межах при постійних значеннях інших

параметрів, що характеризують ЯПЦ. У практиці набув широкого застосування аналіз чутливості результатів розрахунків на рівномірну зміну у бік збільшення та зменшення ($\pm M, \%$) вхідного параметра, що не може вважатись прийнятним виходячи з розгляду паливних циклів як квазістаціонарної системи, техніко-економічні параметри якої являються змінними у часі.

Прийнятність застосування методу часових трендів, побудованого на методі ковзної середньої, до оцінки відгуку результатів розрахунків на зміну вхідного параметру впливає з основних положень розділу 2.4.

Нехай загальну залежність результатів розрахунків від вхідного параметру надамо у наступному вигляді:

$$y = f(x) \quad (2.29)$$

Результати застосування методу аналізу чутливості визначимо у наступному вигляді:

$$y_{min} = f(x_{min}), \quad (2.30)$$

$$y_{max} = f(x_{max}) \quad (2.31)$$

Для квазістаціонарної системи X_{min} та X_{max} можна визначити наступним чином:

$$X_{min} = \frac{1}{n} \sum K_n, \quad (2.32)$$

$$X_{max} = \frac{1}{m} \sum N_m, \quad (2.33)$$

де $K_n \neq N_m$ та визначають послідовність зміни значень вхідного параметру відносно якого проводиться оцінка відгуку ключового індикатору КІ ЯПЦ.

Приймаючи до уваги поступове збільшення вартості будівництва АЕС з одного боку та покращення технічних параметрів реакторів зі зменшенням експлуатаційних витрат на виробництво електроенергії з іншого боку,

застосування методу аналізу чутливості при нерівнозначній зміні вхідного параметру є цілком виправданим при прогнозному моделюванні на середньо та довгостроковий період. Для короткострокового періоду застосування аналізу чутливості при нерівнозначній зміні вхідних параметрів не є адекватним приймаючи до уваги відсутність можливості визначення чіткого тренду його зміни.

Застосування методу аналізу чутливості для цілей прогнозного моделювання включає наступні етапи:

- визначення переліку ключових індикаторів КІ оцінки виходячи з цілей аналізу ЯПЦ (з застосуванням положень розділу 2.3);
- визначення тренду зміни вхідного параметру N_j індикатору КІ_j;
- визначення граничних умов зміни вихідного параметру з застосуванням методу ковзної середньої: $[N_j - K; N_j + L]$ (%), де

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

$$K < L \text{ у разі } N_j \rightarrow N_{j \max};$$

- врахування рівнозначності ваги кожного з ключових індикаторів КІ.

Це у свою чергу призводить до можливості підвищення адекватності прогнозних розрахунків параметрів ЯПЦ за врахування трендів зміни технічних та економічних показників.

При проведенні аналізу чутливості для цілей прогнозової 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, P_u) та технічні параметри ЯПЦ (приведене споживання природного урану на одиницю електроенергії, що виробляється, коефіцієнт корисної дії енергоблоку АЕС, та інш.). Як результат на виході отримуємо залежність приведеної ціни електроенергії для кожного з варіантів ЯПЦ від зміни вхідного параметру.

2.6 Висновок до розділу 2

В цьому розділі наведено розроблені у рамках дисертаційного дослідження підходи з удосконалення математичної моделі відкритого ЯПЦ шляхом врахування перерозподілу ядерних матеріалів та врахуванням взаємозв'язків між складовими компонентами ЯПЦ.

Розроблено метод аналізу первинної інформації на основі часових трендів зміни техніко-економічних показників, що дозволяє розглядати ЯПЦ як динамічну систему для цілей прогнозного моделювання. Метод дозволяє врахувати зміну техніко-економічних показників відповідних технологічних процесів та, таким чином, забезпечити адекватність результатів прогнозування. Метод є універсальним та може бути використаний для формування вхідної інформації при прогнозному моделюванні неядерних енергетичних систем.

Розроблено метод порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком КІ, що дозволяє виконати критерійну інтегральну порівняльну оцінку ЯПЦ на відміну від підходу до порівняння ЯПЦ за одним обраним критерієм. Метод враховує проведення оцінки за множиною обраних критеріїв, що дозволяє співставлення ЯПЦ з різними технологічними характеристиками. Проведено верифікацію методу на основі порівняння результатів розрахунків з результатами, які отримано з використанням розрахункового засобу МАГАТЕ KIND-ET.

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 прогнозному моделюванні.

РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ ЧАСТКОВО-ЗАМКНЕНОГО ТА ЗАМКНЕНОГО ЯПЦ

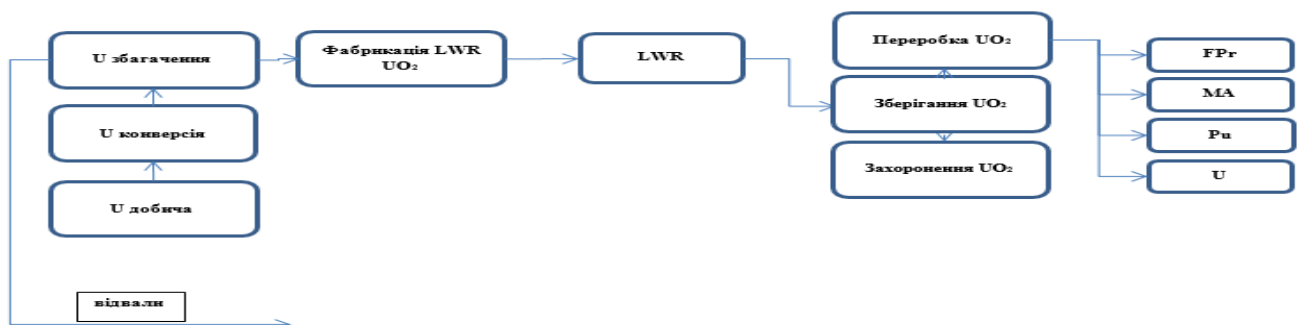
3.1 Зв'язок елементів при побудові комп'ютерних моделей ЯПЦ

ЯПЦ є послідовність взаємопов'язаних елементів виробництва ядерного палива для АЕС та поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП), цінними продуктами переробки ВЯП (уран та плутоній) та організаційно-технічними заходами з поводження з РАВ. Мета створення ЯПЦ у забезпеченні АЕС енергетичним ресурсом для безпечного, екологічно прийняттого та сталого виробництва електроенергії, включаючи аспекти поводження з ВЯП та РАВ.

У загальному уявленні побудову моделі ЯПЦ можна поділити на формування початкової інформації та опис взаємозв'язків за наступних трьох складових:

- початковий етап ЯПЦ (front end), що включає видобування урану, його збагачення та виробництво ядерного палива;
- генерація електричної/теплової енергії на АЕС;
- завершальний етап ЯПЦ (back end), що включає зберігання відпрацьованого ядерного палива у довгострокових сховищах з подальшим захороненням у геологічних сховищах або його переробку.

Взаємозв'язок між складовими елементами у відкритому ЯПЦ наведено на рисунку 3.1.



Рисунк 3.1 Взаємозв'язок складових елементів відкритого ЯПЦ

Опис модельного представлення початкового етапу (front end) проводиться шляхом розгляду наступних складових:

- запасу природного урану як ресурсного забезпечення експлуатації АЕС. Враховується загальний доступний для використання обсяг природного урану, що може бути залучений до виготовлення ядерного палива. Вартість урану являється визначальним параметром проведення економічних оцінок ЯПЦ, що обумовлено паливною складовою (до 40%) у ціні на електроенергію, що виробляється АЕС;

- конверсії урану, яка є процесом хімічного очищення та переводу природного урану з форми U_3O_8 до форми UF_6 . Враховується обсяг переведення доступного урану до форми UF_6 та відповідна загальна вартість процесу;

- збагачення урану, що є процесом накопичення ізотопу U-235 до значення не більше 4.95%. Як залишковий продукт збагачення накопичується так званий збіднений уран (вміст ізотопу U-235 складає менш 0.3%). Враховується загальний об'єм необхідних потужностей збагачувального виробництва;

- фабрикації ядерного палива, що є високотехнологічним процесом створення кінцевої продукції у вигляді тепловиділяючих збірок (ТВЗ) та включає виробництво чистого діоксиду урану (UO_2) зі вхідного UF_6 або UO_3 , виробництво високоякісних керамічних гранул UO_2 точної форми та виготовлення жорсткого металевого каркаса для тепловиділяючої збірки і завантаження паливних гранул в паливні стрижні, їх герметизація і складання стрижнів в кінцеву структуру паливної збірки. Враховується загальний обсяг необхідних потужностей заводів з фабрикації ядерного палива на кожен рік розгляду ЯПЦ.

Опис модельного представлення завершального елемента ЯПЦ (back end) проводиться шляхом розгляду наступних складових:

- зберігання після завершення строку експлуатації ядерного палива у реакторі, що є технологічним процесом безпечного поводження з ВЯП з метою зниження його остаточного енерговиділення. Термін зберігання ВЯП у сховищі

варіюється від 50 до 100 і більш років. Враховується загальний об'єм потужностей зі зберігання ВЯП за весь період дослідження;

– захоронення ВЯП являється кінцевою ланкою ЯПЦ. На даний час не реалізовано у промисловому вигляді. Геологічне сховище є необхідним елементом інноваційних ЯПЦ будь-якої конфігурації. Враховується загальний обсяг потужностей, що є необхідними для кінцевого захоронення ВЯП, накопиченого за весь період дослідження.

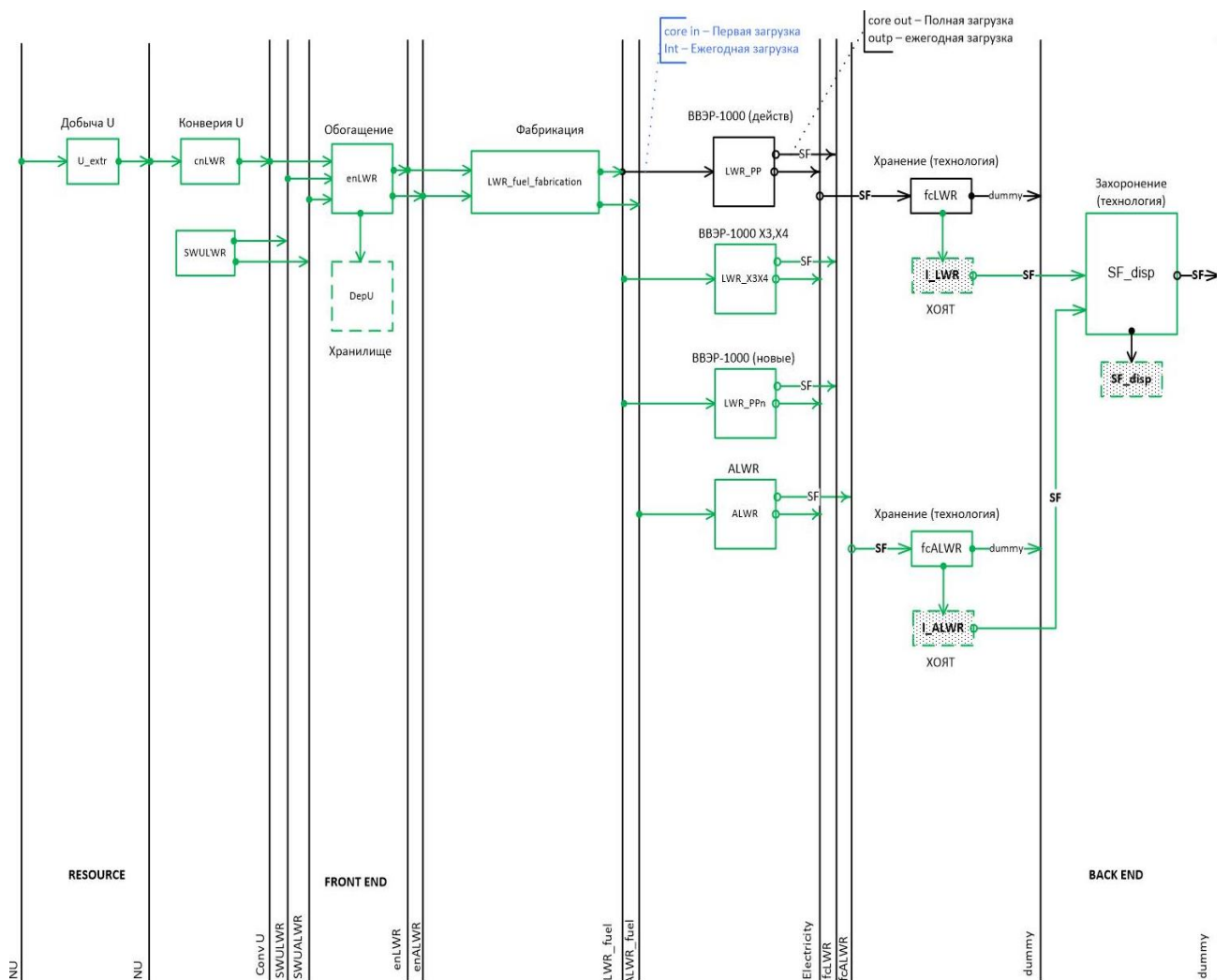


Рисунок 3.2 Комп'ютерна модель відкритого ЯПЦ розрахункової програми MESSAGE

Комп'ютерну модель відкритого ЯПЦ України для розрахункової програми MESSAGE наведено у рисунку 3.2.

Реакторні установки у комп'ютерній моделі відкритого ЯПЦ України для програмного середовища MESSAGE враховуються використанням техніко-економічних даних, наведених у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Техніко-економічні показники реакторів ВВЕР і ALWR

| Параметр | ВВЕР (LWR) | ALWR |
|----------------------------------|-------------------|---------|
| Капітальні витрати, долл/кВт | 3600 | 3600 |
| Постійні витрати, долл/кВт | 69,3 | 69,3 |
| Змінні витрати, долл/МВт×ч | 0,50 | 0,50 |
| Теплова потужність, МВт | 3000 | 4410 |
| Потужність, МВт(ел) | 1000 | 1500 |
| ККД, % | 33 | 34 |
| КВВП, % | 80 | 80 |
| Власні потреби, % | 6 | 4,9 |
| Термін будівництва, років | 6 | 6 |
| Термін експлуатації, років | 45 (60 для нових) | 60 |
| Підживлення, т ВМ | 18,258 | 21,462 |
| Перше завантаження, т ВМ | 70,742 | 129,360 |
| Середнє вигорання, ГВт×добу/рік | 49 | 60 |
| Паливний цикл, діб | 1144 | 1760 |
| Збагачення палива підживлення, % | 4,32 | 4,95 |

3.2 Комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ розрахункової програми MESSAGE

Побудову комп'ютерних моделей складних ЯПЦ засновано на врахуванні їх відмінностей від відкритого ЯПЦ у переліку складових елементів. У таблиці 3.2 наведено інформацію щодо порівняння організаційно-технічної структури відкритого, частково-замкненого та замкненого ЯПЦ та необхідності врахування наявності окремих складових компонентів (без урахування використання ТВЗ у АЕС).

Таблиця 3.2 Складові елементи різних варіантів ЯПЦ

| Відкритий ЯПЦ | Частково-замкнений ЯПЦ | Замкнений ЯПЦ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Видобування природнього урану | Видобування природнього урану | - |
| Конверсія | Конверсія | - |
| Збагачення | Збагачення | - |
| Накопичення збідненого урану | Накопичення збідненого урану | Використання збідненого урану |
| Виробництво паливних таблеток | Виробництво паливних таблеток | Виробництво паливних таблеток |
| Фабрикація тепловиділяючих збірок (ТВЗ) зі збагаченого урану | Фабрикація тепловиділяючих збірок (ТВЗ) зі збагаченого урану | - |
| - | Фабрикація тепловиділяючих збірок (ТВЗ) з репроцесінгового U | - |
| - | - | Фабрикація тепловиділяючих збірок (ТВЗ) зі змішаного ядерного палива на основі U (збіднений уран) та репроцесінгового Pu |
| Витримка відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) у басейні витримки | Витримка відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) у басейні витримки | Витримка відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) у басейні витримки |
| Транспортування | Транспортування | Транспортування |
| Довготривале зберігання ВЯП у контейнерах сухого зберігання або у басейнах витримки | - | - |
| - | Переробка ВЯП, розділення фракцій U та Pu | Переробка ВЯП, розділення фракцій U та Pu |
| - | Накопичення та зберігання Pu | - |
| Геологічне захоронення ВЯП | Геологічне захоронення ВЯП | Геологічне захоронення ВЯП |

При побудові комп'ютерної моделі частково-замкненого ЯПЦ додатково до складових елементів відкритого ЯПЦ необхідне врахування потоку ядерних матеріалів у процесах перероблення ВЯП, виробництва ядерного палива з урану, що вилучено з ВЯП шляхом його перероблення, зберігання продуктів поділу урану у вигляді плутонію та мінорних актинідів (МА). Загальну схему взаємозв'язків між складовими елементами частково-замкненого ЯПЦ наведено на рисунку 3.3.

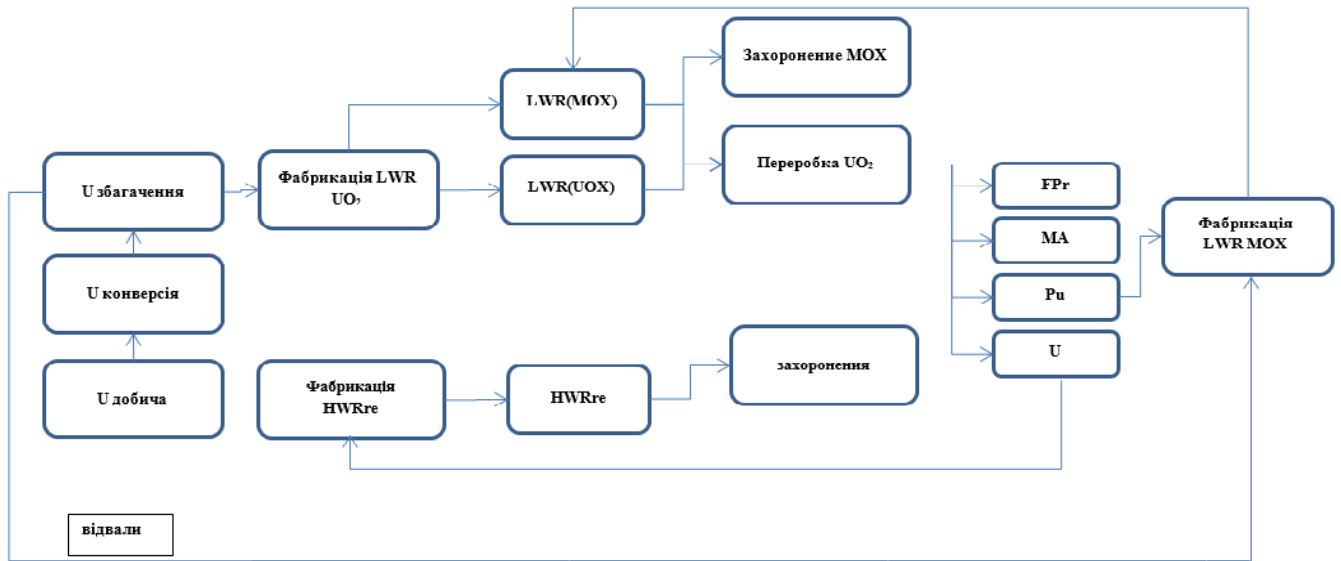


Рисунок 3.3 Загальна схема взаємозв'язків між складовими елементами частково-замкненого ЯПЦ

Удосконалення комп'ютерної моделі відкритого ЯПЦ для побудови комп'ютерній моделі частково-замкненого ЯПЦ проведено шляхом врахування наступних припущень:

- присутність всіх елементів, що є складовими компонентами відкритого ЯПЦ;
- врахування наявності відмінних від застосованих у відкритому ЯПЦ реакторних установок ReHWR, що технічно дозволяють застосування переробленого урану;
- у ланцюгу ЯПЦ у комп'ютерній моделі інші типи реакторних установок (елемент ReHWR) розміщені за елементом, що характеризує перероблення ВЯП таким чином, що вихідний потік ядерних матеріалів після перероблення ВЯП (елемент LWR_repr) є вхідним потоком для виробництва ядерного палива для реакторів ReHWR;
- врахування виробництва палива для реакторів ReHWR (елемент HWR_fuel_fabrication), який являється додатковим до елементу LWR_fuel_fabrication, наявному у відкритому ЯПЦ;

– врахування додатково до елементів, що характеризують поведження з ВЯП у відкритому ЯПЦ, накопичення плутонію (елемент PuTot), продуктів поділу (елемент FPr) та мінорних актинідів, які отримано після переробки ВЯП.

Комп'ютерну модель частково-замкненого ЯПЦ для розрахункової програми MESSAGE наведено у рисунку 3.4.

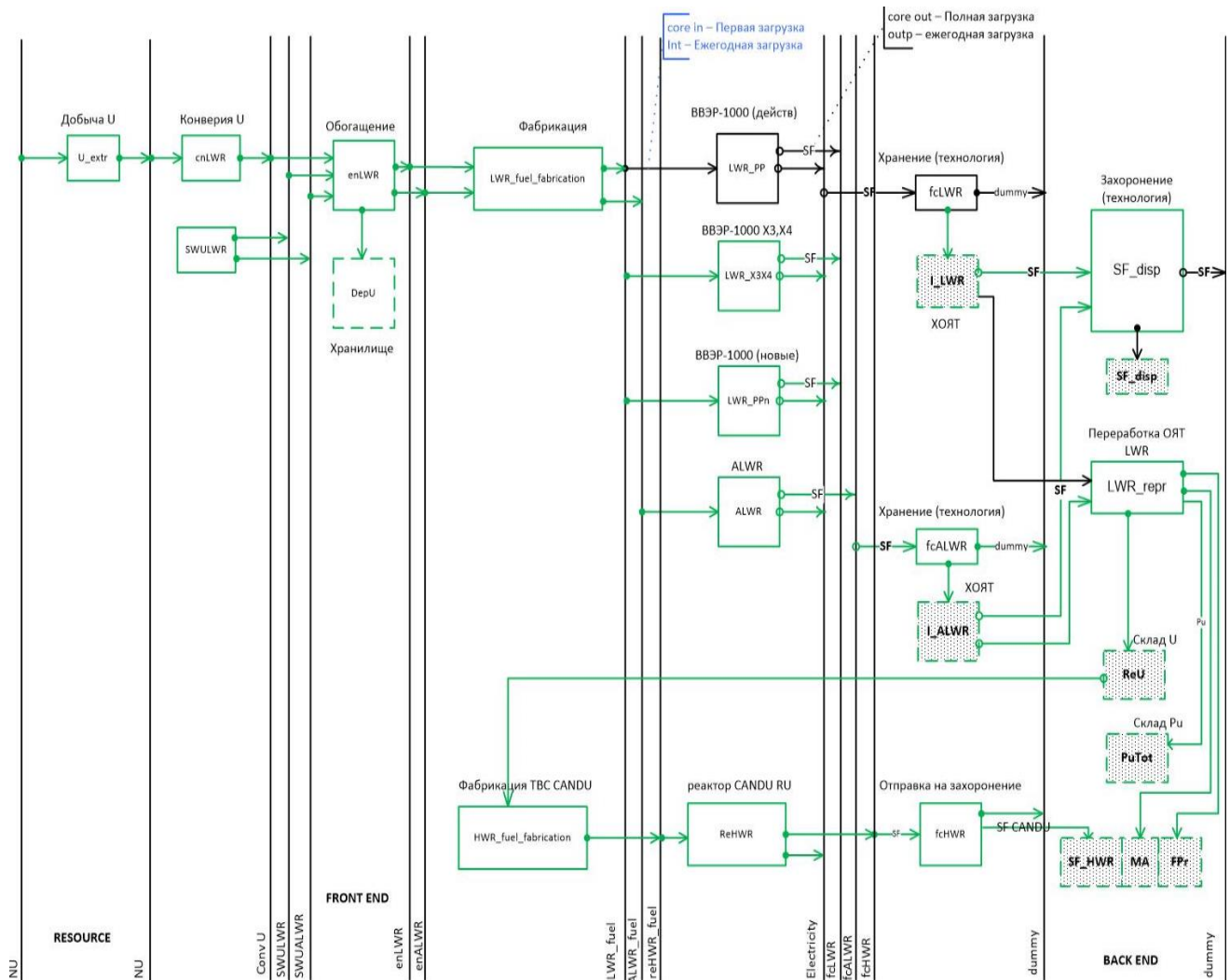


Рисунок 3.4 Комп'ютерна модель частково-замкненого ЯПЦ для розрахункової програми MESSAGE

При побудові комп'ютерної моделі замкненого ЯПЦ додатково до складових елементів відкритого ЯПЦ необхідне врахування потоку ядерних матеріалів у процесах перероблення ВЯП, виробництва ядерного палива з урану та плутонію, які вилучені з ВЯП шляхом його переробки, зберігання продуктів

поділу у вигляді урану та мінорних актинідів. Додаткова відмінність замкненого ЯПЦ у використанні відмінних від інших ЯПЦ відповідних реакторів, що працюють на плутонії. Таким чином, уран не використовується у схемі ЯПЦ, що призводить до його накопичення як паливного ресурсу. Загальну схему взаємозв'язків між складовими елементами у замкненому ЯПЦ наведено на рисунку 3.5.

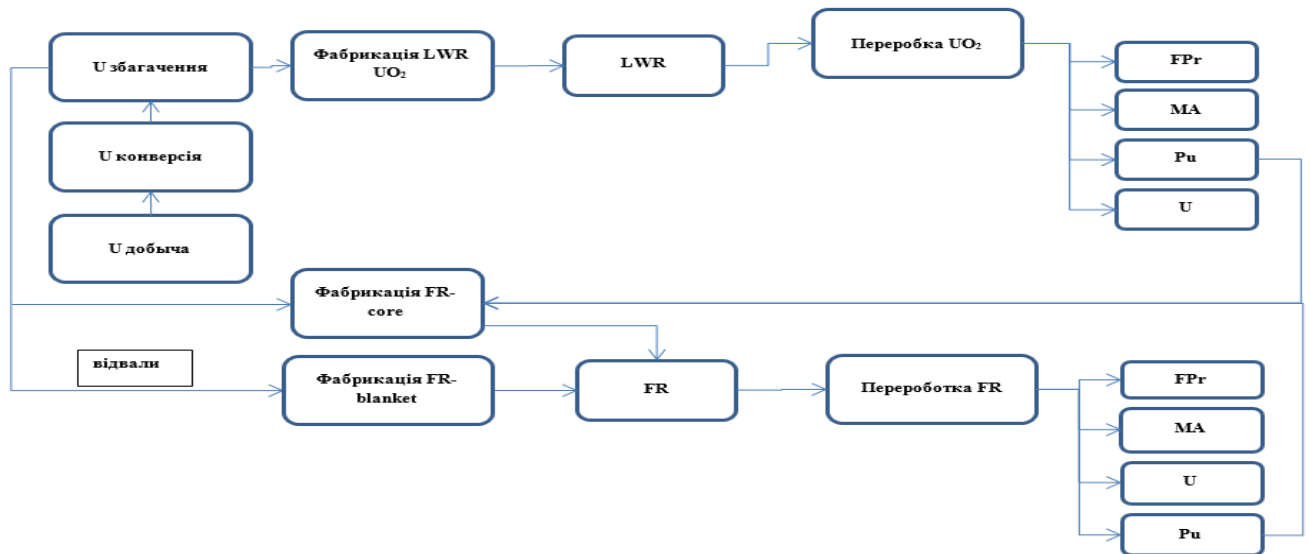


Рисунок 3.5 Загальна схема взаємозв'язків між складовими елементами у замкненому ЯПЦ

Удосконалення комп'ютерної моделі відкритого ЯПЦ для побудови комп'ютерній моделі замкненого ЯПЦ проведено шляхом врахування наступних припущень:

- присутність всіх елементів, що є складовими відкритого ЯПЦ;
- врахування реакторів, що технічно дозволяють застосування переробленого плутонію (елемент FR_PP);
- у ланцюгу ЯПЦ у комп'ютерній моделі інші типи реакторних установок (елемент FR_PP) розміщені за елементом, що характеризує перероблення ВЯП таким чином, що вихідний потік ядерних матеріалів після перероблення ВЯП (елемент LWR_repr) являється вхідним потоком для виробництва ядерного палива для FR_PP;

– врахування виробництва ядерного палива для реакторів FR-PP (елемент FR_core_fabrication), який є додатковим до елементу LWR_fuel_fabrication, передбаченому у відкритому ЯПЦ;

– врахування додатково до елементів, що характеризують поведження з ВЯП у відкритому ЯПЦ, накопичення урану (елемент ReU), продуктів поділу (FPr) та мінорних актинідів, які вилучаються після переробки ВЯП.

Комп'ютерну модель замкненого ЯПЦ для розрахункової програми MESSAGE наведено у рисунку 3.6.

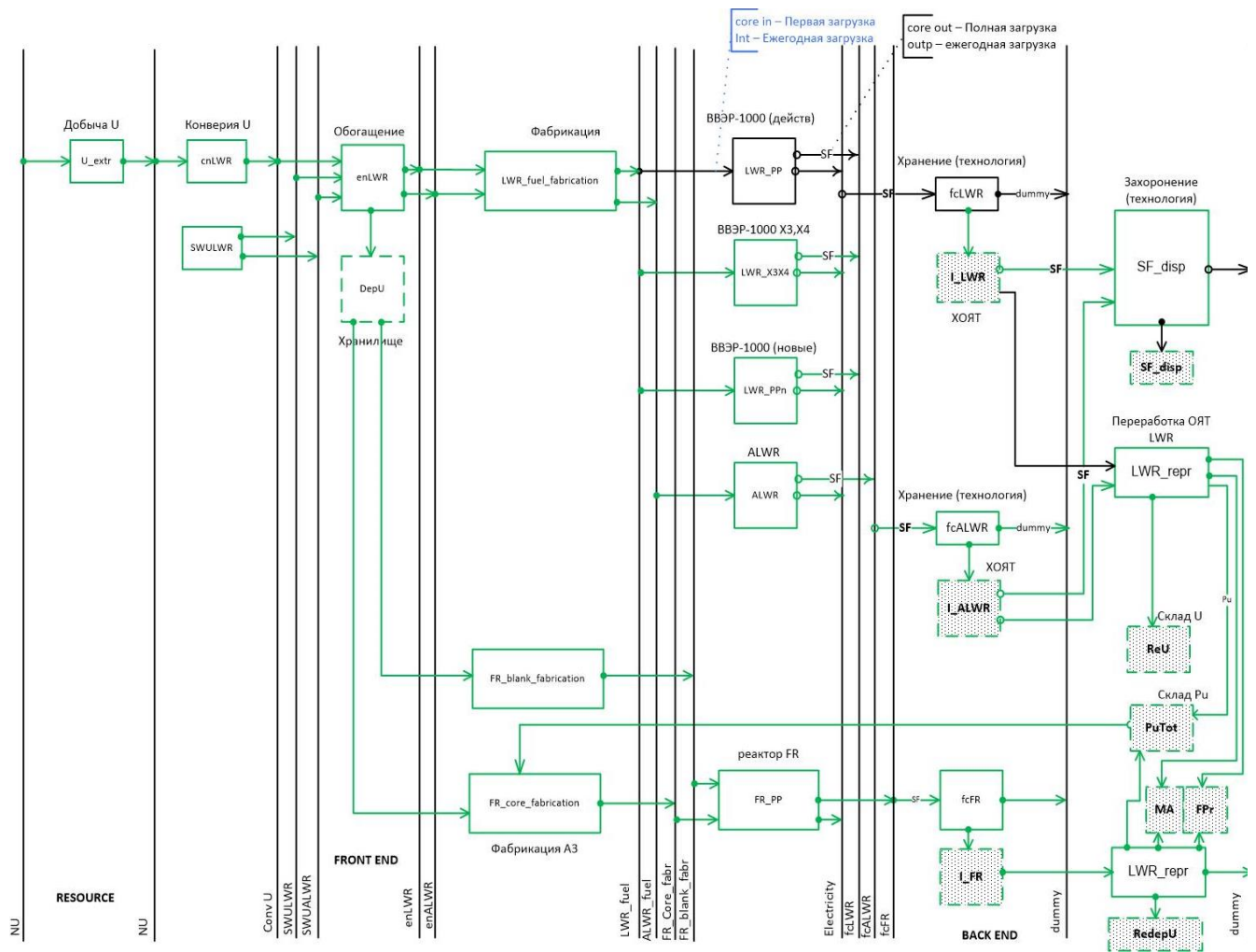


Рисунок 3.6 Комп'ютерна модель замкненого ЯПЦ для розрахункової програми MESSAGE

3.3 Алгоритм побудови розрахункової моделі ЯПЦ у програмному середовищі MESSAGE

Формування моделі ЯПЦ у програмному середовищі MESSAGE враховує роботу з наступними компонентами:

- інтерфейсом користувача для побудови моделі енергетичної системи;
- масивом вхідної інформації;
- програмним модулем оптимізації;
- програмним модулем обробки результатів розрахунків з вибором раціонального рішення.

Основним елементом побудови ЯПЦ є інформація щодо ресурсного забезпечення. При цьому, у рамках одного ресурсу можливо визначити різні потоки та обмеження його застосування. Необхідними етапами рішення завдання з використанням MESSAGE є опис характеристик доступних енергетичних ресурсів, наявних енергогенеруючих технологій, прогноза зміни попиту на генерацію енергії на всьому інтервалі дослідження, формалізоване представлення енергетичної системи як сукупності складових об'єктів, які пов'язані відповідними енергетичними зв'язками. Загальний вигляд вкладки «Загальні» (GENERAL) наведено на рисунку 3.7 та дозволяє встановити

- ставку дисконтування - поле «drate»;
- діапазон розрахунків - поле «years»;
- основні одиниці вимірів величин.

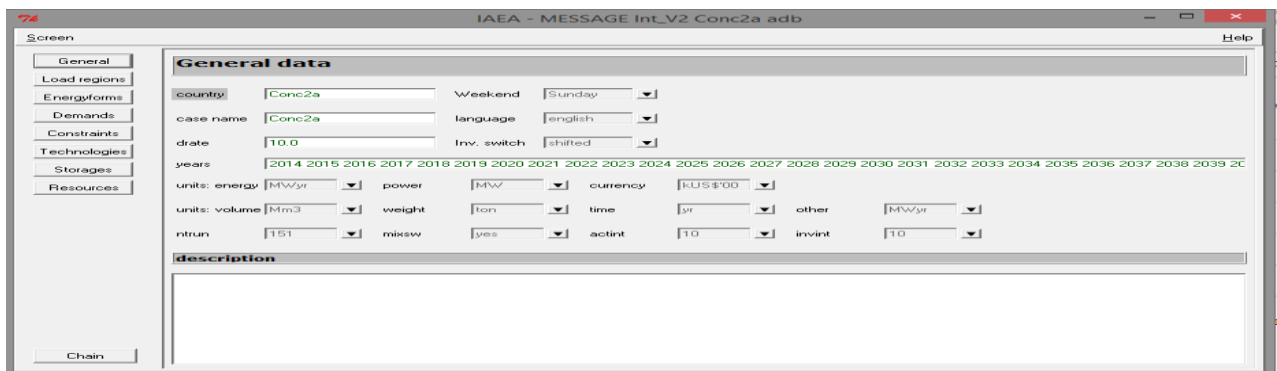


Рисунок 3.7 Вкладка «Загальні» (GENERAL)

Загальний вигляд вкладки вкладки «Енергетичні форми» (Energyforms) наведено на рисунку 3.8 та дозволяє задати групи енергетичних рівнів.

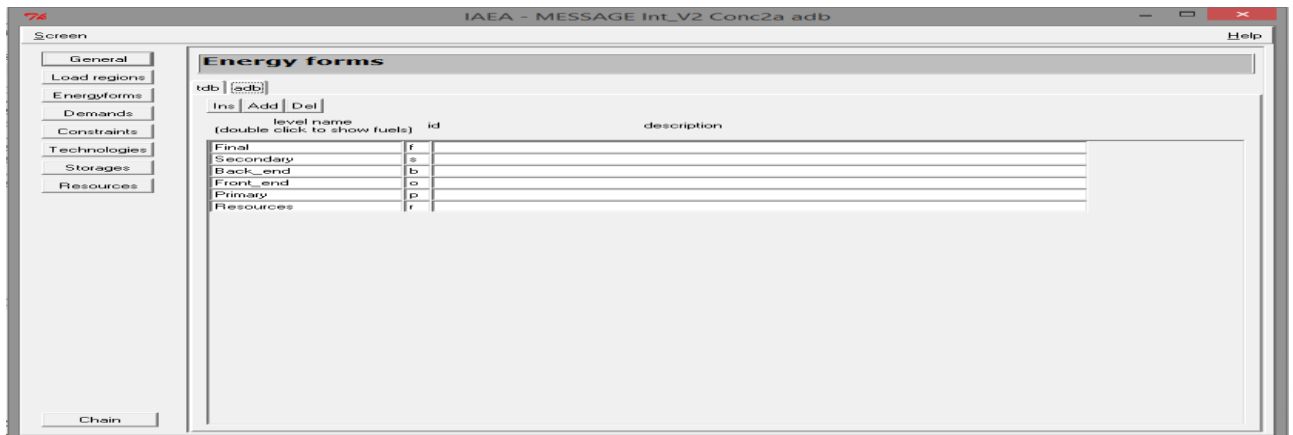


Рисунок 3.8 Вкладка «Енергетичні форми» (Energyforms)

В групі Final об'єднуються рівні кінцевого споживання. При розгляді виробництва електроенергії як кінцевого продукту ЯПЦ загальний вигляд вкладки наведено на рисунку 3.9 «Електроенергія» (Electricity).

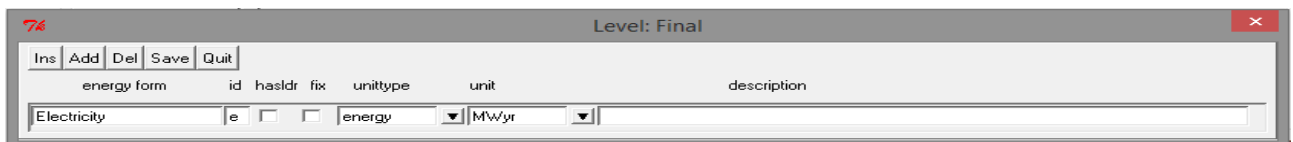


Рисунок 3.9 Вкладка «Електроенергія» (Electricity)

В групі «Завершальна стадія» (Back_end) задано рівні ядерного палива, що вивантажується з діючих та нових реакторів (fcLWR). Загальний вигляд вкладки наведено на рисунку 3.10.

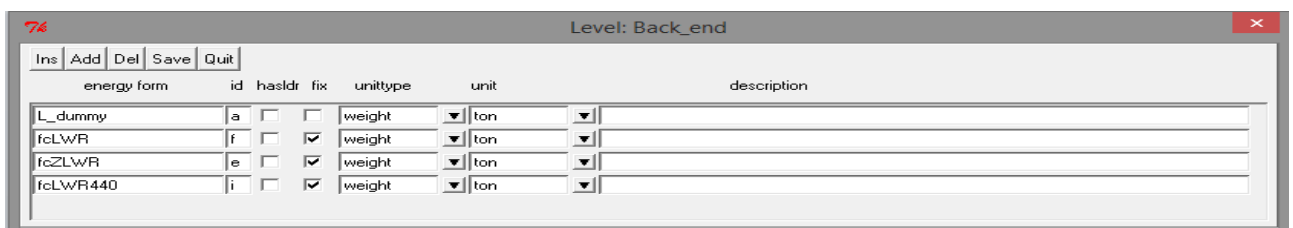


Рисунок 3.10 Вкладка «Завершальна стадія» (Back_end)

Вкладку «Попит» (Demand) наведено на рисунку 3.11. Вкладка дозволяє задати лінію споживання електроенергії.

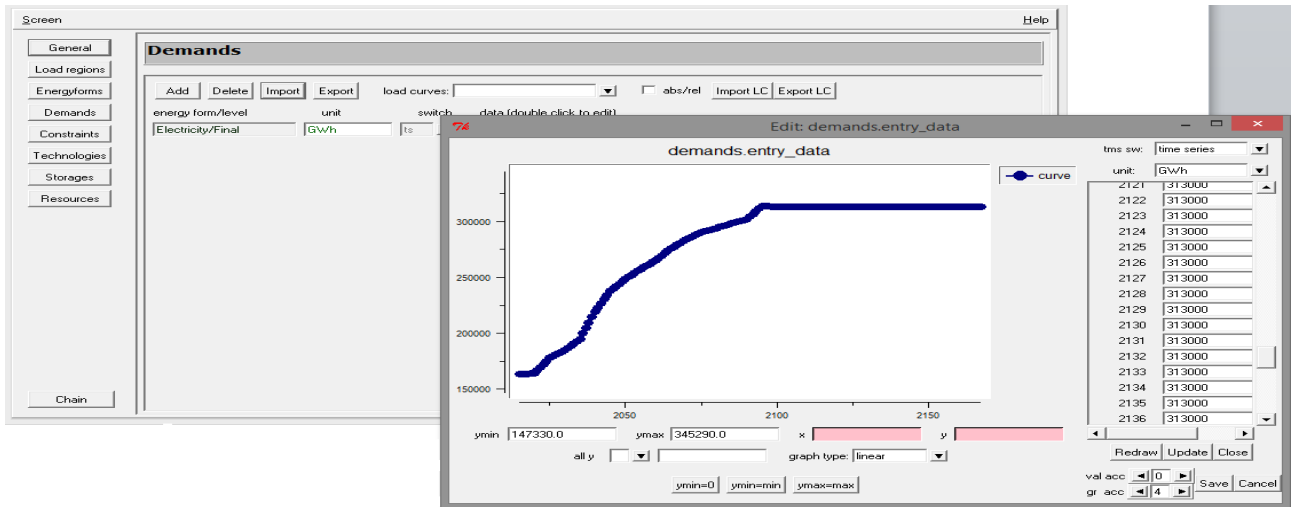


Рисунок 3.11 Вкладка «Попит» (Demand)

Вкладка «Обмеження» (Constraints), список «group1» дозволяє користувачу створити додаткові обмеження. В даному випадку (рисунок 3.12) встановлюється обмеження «50% для ядерної генерації» (або ядерна генерація дорівнює неядерній генерації).

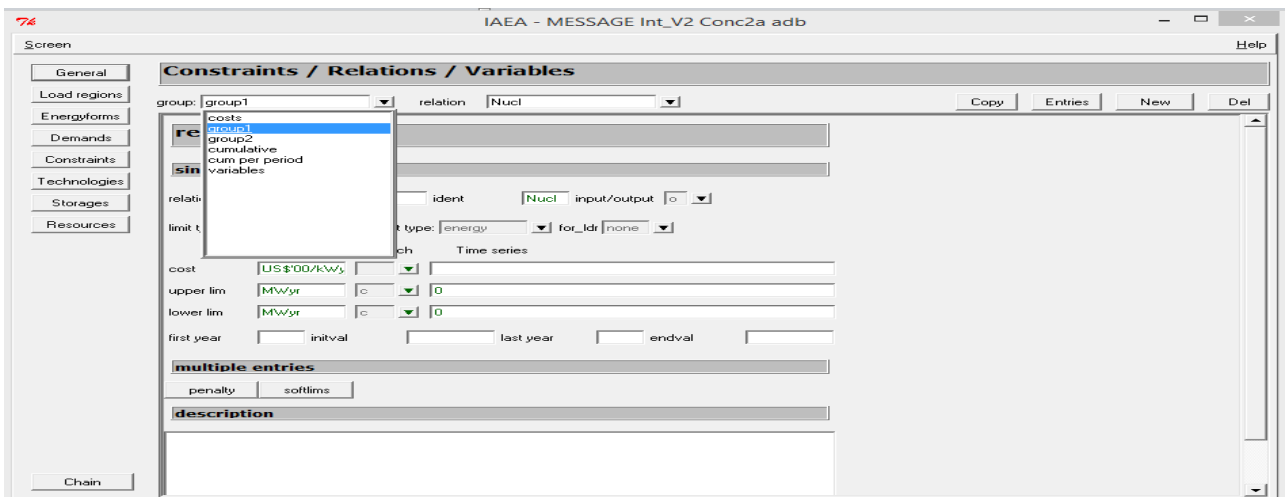


Рисунок 3.12 Вкладка «Обмеження» (Constraints), список «group1»

Вхідні дані технологій задаються у вкладках «Технології» (Technology) та «Потужності» (Capacity) з вибором реактора зі списку «технології» (Technologies) на вкладці «Активність» (Activity) (рисунок 3.13). Задаються параметри «Змінних витрат» (variable cost) (0,5 USD/МВт×год) та щорічне перевантаження, опції «Завантаження» (inp) та «Вивантаження» (outp).

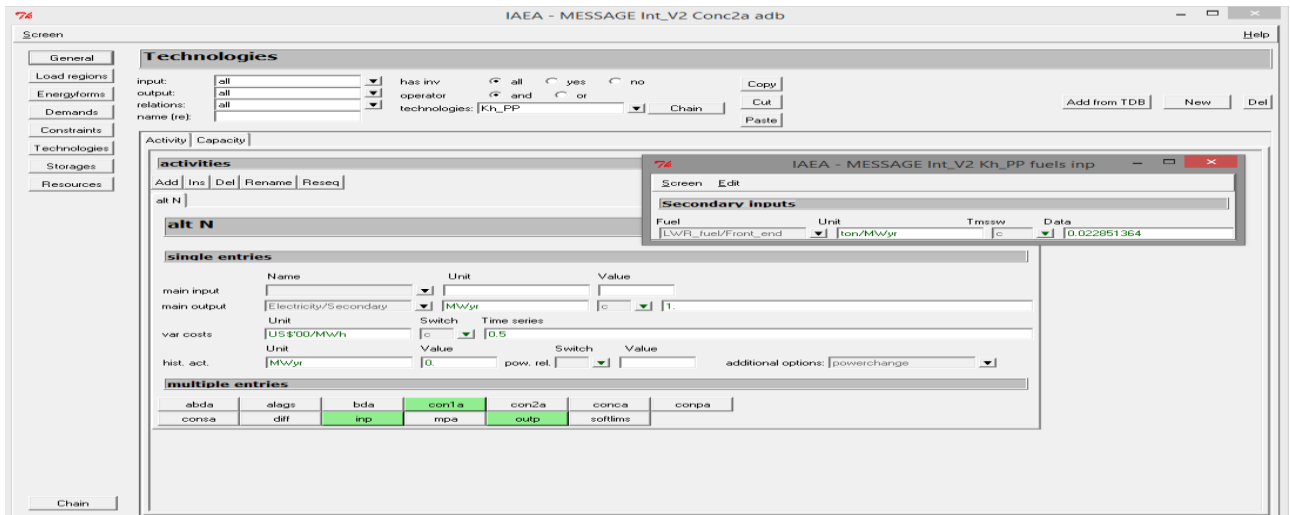


Рисунок 3.13 Перелік «Технології» (Technologies) на вкладці «Активність» (Activity)

У якості одного з обмежень використовується зміна маси ядерного палива у процесі використання у АЕС, яка розраховується за наступним рівнянням:

$$inp/outp = M_{щорічне} / (KBVP \times W(e)), \quad (3.1)$$

де $M_{щорічне}$ – щорічне перевантаження в тонах, $W(e)$ – електрична потужність [МВт], $KBVP$ – коефіцієнт використання встановленої потужності.

Для енергоблоків, що знаходяться у експлуатації на АЕС України $inp/outp = 18.25824 / (0.799 \times 1000) = 0.0228513642$.

– на вкладці «Потужності» (Capacity) задаються параметри, що визначають KBVP ($KBVP = PlantFactor \times OperationTime = 0,94 \times 0,85 = 0,799$), де $PlantFactor$ коефіцієнт, що показує, яка доля виробленої електроенергії видається

в мережу (0,94) за винятком власних потреб та OperatinTime є час роботи установки в рік (0,85).

При побудові моделі ЯПЦ у програмному середовищі MESSAGE у загальному випадку при розгляді типів енергоблоків враховуються наступні показники: «Термін експлуатації» (Plant Life) – 50 років, «Вартість будівництва – USD/кВт» (Investment cost) – 5000 USD/кВт для нових реакторів, «Постійні витрати –USD/кВт» (Fixed cost) – 69,3, «Історія введення в експлуатацію для діючих реакторів» (History capacity) та «Одинична потужність» (Unit size) встановлюються відповідно графіка будівництва нових енергоблоків АЕС (формується окремо з урахуванням цілей дослідження), «Термін будівництва» (Construction time) – 6 років.

Елемент ЯПЦ «Фабрикація палива» (LWR_fuel_fabr) описує потреби у фабрикації палива для реакторів ВВЕР-1000 (вкладка alt-a) та ВВЕР-440 (вкладка alt-b). У загальному випадку дана послуга приймається на рівні 300 USD/кг(ВМ).

Формування опції «Збагачення урану» (enLWR) як вхідний параметр, що описується у вкладці «Вхід» (inp), проводиться з урахуванням наступних показників (рисунок 3.14):

- необхідної кількості одиниць роздільної роботи для отримання 1 кг збагаченого урану (SWULWR) та вартості збагачення, що вказується в графі SWULWR;

- необхідної кількості природного урану на вході (в моделі потік урану після конверсії ConvU);

- на виході (в опції consa) кількість відвалів.

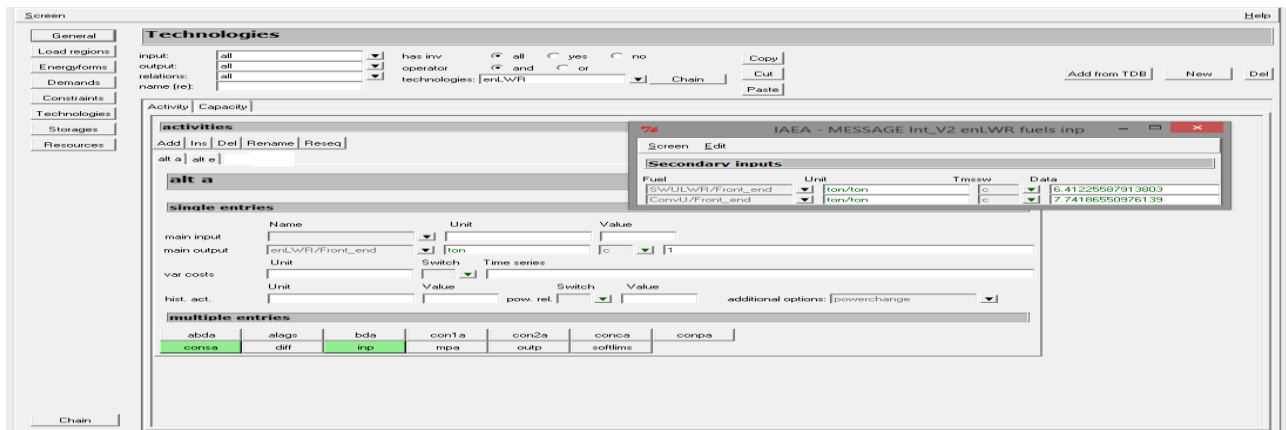


Рисунок 3.14 Формування опції «Збагачення урану» (enLWR)

Збагачення урану для ВВЕР-1000 4,28%, для ВВЕР-440 3,82%, вміст відвалів 0,25%, збагачення природньому урані 0,711%. Параметри збагачення урану для ВВЕР-1000 та ВВЕР-440 задаються на різних вкладках а та б технології enLWR.

Необхідна кількість природного урану з вмістом 0,711 для отримання 1 кг збагаченого урану до рівня x розраховується за формулою при вмісті відвалів x_{dep} [86]:

$$G_X = \frac{x - x_{0,711}}{0,711 - x_{dep}} \quad (3.2)$$

Кількість одиниць роботи розділення розраховується з використанням рівняння 3.3:

$$SWU = V(x) + V(x_{dep}) \frac{x - 0,00714}{0,00714 - x_{dep}} - V(0,00714) \frac{x - x_{dep}}{0,00714 - x_{dep}} \quad (3.3)$$

де

$$V(X) = (1 - 2X) \ln\left(\frac{1 - X}{X}\right) \quad (3.4)$$

Накопичення відпрацьованого палива відбувається в проміжному сховищі. Вартість сховища (investment cost) 300 USD/кг(ВМ). Вивантажене паливо (в моделі з рівня fcLWR) розміщується у сховищі LWR_cooling (опція

consa). Параметри задано в технології fcLWR. Для реакторів ВВЕР-1000 та нових, ВВЕР-440, ЗАЕС параметри задано на вкладках alta, altb, altZ. Приклад заповнення вкладки наведено на рисунку 3.14.

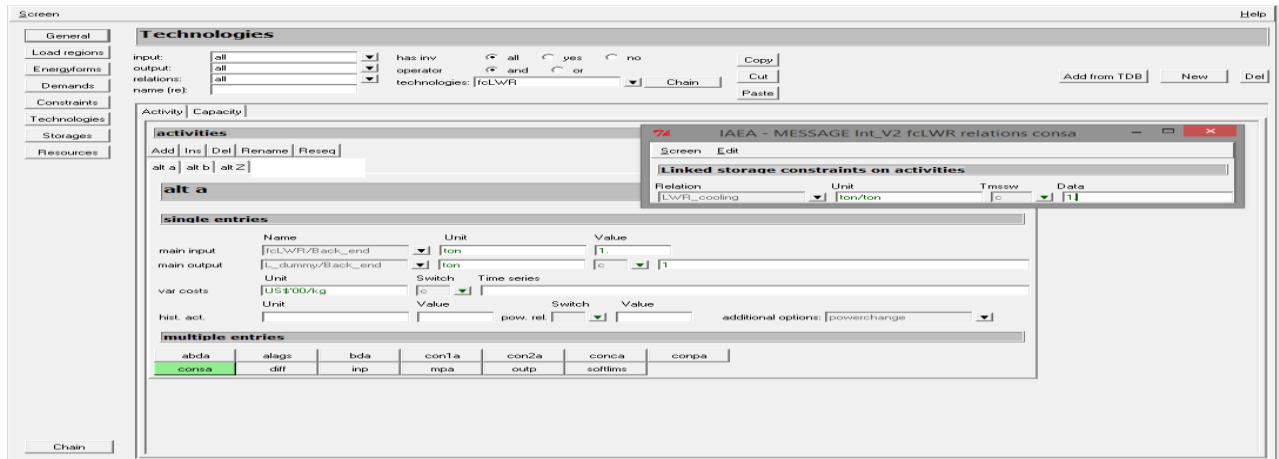


Рисунок 3.14 Формування опції з опису накопичення ВЯП в проміжному сховищі

Ресурс природного урану задано у вкладці «Ресурси» (Resources). В моделі категорії запасів визначені у вкладках grade a – grade d (рисунок 3.16)

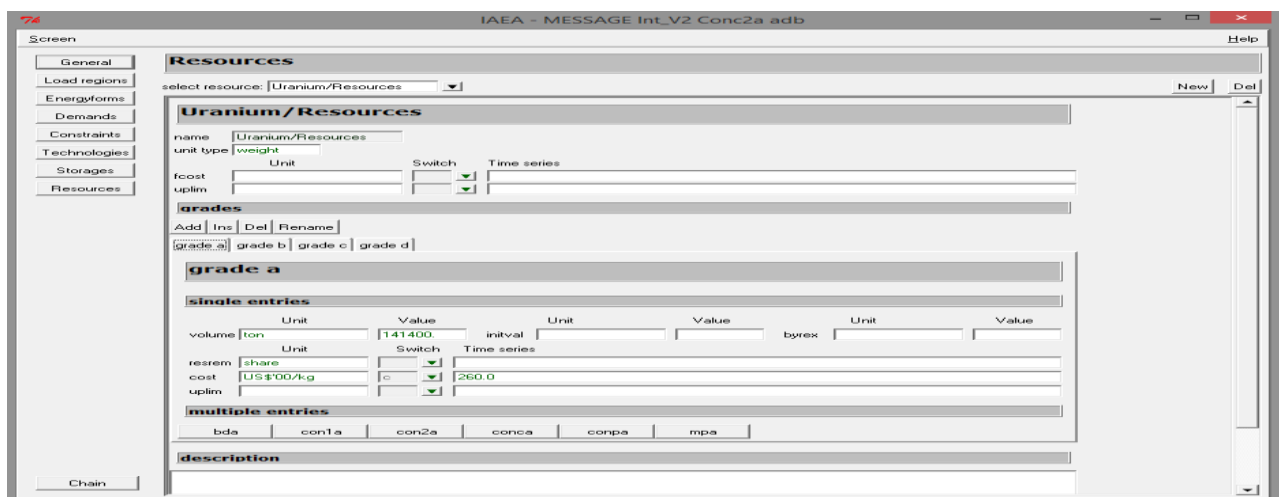


Рисунок 3.16 Опис запасів природного урану

3.4 Висновки до Розділу 3

У цьому розділі наведено алгоритм побудови комп'ютерних моделей ЯПЦ. Проведено аналіз взаємозв'язків між складовими елементами відкритого ЯПЦ та наведено схему потоків ядерних матеріалів, яка враховується при побудові відповідних комп'ютерних моделей. Приймаючи до уваги необхідність аналізу більш складних ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання, побудованих на інших організаційно-технічних взаємозв'язках між складовими елементами, проведено формування основних відмінностей ЯПЦ. На підставі цього запропоновано загальний алгоритм побудови комп'ютерних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, які продемонстровано з застосуванням середовища програмного засобу MESSAGE.

Наведено приклади побудови комп'ютерних моделей ЯПЦ з урахуванням реальних умов функціонування ядерної енергетики в Україні.

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 відповідних наближень та обмежень, необхідних для врахування при побудові комп'ютерних моделей ЯПЦ. Підхід включає опис особливостей моделювання всіх складових елементів ЯПЦ та рекомендації щодо врахування потоків урану та плутонію між елементами розрахункової схеми.

Наведено покроковий опис послідовності у формуванні моделей ЯПЦ на прикладі програмного середовища MESSAGE.

Розроблено комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ України для програмного засобу MESSAGE.

РОЗДІЛ 4. АПРОБАЦІЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯПЦ З ВИКОРИСТАННЯМ АНАЛІЗУ ТРЕНДІВ

4.1 Апробація інструментарію прогнозного моделювання з використанням часового аналізу трендів для розрахункової оцінки ЯПЦ

Розроблені методи прогнозного моделювання апробовано при вирішенні практичного завдання з визначення напрямку кінцевого поведіння з ВЯП АЕС України у довгостроковій перспективі, що передбачає вибір безпечного та економічно прийняттого ЯПЦ на період до 2100 року.

Схему побудови апробації розроблених методів з використанням комп'ютерних засобів наведено на рисунку 4.1. Послідовність етапів апробації є універсальною та може бути застосовано для техніко-економічної порівняльної оцінки енергетичних систем різної побудови, заснованих не лише на ядерних технологіях. Схема апробації враховує такі етапи:

- визначення цілей дослідження;
- визначення програмного засобу для моделювання ЯПЦ (з урахуванням аналізу, наведеного у розділі 1.4);
- формування ключових індикаторів (КІ) порівняльної оцінки (з застосуванням положень розділу 2.2);
- формування граничних умов підготовки вхідної техніко-економічної інформації зі складових елементів ЯПЦ (з застосуванням положень розділу 2.4);
- моделювання ЯПЦ з застосуванням програмного засобу MESSAGE та покроковий розрахунок відповідних КІ;
- аналіз результатів на відповідність цілям дослідження на основі оцінки значень КІ (мінімізація об'ємів накопичення ВЯП, мінімізація приведеної вартості вироблення електроенергії LCOE, тощо), та у разі невідповідності зміна вхідної техніко-економічної інформації зі складових елементів ЯПЦ;
- проведення аналізу чутливості отриманих результатів моделювання на зміну вхідного параметру (з застосуванням положень розділу 2.5).

Вплив вартості будівництва АЕС на результат аналізу ЯПЦ оцінюється на етапі підготовки вхідних параметрів для програмного засобу MESSAGE шляхом застосування розрахункової програми NEST (Nuclear Economics Support Tool) [87] з аналізу факторів економічної привабливості об'єкту генерації електроенергії. Розрахунки з використанням NEST включають визначення економічних показників АЕС для кожного з ЯПЦ (наведеної вартості виробництва електроенергії одним енергоблоком АЕС (LUEC), чистої приведеної вартості енергоблоку АЕС (NPV), його внутрішньої норми прибутку (IRR) та рентабельності (ROI)), при яких забезпечується мінімізація приведеної вартості виробництва електроенергії LCOE для прогнозованого ЯПЦ на всьому інтервалі дослідження.

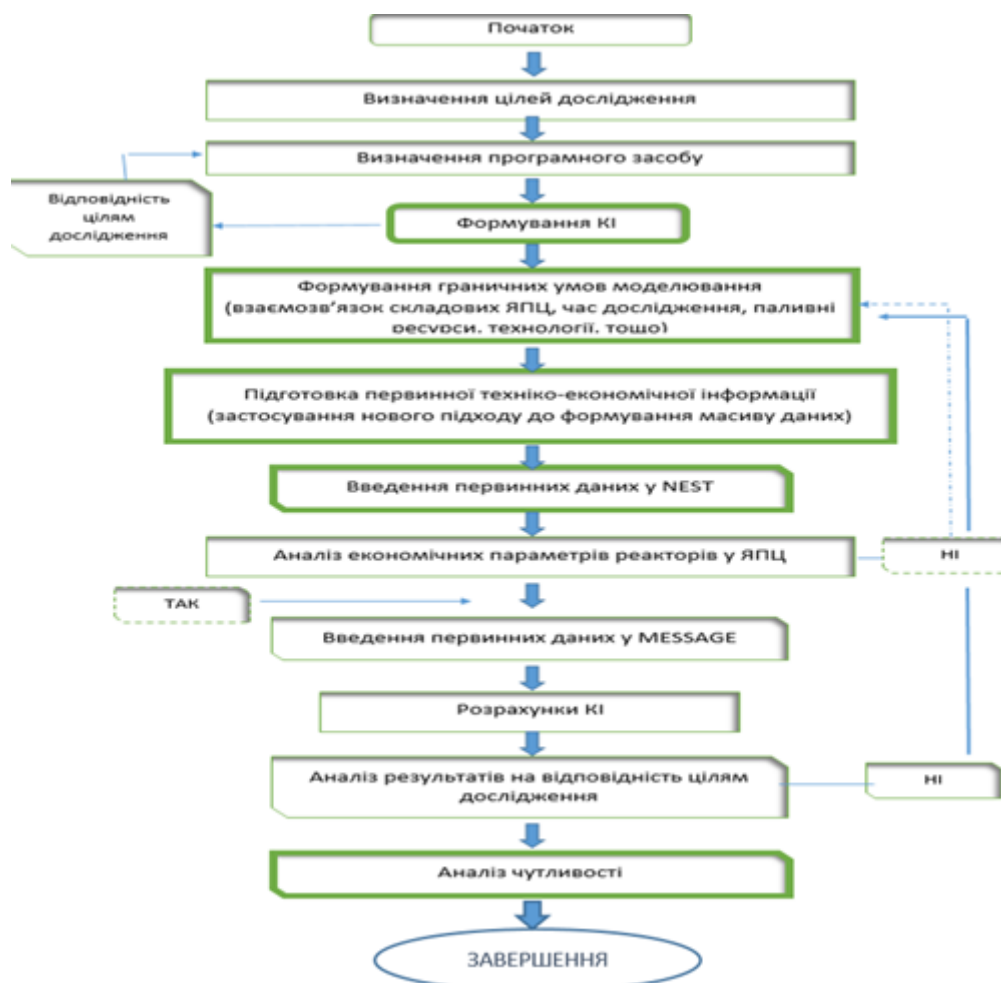


Рисунок 4.1 Схема апробації методів прогнозного моделювання ЯПЦ

4.1.1 Застосування розрахункової програми NEST для визначення техніко-економічних параметрів ЯПЦ

У таблиці 4.1 наведено техніко-економічні параметри умовних енергоблоків АЕС-1 та АЕС-2 у якості вхідної інформації для розрахункової програми NEST [88] при розгляді складових елементів відкритого ЯПЦ. Результати розрахунків LUEC, NPV, IRR та ROI наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 Техніко-економічні параметри енергоблоків АЕС-1 та АЕС-2 для розрахункової програми NEST

| № | Параметр | АЕС-1 | АЕС-2 |
|----|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| 1 | Потужність енергоблока електрична, МВт | 1170 | 1117 |
| 2 | Час будівництва, років | 6 | 6 |
| 3 | Термін експлуатації, років | 60 | 60 |
| 4 | Середній КВВП, % | 90 | 93 |
| 5 | Наведені середні капітальні витрати на будівництво, долл. США/кВт | 4 700 | 5 460 |
| 6 | Наведені постійні витрати на виробництво електроенергії, долл. США/кВт | 57,7 | 56.0 |
| 7 | Наведені змінні витрати на виробництво електроенергії, долл. США/кВт | 6,6 | 2.14 |
| 8 | Наведена вартість зняття з експлуатації, долл.США/МВт×ч | 6.0 | 6.0 |
| 10 | Ставка дисконтування, % | 10 | 10 |
| 12 | Прибуток з ринка, млн.долл США/рік | 1110 | 1100 |
| 14 | Прибутковість, % | 28 | 28 |

Таблиця 4.2 Результати розрахунку економічних показників для енергоблоків АЕС-1 та АЕС-2

| Показник | АЕС-1 | АЕС-2 |
|-----------------------------------|----------|----------|
| LUEC, долл. США/МВт×год | 97.07652 | 92.84974 |
| NPV, долл | 2047.536 | 2346.846 |
| IRR, % | 0.132162 | 0.141188 |
| ROI, % | 0.156918 | 0.169371 |
| Повні інвестиції, млн.долл.США | 7475.499 | 6740.283 |

За результатами розрахунків показники NPV для обох типів енергоблоків практично співставні, за іншими показниками техніко-економічні параметри енергоблоку АЕС-1 більш привабливі для подальшого застосування у якості вхідної інформації для програмного засобу MESSAGE.

4.1.2 Порівняльний аналіз ЯПЦ у довгостроковій перспективі

В даному розділі наведено результати застосування розроблених комп'ютерних моделей ЯПЦ програмного засобу MESSAGE для розрахункового аналізу ЯПЦ. Для апробації методів прогнозного моделювання з використанням часового аналізу трендів застосовано наступні обмеження:

- врахування наявної інфраструктури ядерної енергетики України;
- врахування можливості будівництва нових енергоблоків LWR (конкретний тип блоку визначається на підставі оцінки економічних показників розрахунковим засобом NEST);
- передбачається будівництво важководних реакторів типу CANDU [89] при розгляді частково-замкненого ЯПЦ для врахування повторного використання урану, якій отримується після переробки ВЯП;

- передбачається будівництво енергоблоків на швидких нейтронах FR на прикладі енергоблоку БН-800 [90] при розгляді замкненого ЯПЦ для врахування повторного використання плутонію після переробки ВЯП.

Апробацію проведено шляхом розрахунків КІ з використанням комп'ютерних моделей таких ЯПЦ:

- відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП;
- відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію;
- відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП, з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію (передбачається переробка ВЯП, що вивозиться до РФ та ВЯП, який зберігається у ССВЯП ЗАЕС після завершення проектного терміну зберігання 50 років);
- відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію та захороненням ВЯП у геологічному сховищі після завершення строку зберігання у ССВЯП ЗАЕС (50 років);
- відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію та захороненням ВЯП у геологічному сховищі після завершення строку зберігання у ССВЯП ЗАЕС та у ЦСВЯП (50 років);
- частково-замкнений ЯПЦ з використанням урану у CANDU з переробкою всього обсягу ВЯП, що вивозиться до РФ до 2020 року, та ВЯП, що вивантажується зі ССВЯП ЗАЕС після завершення проектного терміну його зберігання (50 років);
- частково-замкнений ЯПЦ з використанням урану у CANDU та плутонію у легководних реакторах LWR;
- замкнений ЯПЦ з використанням плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR.

4.1.2.1 Відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП

У сценарії розглядається накопичення ВЯП за весь період до 2100 року без його переробки. Загальний обсяг враховує реальні дані з вивезення ВЯП АЕС України на період до 2020 року включно.

Загальні результати розрахунків характеристик відкритого ЯПЦ, якій передбачає накопичення ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE, наведено на рисунку 4.2. Наведено структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, динаміку будівництва нових потужностей АЕС за весь період дослідження (з урахуванням часової градації на 5 та 10 років для отримання даних із будівництва енергоблоків нових АЕС у період 2030 – 2045 років). У таблиці 4.3 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для обраного ЯПЦ.

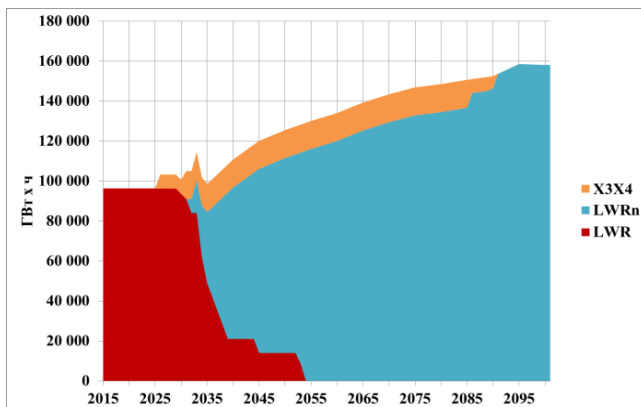


Рисунок 4.2 (а) - Структура генерації АЕС

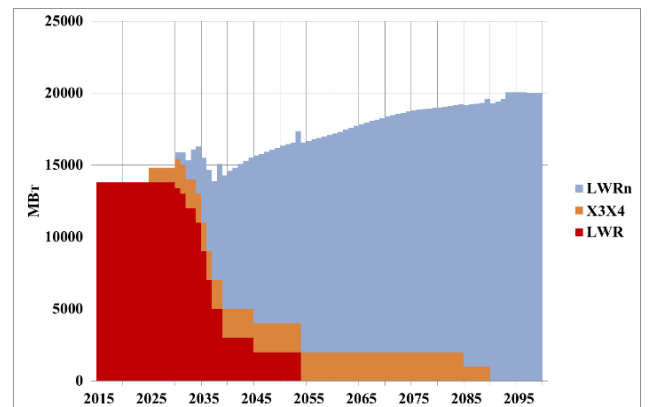


Рисунок 4.2 (б) - Структура потужності АЕС

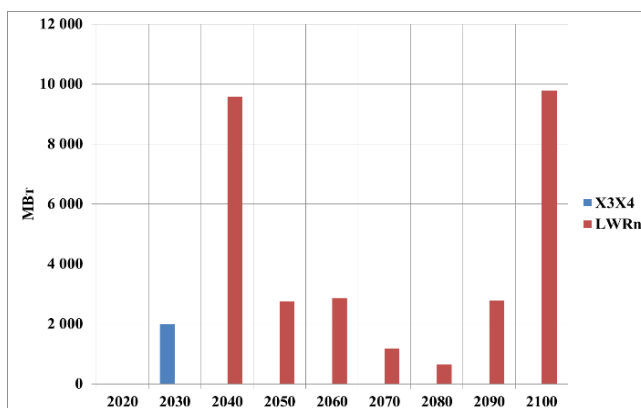


Рисунок 1.2 (в) - Графік введення нових потужностей АЕС (градація 10 років)

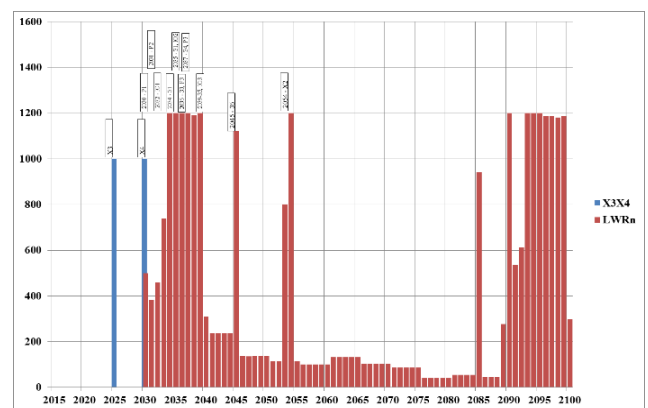


Рисунок 4.2 (г) - Графік введення нових потужностей АЕС (градація 5 років)

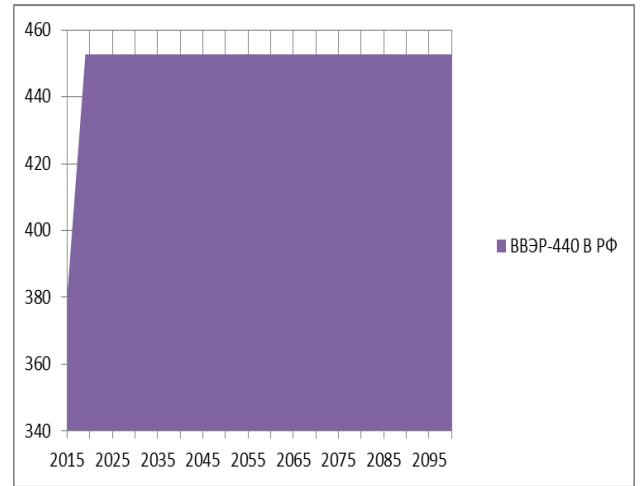
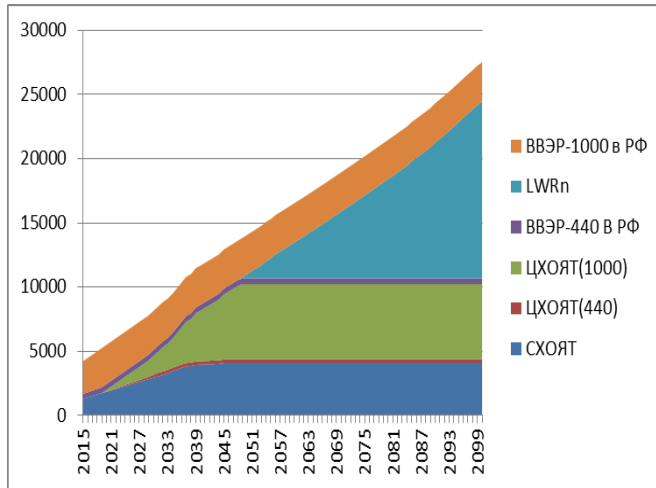


Рисунок 4.2 (д) - Динаміка накопичення ВЯП

Рисунок 4.2 (е) - Загальний об'єм вивезеного ВЯП ВВЕР-440

Рисунок 4 - Результати прогнозного моделювання відкритого ЯПЦ

Таблиця 4.3 Результати прогнозного розрахунку КІ для відкритого ЯПЦ

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|-----|--------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік /т(ВМ) | 5,56 | 5,35 | 5,31 | 5,38 | 5,88 | 7,08 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,14 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,09 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,02 |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5785 | 8427 | 10187 | 11948 | 14344 | 27775 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/ МВт×рік | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,12 |
| 10. | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/ рік/МВт ×рік | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11. | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/ МВт×г | 16,23 | 19,61 | 21,58 | 22,92 | 23,01 | 23,02 |

4.1.2.2 Відкритий ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП

У сценарії моделюється ЯПЦ з накопиченням ВЯП до 2100 року. Враховується переробка обсягу ВЯП, якій передбачається до вивезення до іншої країни до 2020 року включно, з подальшим накопиченням без використання урану та плутонію, який вилучається у результаті переробки ВЯП. Початок переробки ВЯП енергоблоків ВВЕР-1000 у іншій країні – 2025 рік. Враховується переробка ВЯП енергоблоків ВВЕР-440, яка здійснюється на період дослідження. Динаміка переробки ВЯП ВВЕР-1000 – 500 т(ВМ)/рік, ВЯП ВВЕР-440 – 50 т(ВМ)/рік . Вартість переробки – 1000 долл. США/кг ВМ.

Загальні результати розрахунків характеристик відкритого ЯПЦ, що передбачає накопичення ВЯП та часткову переробку віпрацьованого ядерного палива, з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE, наведено на рисунку 4.3. Наведено структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, динаміку накопичення відпрацьованого палива та продуктів переробки ВЯП.

У таблиці 4.4 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП.

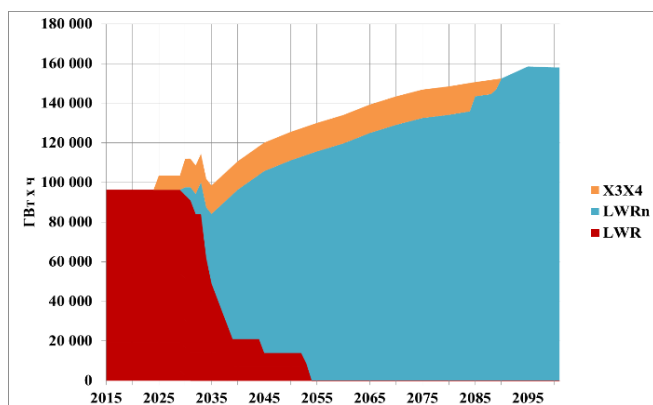


Рисунок 4.3 (а) - Структура генерації АЕС

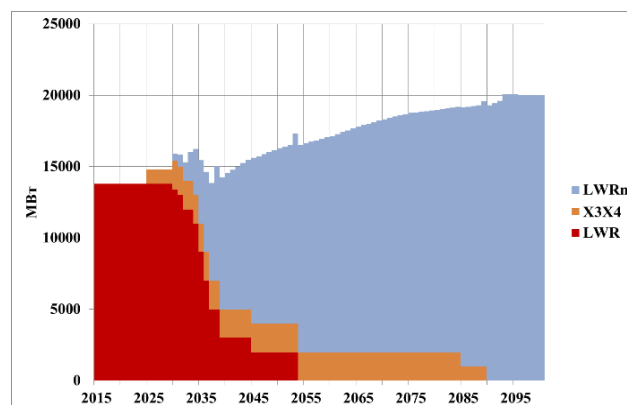


Рисунок 4.3 (б) - Структура потужності АЕС

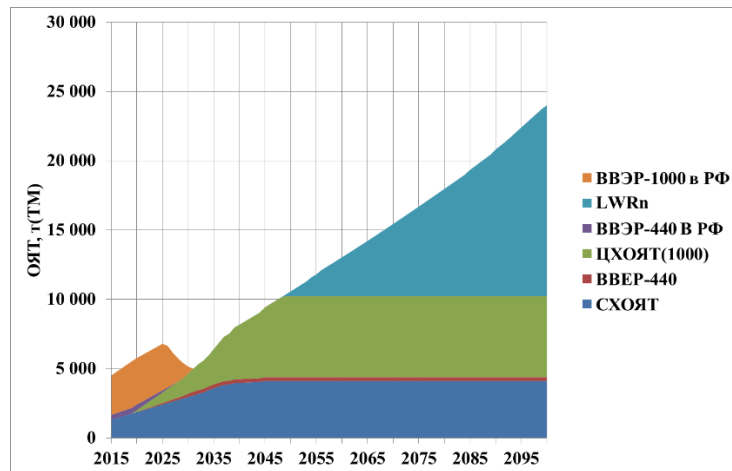


Рисунок 4.3 (в) - Динаміка накопичення ВЯП

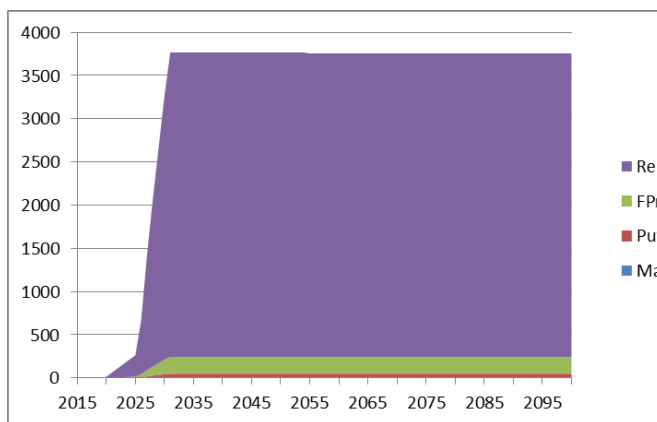


Рисунок 4.3 (г) - Загальний об'єм накопичених продуктів переробки ВЯП

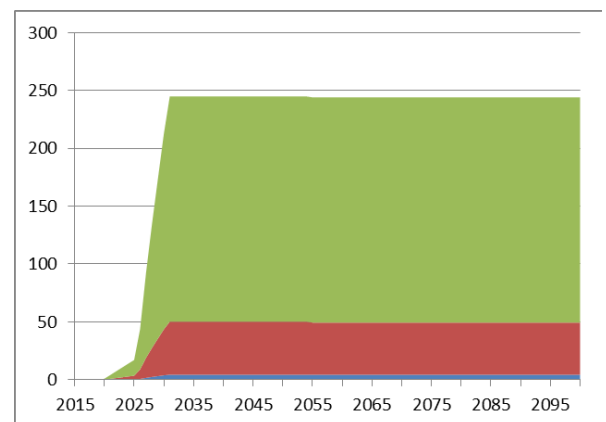


Рисунок 4.3 (д) - Загальний об'єм накопичених ЦПП та МА

Рисунок 4 - Результати прогнозного моделювання відкритого ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП

Таблиця 4.4 - Результати прогнозного розрахунку КІ параметрів відкритого ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|----|----------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік /т(ВМ) | 5,56 | 5,36 | 5,31 | 5,38 | 5,87 | 7,07 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,14 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,09 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5 771 | 5 155 | 6 416 | 8 179 | 10 577 | 24 020 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 13,77 | 3522 | 3522 | 3522 | 3522 | 3513 |

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|-----|--------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0,18 | 45,78 | 5,78 | 45,78 | 45,78 | 45,05 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0,76 | 194,53 | 194,53 | 194,53 | 194,53 | 194,53 |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0,02 | 4,42 | 4,42 | 4,42 | 4,42 | 4,42 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/МВт×рік | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,12 |
| 10. | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/рік/МВт×рік | 0,00 | 0,02 | 0,16 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| 11. | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/МВт×г | 16,37 | 21,40 | 3,18 | 24,47 | 24,53 | 24,53 |

4.1.2.3 Відкритий ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП, який зберігається у ССВЯП ЗАЕС, після завершення проектного терміну зберігання 50 років, без використання урану та плутонію

У сценарії моделюється ЯПЦ з накопиченням ВЯП до 2100 року. Враховується переробка ВЯП, що передбачається до вивезення до іншої країни до 2020 року включно, з подальшим накопиченням урану та плутонію без їх використання.

Додатково до сценарію, який розглянуто у розділі 4.1.2.2, враховується переробка ВЯП, що зберігається на площадке ЗАЕС після завершення проектного строку його зберігання (50 років). Початок переробки ВЯП ВВЕР-1000 у іншій країні – 2025 рік. Динаміка переробки ВЯП ВВЕР-1000 – 500 т(ВМ)/рік, ВЯП ВВЕР-440 – 50 т(ВМ)/рік. Вартість переробки – 1000 долл.США/кг ВМ.

Загальні результати розрахунків характеристик відкритого ЯПЦ з накопиченням ВЯП та частковою переробкою ВЯП зі сховищ без використання урану та плутонію з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE, наведено

на рисунку 4.4. Наведено структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, динаміку накопичення відпрацьованого палива та продуктів переробки ВЯП.

У таблиці 4.5 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП, який зберігається у ССВЯП ЗАЕС, після завершення проектного терміну зберігання 50 років, без використання урану та плутонію.

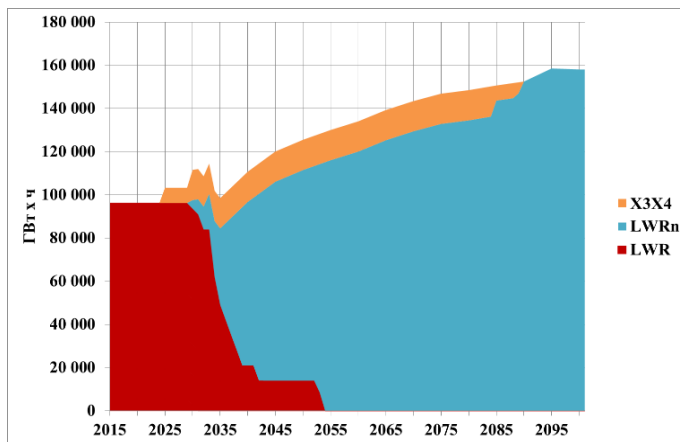


Рисунок 4.4 (а) - Структура генерації АЕС

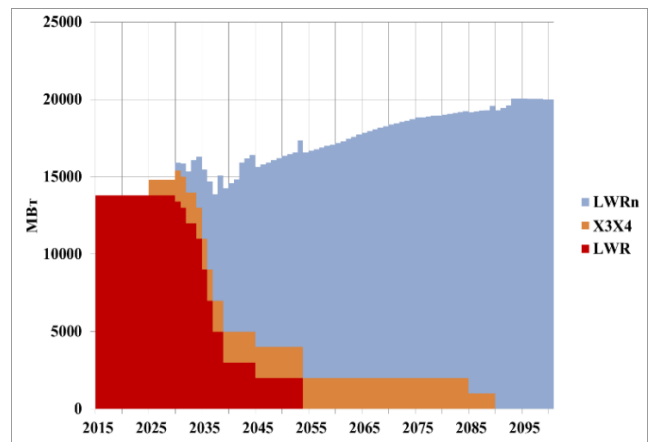


Рисунок 4.4 (б) - Структура потужності АЕС

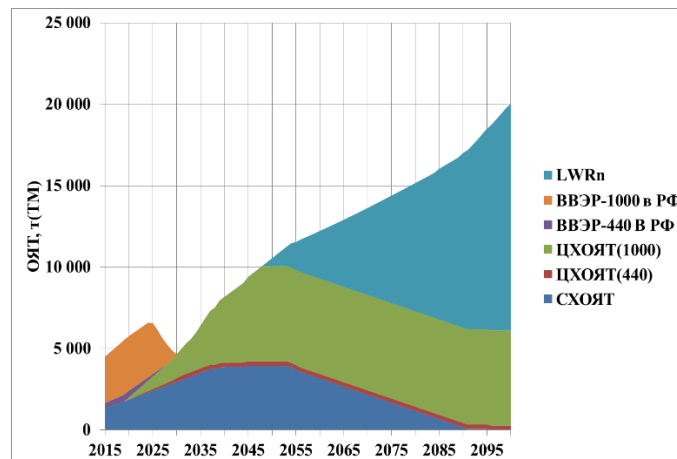


Рисунок 4.4 (в) - Динаміка накопичення ВЯП

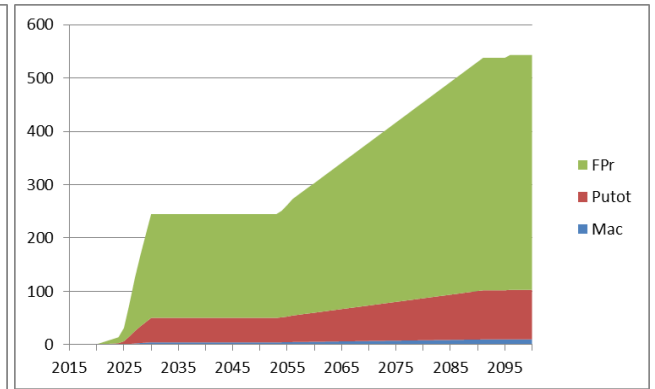
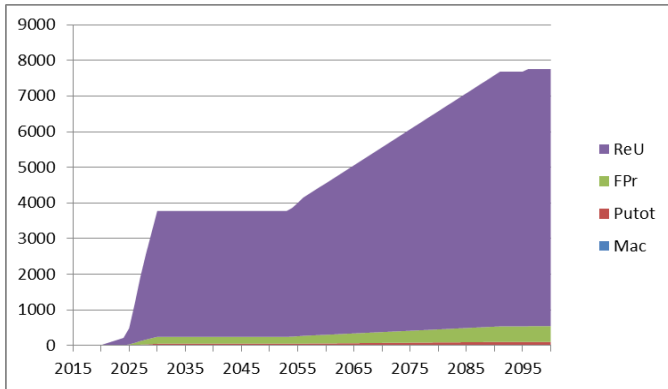


Рисунок 4.4 (г) - Загальний об'єм накопичених продуктів переробки ВЯП

Рисунок 4.4 (д) - Загальний об'єм накопичених ЦПП та МА

Рисунок 4.5 - Результати розрахунків параметрів відкритого ЯПЦ з накопиченням ВЯП та частковою переробкою ВЯП зі сховищ

Таблиця 4.5 - Результати прогнозного розрахунку КІ параметрів відкритого ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП зі сховищ без використання урану та плутонію

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|----|----------------------------------------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік /т(ВМ) | 5,56 | 5,30 | 5,28 | 5,40 | 5,89 | 7,08 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,14 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,090 | 0,023 | 0,026 | 0,027 | 0,024 | 0,016 |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5771 | 4655 | 6416 | 81778 | 10 553 | 20 034 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 13,77 | 3529 | 3529 | 3529 | 3529 | 7214 |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0,18 | 45,78 | 45,78 | 45,78 | 45,78 | 92,97 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0,76 | 194,5 | 194,5 | 194,5 | 194,5 | 440,4 |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0,017 | 4,423 | 4,423 | 4,423 | 4,423 | 9,923 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на | ОРР/рік/ МВт×рік | 0,148 | 0,153 | 0,154 | 0,153 | 0,140 | 0,117 |

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|----|-------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | одиницю виробленої енергії | | | | | | | |
| 10 | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/рік/МВт × рік | 0,004 | 0,019 | 0,016 | 0,012 | 0,009 | 0,006 |
| 11 | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/МВт×г | 16,78 | 21,79 | 23,00 | 24,84 | 24,93 | 24,93 |

4.1.2.4 Відкритий ЯПЦ з накопиченням та захороненням ВЯП у геологічних формаціях

У сценарії моделюється ЯПЦ з накопиченням ВЯП до 2100 року. Передбачається врахування у моделі довгострокового зберігання ВЯП у відповідних сховищах та часткову переробку ВЯП, що передбачається до вивезення до іншої країни до 2020 року включно, з подальшим накопиченням урану та плутонію без їх використання.

На відміну від попереднього сценарію враховується захоронення у геологічних формаціях ВЯП, що вивантажується з відповідного сховища після завершення проектного терміну його зберігання.

Початок переробки ВЯП енергоблоків ВВЕР-1000 у іншій країні – 2025 рік. Динаміка переробки ВЯП ВВЕР-1000 – 500 т(ВМ)/рік, ВЯП ВВЕР-440 – 50 т(ВМ)/рік. Вартість переробки – 1000 долл. США/кг ВМ.

Загальні результати прогнозного моделювання відкритого ЯПЦ з накопиченням та захороненням ВЯП у геологічних формаціях з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE наведені на рисунку 4.5. Наведено структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, динаміку накопичення відпрацьованого палива та продуктів переробки ВЯП.

У таблиці 4.6 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для обраного ЯПЦ.

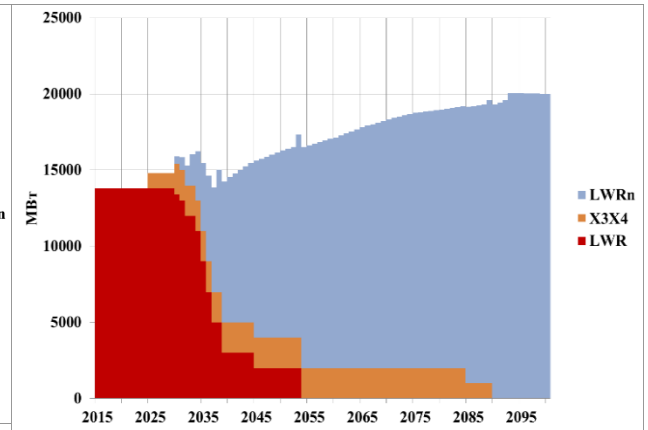
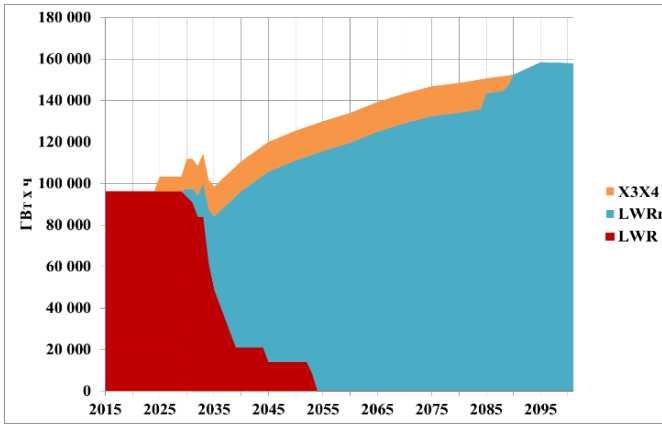


Рисунок 4.5 (а) - Структура генерації АЕС

Рисунок 4.5 (б) - Структура потужності АЕС

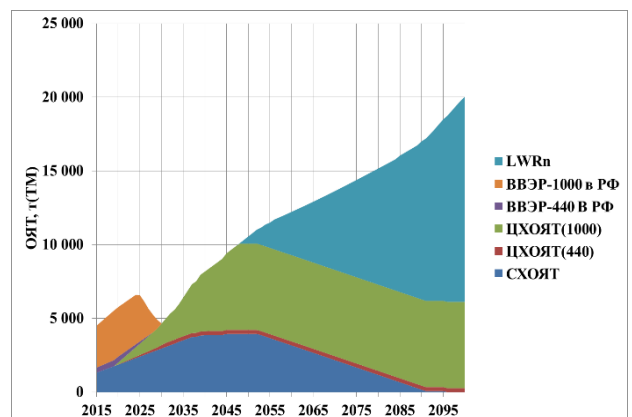
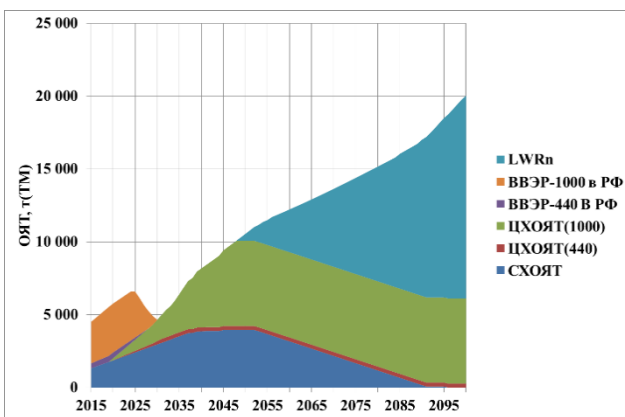


Рисунок 4.5 (в) - Динаміка накопичення ВЯП

Рисунок 4.5 (г) - Динаміка вивезення ВЯП з ССВЯП ЗАЕС

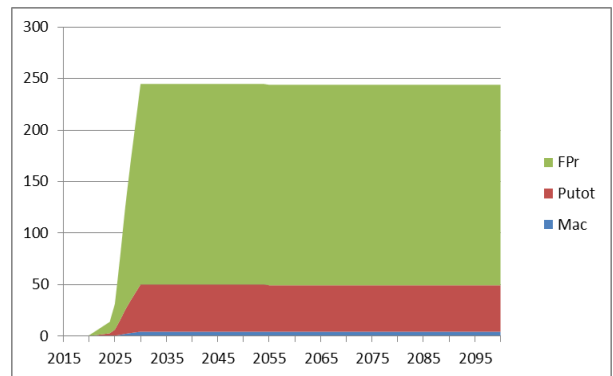
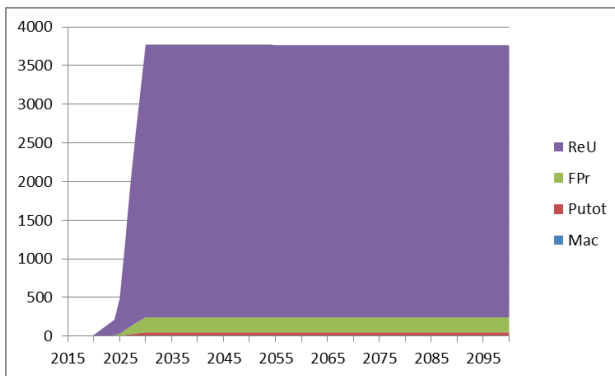


Рисунок 4.5 (д) - Загальний об'єм накопичених продуктів переробки ВЯП

Рисунок 4.5 (е) - Загальний об'єм накопичених ЦПП та МА

Рисунок 4.5 - Результати розрахунків параметрів відкритого ЯПЦ з накопиченням та захороненням ВЯП у геологічних формаціях

Таблиця 4.5 - Результати прогнозного розрахунку КІ параметрів відкритого ЯПЦ з накопиченням та захороненням ВЯП у геологічних формаціях

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|-----|--------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік/ т (ВМ) | 5,56 | 5,36 | 5,31 | 5,38 | 5,88 | 7,08 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,17 | 0,14 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,09 | 0,025 | 0,026 | 0,027 | 0,024 | 0,0158 |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5771 | 4655 | 6416 | 8178 | 10553 | 20034 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 13,77 | 3529,3 | 3529,3 | 3529,3 | 3529,3 | 3529,3 |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0,179 | 45,78 | 45,78 | 45,78 | 45,78 | 45,78 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0,759 | 194,52 | 194,52 | 194,52 | 194,529 | 194,52 |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0,017 | 4,422 | 4,422 | 4,422 | 4,422 | 4,422 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/ МВт×рік | 0,148 | 0,153 | 0,155 | 0,153 | 0,140 | 0,117 |
| 10. | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/ рік/МВт× рік | 0,00 | 0,02 | 0,015 | 0,012 | 0,008 | 0,003 |
| 11. | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/ МВт×Г | 16,25 | 21,42 | 23,26 | 24,55 | 24,61 | 24,61 |

4.1.2.5 Відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП, частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію, та захороненням всього обсягу ВЯП у геологічних формаціях

У сценарії моделюється ЯПЦ з накопиченням ВЯП до 2100 року. Передбачається врахування у моделі довгострокового зберігання ВЯП у

відповідних сховищах та часткову переробку ВЯП, що передбачається до вивезення до іншої країни до 2020 року включно, з подальшим накопиченням урану та плутонію без їх використання.

На відміну від попереднього сценарію враховується захоронення у геологічних формаціях всього об'єму ВЯП, що вивантажується зі сховищ ВЯП після 50 років зберігання.

Початок переробки ВЯП ВВЕР-1000 у іншій країні – 2025 рік. Динаміка переробки ВЯП ВВЕР-1000 складає 500 т (ВМ)/рік, для ВЯП ВВЕР-440 складає 50 т (ВМ)/рік. Вартість переробки складає 1000 долл. США/кг (ВМ).

Загальні результати прогнозного моделювання відкритого ЯПЦ з накопиченням ВЯП, частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію, та захороненням всього об'єму ВЯП у геологічних формаціях з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE наведено на рисунку 4.6. Представлено структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, динаміку накопичення відпрацьованого палива та продуктів переробки ВЯП.

У таблиці 4.7 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для обраного ЯПЦ.

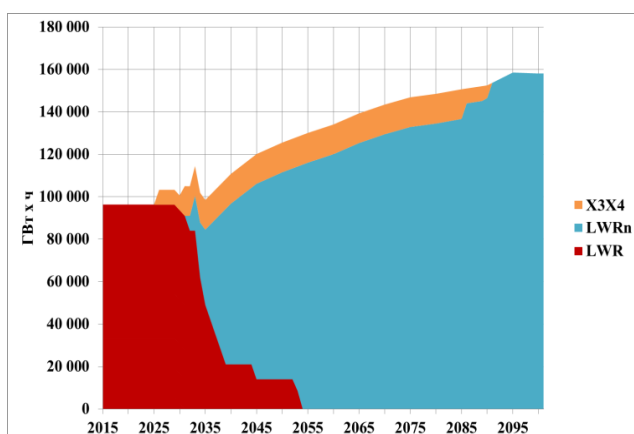


Рисунок 4.6 (а) - Структура генерації АЕС

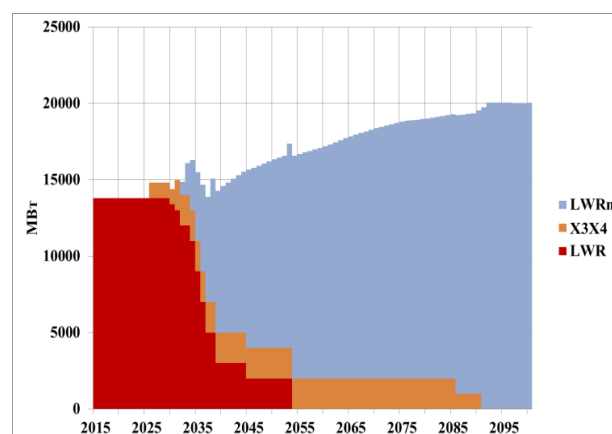


Рисунок 4.6 (б) - Структура потужності АЕС

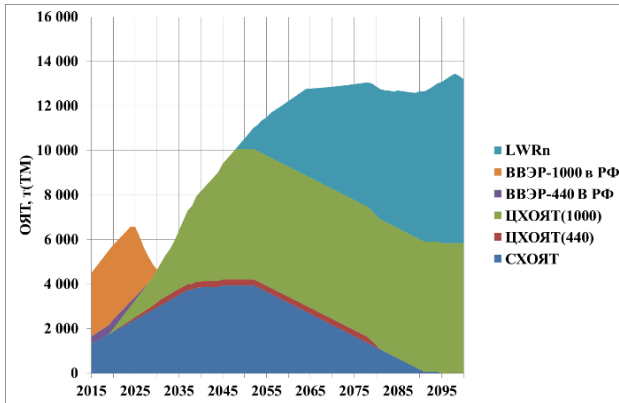


Рисунок 4.6 (в) - Динаміка накопичення ВЯП

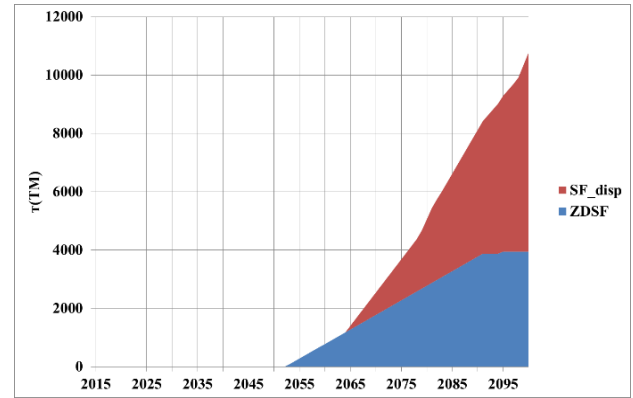


Рисунок 4.6 (г) - Динаміка вивезення ВЯП з СВЯП ЗАЕС

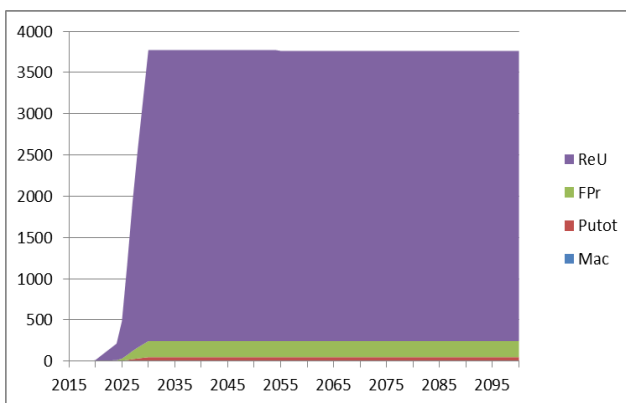


Рисунок 4.6 (д) - Загальний об'єм накопичених продуктів переробки ВЯП

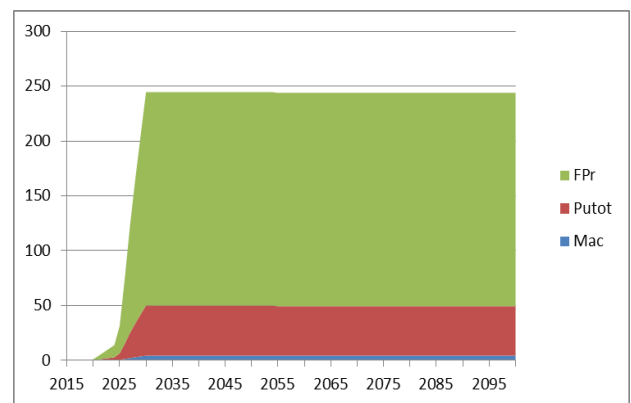


Рисунок 4.6 (е) - Загальний об'єм накопичених ЦПП та МА

Рисунок 4.6 - Результати прогнозного моделювання відкритого ЯПЦ з накопиченням та захороненням всього об'єму ВЯП у геологічних формаціях

Таблиця 4.7 Результати прогнозного розрахунку КІ параметрів відкритого ЯПЦ з накопиченням ВЯП, частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію та захороненням всього об'єму ВЯП у геологічних формаціях

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|----|------------------------------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік /т(ВМ) | 5,558 | 5,294 | 5,238 | 5,326 | 5,839 | 7,064 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,180 | 0,189 | 0,191 | 0,188 | 0,171 | 0,142 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,0875 | 0,0259 | 0,0268 | 0,0273 | 0,0242 | 0,0105 |

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|-----|--------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| | рік, на одиницю енергії | | | | | | | |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5770 | 4654 | 6416 | 8177 | 10553 | 13207 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 13,76 | 3529,3 | 3529,3 | 3529,3 | 3529,3 | 3529,3 4 |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0,1786 | 45,78 | 45,78 | 45,78 | 45,78 | 45,78 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0,75 | 194,52 | 194,52 | 194,52 | 194,52 | 194,52 |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0,017 | 4,284 | 4,284 | 4,284 | 4,284 | 4,284 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/ МВт×рік | 0,147 | 0,155 | 0,157 | 0,155 | 0,141 | 0,117 |
| 10. | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/ рік/МВт ×рік | 0,0002 | 0,0210 | 0,0158 | 0,0126 | 0,0086 | 0,0030 |
| 11. | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/ МВт×г | 15,912 | 20,872 | 23,915 | 24,966 | 25,013 | 25,014 |

4.1.2.6 Частково-замкнений ЯПЦ з використанням урану у CANDU

У сценарії моделюється переробка всього об'єму ВЯП, що вивозиться з АЕС до іншої країни до 2020 року включно, та ВЯП, що вивантажується зі сховищ довгострокового зберігання.

У моделі передбачається, що строк зберігання ВЯП у ЦСВЯП складає 100 років з подальшою його переробкою. Термін зберігання ВЯП у ССВЯП складає 50 років з подальшим його переробкою. Цінні продукти переробки у вигляді урану та плутонію, а також РАВ, повертаються до України.

На відміну від попередніх сценаріїв с розглядом відкритого ЯПЦ, не передбачається накопичення ВЯП. Також у моделі враховується відмінна від попередніх сценаріїв реакторна технологія, що передбачає використання у якості палива уран, що отримується після переробки ВЯП.

Загальні результати застосування комп'ютерної моделі MESSAGE до прогнозного моделювання частково-замкненого ЯПЦ з використанням урану у CANDU, наведені на рисунку 4.7. Показано структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, динаміку накопичення відпрацьованого палива та продуктів переробки ВЯП.

У таблиці 4.8 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для обраного ЯПЦ.

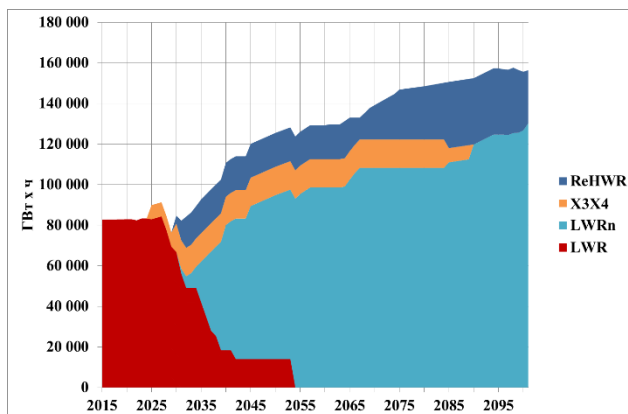


Рисунок 27 (а) - Структура генерації АЕС

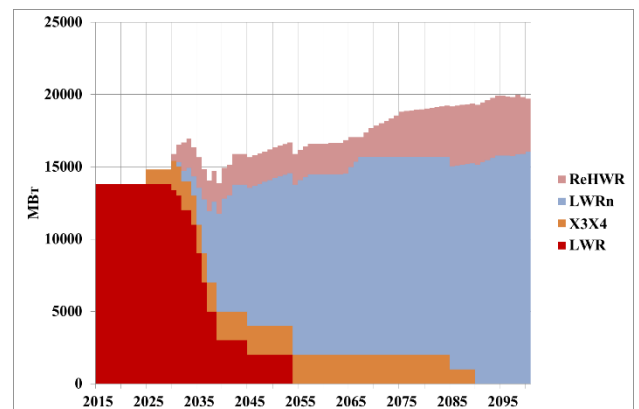


Рисунок 3 (б) - Структура потужності АЕС

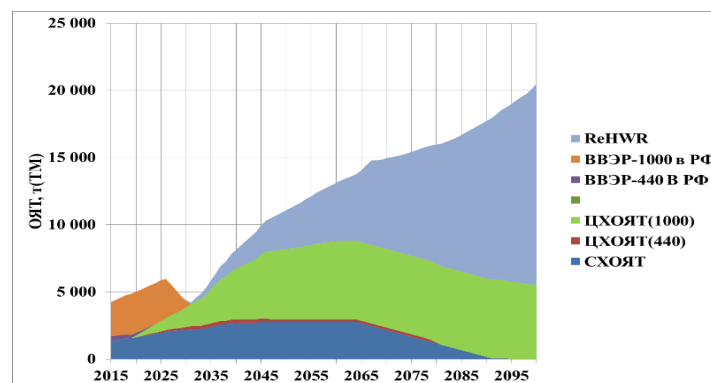


Рисунок 44.7 (в) Динаміка накопичення ВЯП

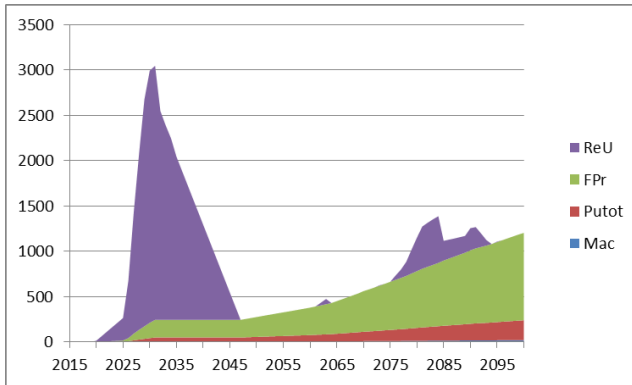


Рисунок 4.7 (г) Загальний об'єм накопичених продуктів переробки ВЯП

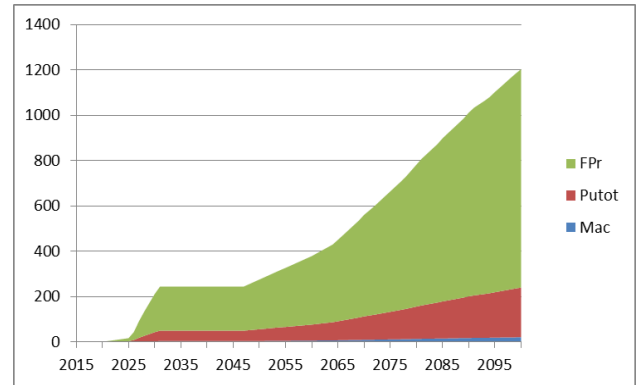


Рисунок 4.7 (д) Загальний об'єм накопичених ЦПП та МА

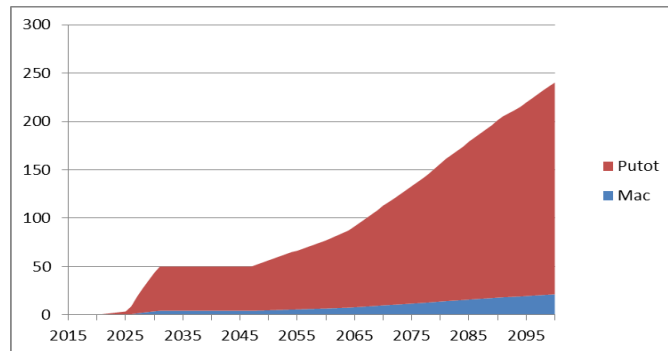


Рисунок 54.7 (е) Загальний об'єм накопичених Pu та МА

Рисунок 4.7 - Результати розрахунків параметрів частково-замкненого ЯПЦ

Таблиця 14.8 Результати прогнозного розрахунку КІ параметрів частково-замкненого ЯПЦ

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|----|----------------------------------------------------------------|-------------------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік/ т(ВМ) | 5,543 | 5,181 | 5,194 | 5,451 | 6,223 | 8,029 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/М Вт×рік | 0,180 | 0,193 | 0,193 | 0,184 | 0,161 | 0,125 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії | т(ВМ)/М Вт×рік | 0,097 | 0,029 | 0,029 | 0,031 | 0,028 | 0,017 |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5 525 | 4 394 | 5 885 | 8 172 | 11 279 | 20 727 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 13,768 | 2 779 | 1 799 | 1 049 | 0,00 | 0,00 |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0,179 | 39,7 | 45,7 | 45,7 | 51,6 | 218,9 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0,759 | 168,7 | 194,5 | 194,5 | 219,3 | 963,0 |

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|-----|--------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0,0167 | 3,71 | 4,28 | 4,28 | 4,83 | 21,27 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/ МВт×рік | 0,148 | 0,158 | 0,158 | 0,151 | 0,132 | 0,103 |
| 10. | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/ рік/МВт× рік | 0,3288 | 0,121 | 0,091 | 0,071 | 0,046 | 0,015 |
| 11. | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/ МВт×г | 20,844 | 25,88 | 28,33 | 29,76 | 29,72 | 29,69 |

4.1.2.7 Частково-замкнений з використанням урану у CANDU та плутонію у легководних реакторах LWR

Передбачається наявна інфраструктура ядерної генерації з вивезенням ВЯП до іншої країни до 2020 року включно та його подальшої переробки. Строк зберігання ВЯП у ЦСВЯП складає 10 років, у ССВЯП складає 50 років з подальшою його переробкою. Цінні продукти переробки у вигляді урану та плутонію, а також РАВ, повертаються до України.

На відміну від попереднього сценарію, розглядіється повторне використання урану у важководних реакторах типу CANDU, та плутонію у легководних реакторах LWR, що змінює потік ядерного матеріалу. Введення в експлуатацію LWR передбачається у моделі після 2030 року у якості заміщуючих енергоблоків. Загальна встановлена потужність LWR визначається накопиченням плутонію після переробки ВЯП.

Загальні результати використання комп'ютерної моделі MESSAGE для прогнозного моделювання частково-замкненого ЯПЦ, якій передбачає використання урану у CANDU та плутонію у легководних реакторах LWR, наведено на рисунку 4.8. Представлено структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, динаміку накопичення відпрацьованого палива та продуктів переробки ВЯП. У таблиці 4.9 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для обраного ЯПЦ.

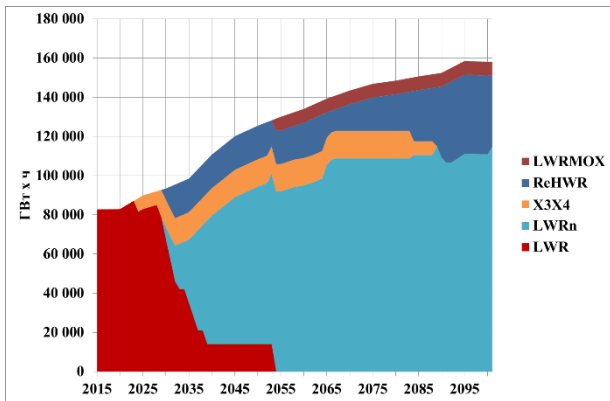


Рисунок 4.8 (а) - Структура генерації АЕС

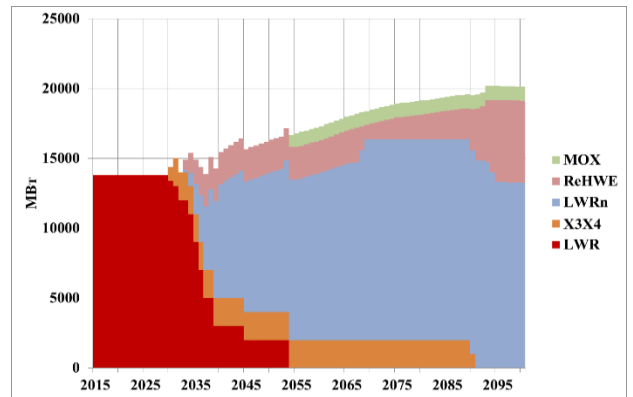


Рисунок 4.8 (б) - Структура потужності АЕС

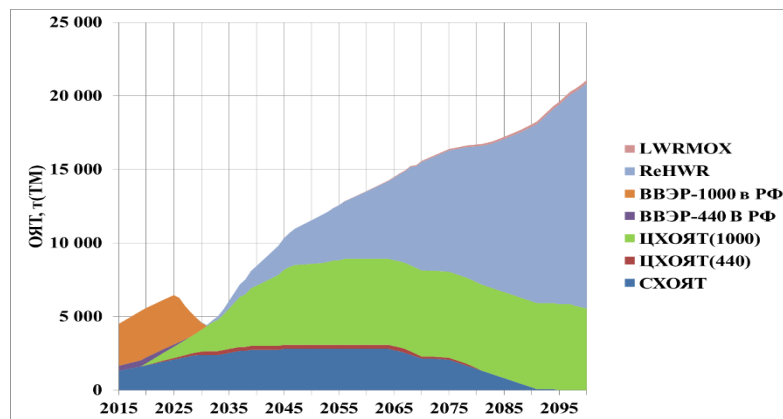


Рисунок 4.8 (в) - Динаміка накопичення ВЯП

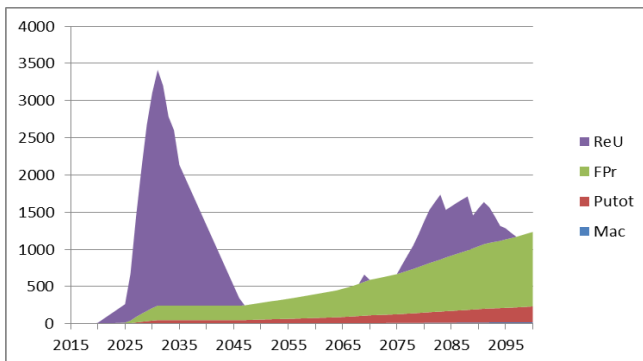


Рисунок 4.8 (г) Загальний об'єм накопичених продуктів переробки ВЯП

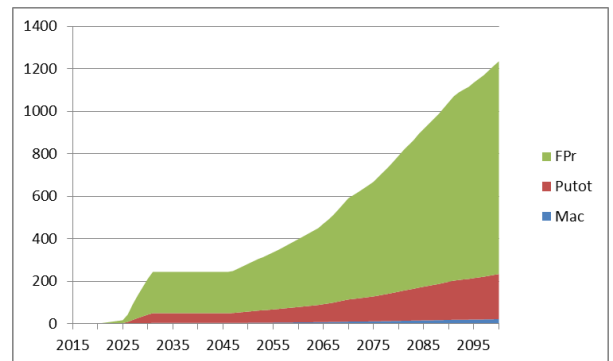


Рисунок 4.8 (д) - Загальний об'єм накопичених ЦПП та МА

Рисунок 4.8 - Результати прогнозного моделювання частково-замкненого ЯПЦ з використанням урану у CANDU та плутонію у легководних реакторах LWR

Таблиця 24.8 Результати прогнозного розрахунку КІ параметрів частково-замкненого ЯПЦ з використанням урану у CANDU та плутонію у легководних реакторах LWR

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|-----|--------------------------------------------------------------------|---------------------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік /т(ВМ) | 5,54 | 5,32 | 5,56 | 5,81 | 6,52 | 8,23 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,15 | 0,12 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,098 | 0,029 | 0,028 | 0,030 | 0,028 | 0,02 |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5595 | 4631 | 6056 | 8436 | 11549 | 21093 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 13,76 | 2892 | 1891,9 | 1078,4 | 0,00 | 0,00 |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0,179 | 39,71 | 45,78 | 45,78 | 52,89 | 212,30 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0,758 | 168,7 | 194,52 | 194,52 | 224,77 | 1000,94 |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0,0167 | 3,717 | 4,284 | 4,284 | 4,950 | 22,105 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/ МВт×рік | 0,148 | 0,154 | 0,148 | 0,141 | 0,126 | 0,100 |
| 10. | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/ рік/МВт ×рік | 0,0003 | 0,020 | 0,0176 | 0,0138 | 0,0106 | 0,0157 |
| 11. | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/ МВт×г | 18,09 | 25,36 | 28,194 | 29,254 | 29,115 | 29,21 |

4.1.2.8 Замкнений ЯПЦ з використанням плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR

У моделі ЯПЦ передбачається наявна інфраструктура ядерної генерації України з вивезенням ВЯП до іншої країни до 2020 року включно. Після 2020

року ВЯП направляється на зберігання до ЦСВЯП. Строк зберігання ВЯП у ЦСВЯП складає 100 років з подальшою його переробкою. Строк зберігання ВЯП у ССВЯП ЗАЕС складає 50 років з подальшою його переробкою. Цінні продукти переробки у вигляді урану та плутонію, а також РАВ, повертаються до України.

Передбачено повторне використання плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR. У моделі ЯПЦ введення в експлуатацію FR передбачено після 2050 року. Загальна невелика встановлена потужність FR визначається високою ціною на переробку ВЯП та вартістю фабрикації палива для FR.

Введення реакторів FR можливо очікувати з 2055 року (загальна встановлена потужність – від 300 МВт у 2055 до 1460 МВт у 2100 році), що визначається наявністю плутонію від переробки ВЯП.

Загальні результати прогнозного моделювання замкненого ЯПЦ з використанням комп'ютерної моделі MESSAGE з врахуванням використання плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR наведено на рисунку 4.9. Наведено структуру генерації, динаміку зміни встановленої потужності АЕС, графік введення нових АЕС, динаміку накопичення відпрацьованого палива та продуктів переробки ВЯП.

У таблиці 4.10 наведено результати прогнозного розрахунку КІ для обраного ЯПЦ.

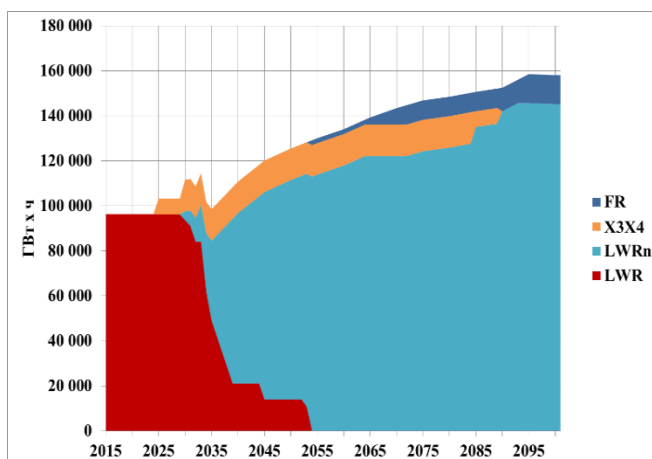


Рисунок 4.9 (а) - Структура генерації АЕС

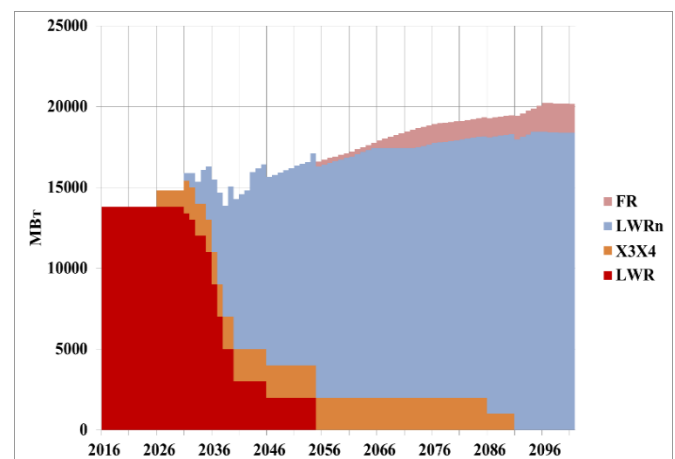


Рисунок 4.9 (б) - Структура потужності АЕС

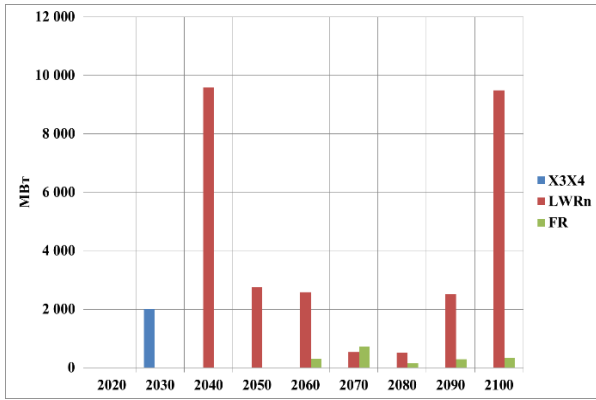


Рисунок 4.9 (в) - Графік введення нових потужностей АЕС (градація 10 років)

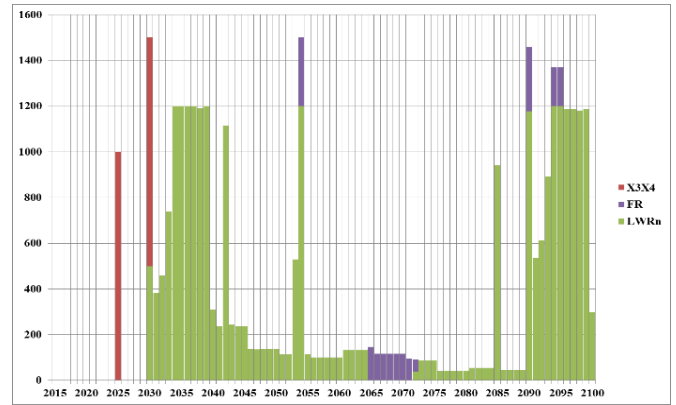


Рисунок 4.9 (г) - Графік введення нових потужностей АЕС (градація 5 років)

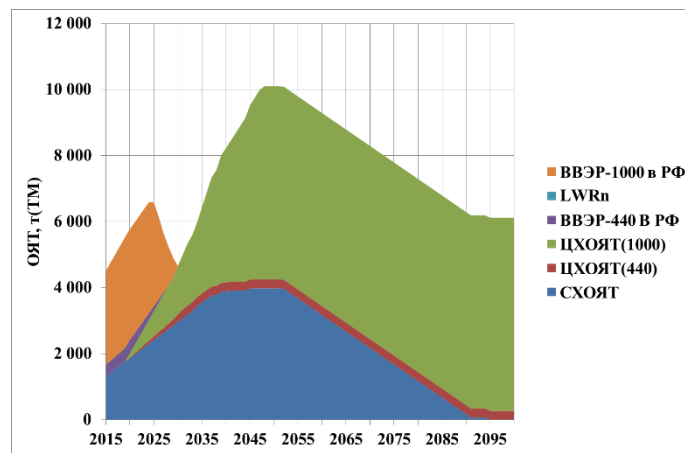


Рисунок 4.9 (д) - Динаміка накопичення ВЯП

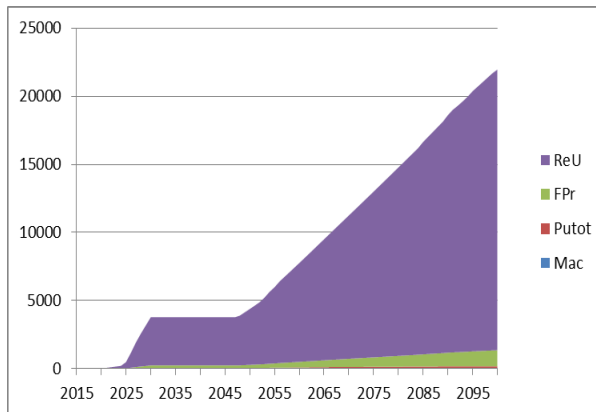


Рисунок 4.9 (е) - Загальний об'єм накопичених продуктів переробки ВЯП

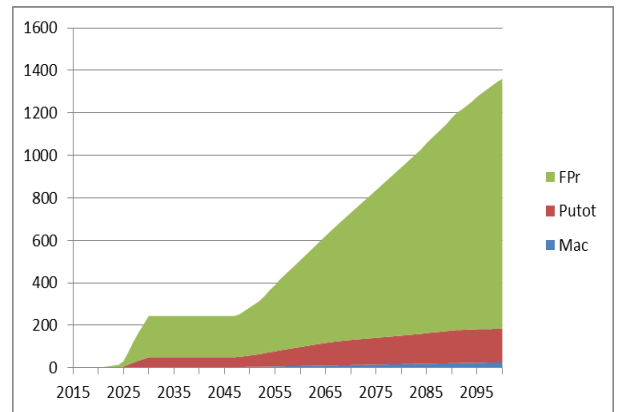


Рисунок 4.9 (ж) - Загальний об'єм накопичених ЦПП та МА

Рисунок 4.9 - Результати прогнозного моделювання замкнутого ЯПЦ з використанням плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR

Таблиця 34.10 Результати прогнозного розрахунку КІ замкненого ЯПЦ з використанням плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR

| № | Критерій | Роз-сть | 2020 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | 2100 |
|-----|--------------------------------------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-------|-------|---------|
| 1. | Середня вироблена енергія на одиницю маси природного урану | МВт×рік /т(ВМ) | 5,56 | 5,35 | 5,28 | 5,32 | 5,76 | 6,99 |
| 2. | Наведене споживання природного урану | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,180 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,14 |
| 3. | Наведена маса ВЯП, що накопичується за рік, на одиницю енергії | т(ВМ)/ МВт×рік | 0,087 | 0,025 | 0,026 | 0,02 | 0,02 | 0,005 |
| 4. | Обсяг накопичення ВЯП | т(ВМ) | 5771,3 | 4655,6 | 6428,3 | 8226 | 10098 | 6118,1 |
| 5. | Обсяг накопичення U після переробки | т(ВМ) | 13,768 | 3529,3 | 3529,3 | 3295 | 4101 | 20592 |
| 6. | Обсяг накопичення Pu після переробки | т(ВМ) | 0,179 | 45,782 | 45,782 | 45,78 | 53,20 | 156,902 |
| 7. | Обсяг накопичення продуктів поділу FPr після переробки ВЯП | т(ВМ) | 0,759 | 194,52 | 194,52 | 194,5 | 226,0 | 1177,57 |
| 8. | Обсяг напрацювання МА | кг | 0,017 | 4,284 | 4,284 | 4,284 | 4,978 | 26,020 |
| 9. | Наведені потужності зі збагачення ЯП на одиницю виробленої енергії | ОРР/рік/ МВт×рік | 0,148 | 0,153 | 0,156 | 0,155 | 0,143 | 0,118 |
| 10. | Наведені потужності з переробки ВЯП на одиницю виробленої енергії | т(ВМ)/ рік/МВт ×рік | 0,0005 | 0,021 | 0,015 | 0,012 | 0,009 | 0,018 |
| 11. | Наведена вартість виробництва електроенергії | долл. США/ МВт×г | 16,37 | 21,70 | 23,54 | 24,83 | 24,94 | 24,982 |

4.2 Апробація методу порівняльної критерійної оцінки ЯПЦ

На підставі прогнозного моделювання ЯПЦ та розрахунку значень КІ для часового інтервалу 2100 року для кожного з ЯПЦ, наведених у розділах 4.1.2.1 – 4.1.2.8, проведено формування зведеної таблиці значень КІ. З використанням даної таблиці та застосуванням методу агрегації результатів критерійної порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком різнофізичних КІ, наведеного у розділі

2.3, отримано результати порівняльної оцінки ЯПЦ України до 2100 року, які наведені на рисунку 4.10. Результати роботи викладено у [91].

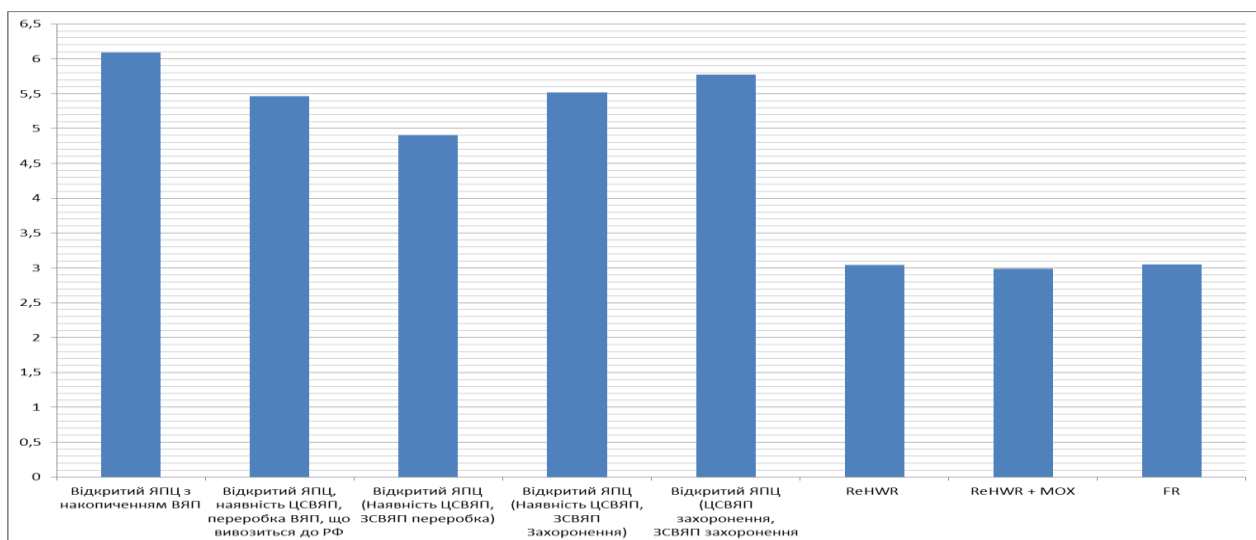


Рисунок 4.10 Результат порівняльної оцінки ЯПЦ України до 2100 року

За результатами прогнозного моделювання та критерійної порівняльної оцінки ЯПЦ можливо прийти до висновку, що на сьогодні ЯПЦ, які передбачають зберігання ВЯП у довгострокових сховищах з подальшим його захороненням у геологічних формаціях після 2100 року є найбільш раціональними з урахуванням наявної в Україні інфраструктури АЕС та елементів довгострокового зберігання ВЯП.

4.3 Апробація методу аналізу чутливості для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ

Відсутність достовірної інформації щодо техніко-економічних параметрів, що характеризують елементи ЯПЦ, може виступати джерелом невизначеності розрахунків КІ та подальшої їх порівняльної оцінки. При прогнозуванні розвитку ядерної енергетики на довільний період існує варіативність вхідних параметрів, яка визначається відсутністю достовірної вхідної технічної та економічної інформації для побудови розрахункової моделі,

необхідністю врахування технологічних рішень, які не є референтними на час дослідження, наявність змінного ринку послуг, які надаються складовими елементами, що входять до організаційно-технічної структури ЯПЦ, тощо. З метою оцінки впливу можливих ризиків на кінцевий результат порівняльної оцінки у світовій практиці застосовується аналіз чутливості параметрів ЯПЦ до зміни вхідної інформації.

У роботі [92] наведено підходи до аналізу чутливості економічних індикаторів ЯПЦ, які включають захоронення ВЯП у геологічних формаціях, або переробку ВЯП з повторним використанням цінних продуктів. Результати оцінки отримано на основі загального опису ЯПЦ та відповідних техніко-економічних даних. У роботі [93] наведено результати аналізу зміни вихідних параметрів ЯПЦ як результат розрахунку при зміні часу витримки ВЯП у приреакторному басейні, часового інтервалу реалізації складових елементів ЯПЦ, тощо. Отримані результати не враховують особливості організації ЯПЦ, є загальними та визначають лише можливий напрямок аналізу чутливості КІ до зміни вхідних даних.

У рамках даного дослідження виконано аналіз чутливості результатів порівняльної оцінки ЯПЦ України на прикладі оцінки наведеної вартості виробництва електроенергії LCOE. Результати порівняльної оцінки, які показано у розділі 4.2, демонструють економічну доцільність поступове накопичення ВЯП як сценарію з мінімальним значенням LCOE, що забезпечує економічну привабливість ЯПЦ України та максимальне використання наявної ядерної інфраструктури. Втім, отримані висновки може бути змінено у разі зміни вхідних техніко-економічних параметрів при застосуванні аналізу чутливості. У загальному випадку аналіз чутливості включає вивчення впливу варіації одного параметру на стан системи при незмінних значеннях інших параметрів, що характеризують об'єкт дослідження.

З урахуванням світового досвіду проведено аналіз чутливості LCOE для 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). Результати аналізу чутливості для різних ЯПЦ наведено на рисунку 4.11.

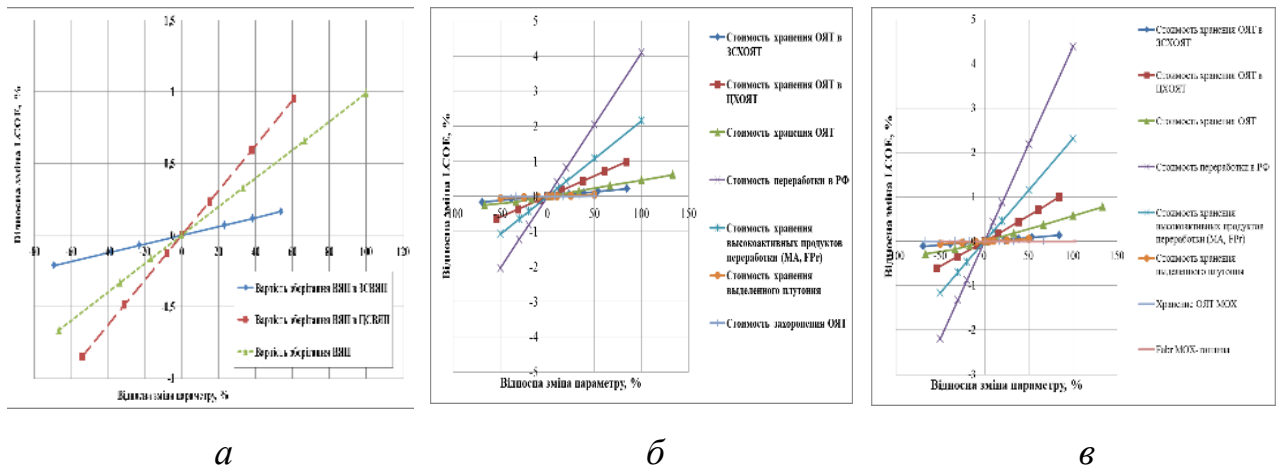


Рисунок 4.11 Результати аналізу LCOE: *а* — ЯПЦ з накопиченням ВЯП; *б* — ЯПЦ з захороненням ВЯП у геологічному сховищі *в* — ЯПЦ з переробкою ВЯП та повторним використанням ядерного матеріалу

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) [94].

Результат застосування аналізу чутливості для розрахунку зміни LCOE, від зміни початкових даних з вартості елементів для відкритого, частково-замкненого та замкненого ЯПЦ наведено у Додатку Б.

4.4 Верифікація комп'ютерної моделі ЯПЦ

Верифікацію комп'ютерної моделі ЯПЦ проведено на основі співставлення результатів розрахунків параметрів відкритого ЯПЦ з накопиченням ВЯП, отриманих з використанням програмного засобу MESSAGE, та розрахунків, отриманих з використанням програми ROADMAPS-Excel Tool (ET) [95, 96].

ROADMAPS-ET є гнучким, універсальним, максимально наближеним до потреб користувача розрахунковим засобом для аналізу розвитку ядерної енергетики на національному, регіональному та глобальному рівнях. Розроблений у рамках проекту МАГАТЕ [95], ROADMAPS-ET є інструментарієм у підтримку прийняття рішення на основі структурованої та уніфікованої бази даних. Специфічними особливостями ROADMAPS-ET є узгодженість вхідних даних з наявними техніко-економічними базами даних МАГАТЕ та других провідних установ з технологій ЯПЦ (наприклад, PRIS [96], iNFCIS [97], WNA [98], WISE-URANIUM [99]).

Критеріями успішності верифікації є кореляція результатів розрахунків наступних параметрів, що характеризують ЯПЦ: загальний об'єм накопичення ВЯП, загальна встановлена потужність енергоблоків АЕС, споживання природнього урану. Розрахункові оцінки проведено на період до 2100 року. Таку кореляцію параметрів проаналізовано за їхнім значенням у перерізі 2030, 2040 та 2050 років.

З використанням ROADMAPS-ET проведено розрахунковий аналіз параметрів відкритого ЯПЦ України з урахуванням будівництва енергоблоків № 3,4 Хмельницької АЕС до 2030 року та будівництва нових енергоблоків АЕС після 2030 року. Результати наведено на рисунку 4.12.

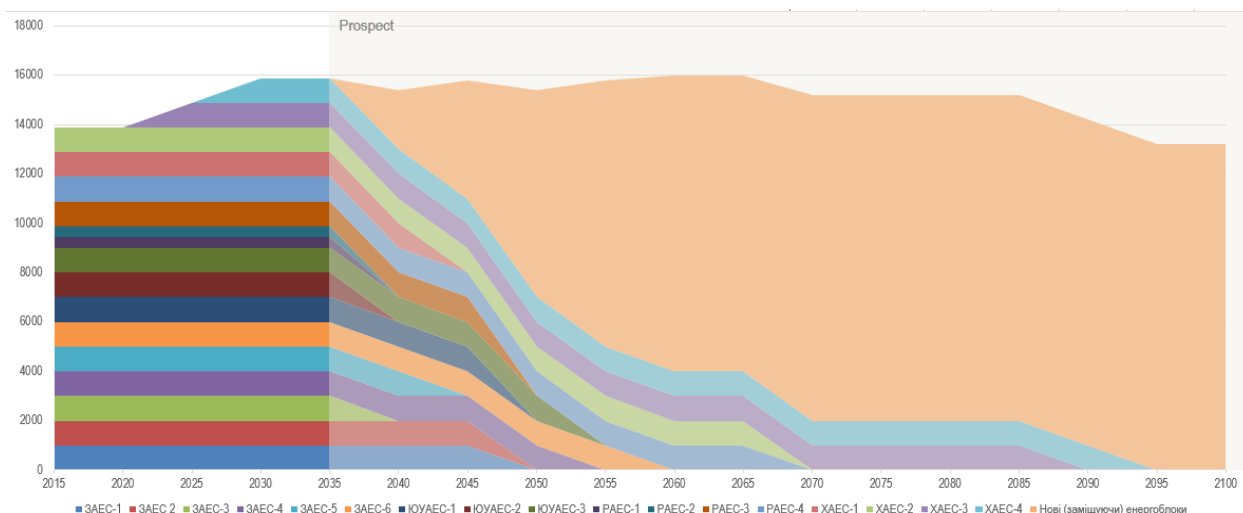


Рисунок 4.12 Зміна встановленої потужності АЕС України на період до 2100

Максимальний відпуск електроенергії до ОЕС України у період до 2050 року можливо очікувати у 2035 році на рівні 102 млрд кВт×г за рахунок введення в експлуатацію енергоблоків ХАЕС 3 та 4, а також поступового підвищення КВВП існуючих енергоблоків до 90%. Враховуючи, що загальна встановлена потужність АЕС у 2050 році складе 15,4 ГВт у порівнянні з 15,8 ГВт у 2035 році, відпуск електроенергії до ОЕС знизиться до 13 860 МВт у рік (99,3 млрд кВт×г) та залишиться на даному рівні до 2055 року. Після 2050 року максимальне виробництво електроенергії відбуватиметься у 2060 та 2065 роках на рівні 103,7 млрд кВт×г з подальшим зменшенням.

На рисунку 4.13 наведено результат розрахунку з використанням ROADMAPS-ET потреб у природньому урані на період до 2100 року. Починаючи з 2050 року буде спостерігатись дефіцит у природньому урані на рівні 70 т (ВМ) з подальшим збільшенням дефіциту до 2100 року та досягненням максимального значення у 2070 році на рівні 541 т (ВМ). Даний факт потребує вирішення за рахунок закупівлі природнього урану на світовому ринку.

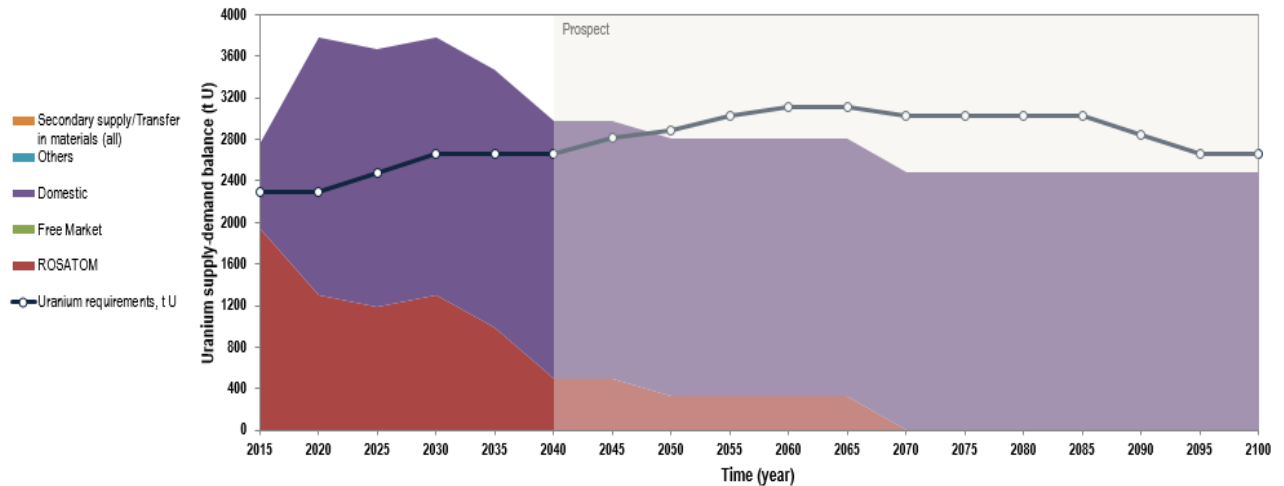


Рисунок 4.13 Потреби у природньому урані на період до 2100 року

На рисунку 4.14 наведено результат прогнозування з використанням ROADMAPS-ET загального об'єму накопичення ВЯП до 2100 року, яке визначається споживанням природнього урану у якості ядерного палива, встановленою потужністю енергоблоків АЕС та строком їх експлуатації. За результатами розрахунку, у 2030 році загальний об'єм накопиченого ВЯП складе 9 028 т (ВМ), у 2050 році - 14 807 т (ВМ). Загальний об'єм накопичення ВЯП до 2100 року складе 29 507 т (ВМ). Зазначимо, що дані показники включають відпрацьовані ВТВЗ ВВЕР-440 та ВВЕР-1000, які було направлено до іншої країни на довгострокове зберігання та подальшу переробку.

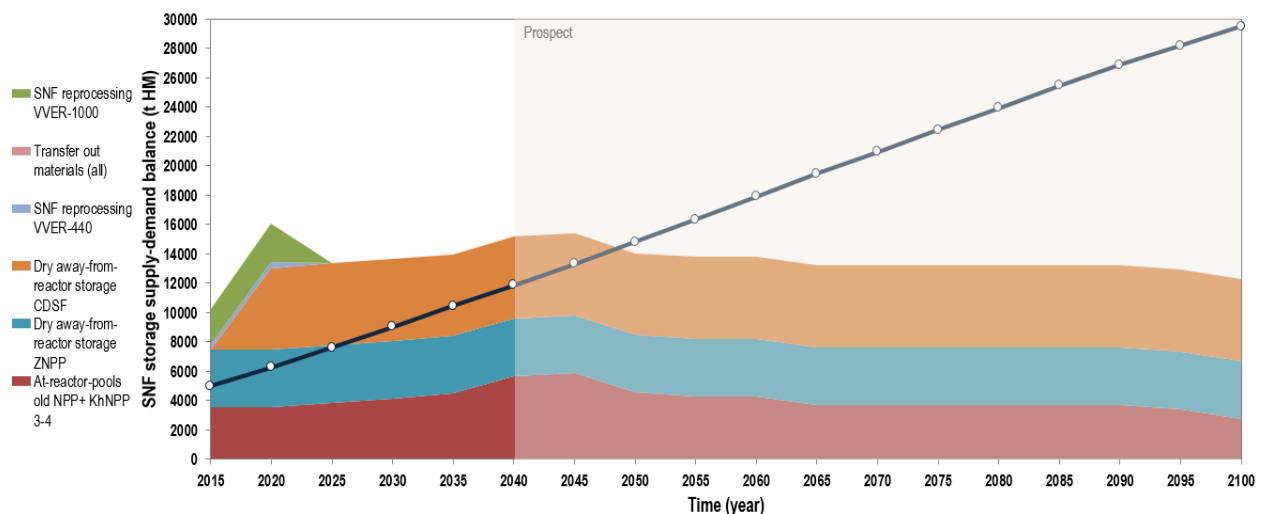


Рисунок 4.14 Загальний об'єм накопичення ВЯП до 2100 року

Результат співставлення розрахункових значень параметрів, що характеризують відкритий ЯПЦ, отриманих з використанням комп'ютерної моделі ЯПЦ для програмного засобу MESSAGE та розрахункової програми ROADMAPS-ET наведені у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 Співставлення розрахункових значень характеристик ЯПЦ ((а) - ROADMAPS-ET, (б) - MESSAGE)

| | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|--------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | а | б | а | б | а | б |
| Споживання природнього урану, т (ВМ) | 2656 | 2812 | 2651 | 2812 | 2516 | 2868 |
| Обсяг накопичення ВЯП, т (ВМ) | 8877 | 8427 | 11674 | 11948 | 14300 | 14344 |

Співставлення результатів застосування розрахункових програм ROADMAPS-ET та MESSAGE для розрахунків параметрів ЯПЦ демонструє кореляцію між отриманими висновками. Максимальне розходження у визначенні обсягу накопичення ВЯП складає 5,1%, у визначенні обсягу споживання природнього урану складає 12,3%, що для прогнозних моделей вважається задовільним.

4.5 Застосування інструментарію прогнозного моделювання до альтернативної оцінки розвитку ядерної енергетики

У даному розділі наведено приклад застосування інструментарію прогнозного моделювання до оцінки розвитку ядерної енергосистеми у порівнянні з іншими видами генерації, присутніми в ОЕС України. Додатково до оцінки впливу вартісних показників, у рамках прогнозного аналізу розвитку ядерної енергетики на прикладі відкритого ЯПЦ застосовано міжнародний досвід врахування факторів ризику зі впливу різних видів генерації електроенергії на навколишнє середовище.

Загальну інформацію щодо техніко-економічних даних для різних типів генерації наведено у таблиці 4.12. Відповідно до наявної інформації, для всіх видів ВДЕ капітальні витрати на будівництво (від 900 долл.США/кВт для вітрової генерації до 2300 долл.США/кВт для електростанцій на вуглі) значно нижче ніж витрати на будівництво АЕС (4900 долл.США/кВт), що може накладати значні питання щодо економічної привабливості будівництва нових енергоблоків АЕС при проведенні прогнозного аналізу.

Таблиця 4.12 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, долл США/кВт | 900 | 1500 | 2300 | 4700 5900 |
| КПД, % | - | - | 35 | 33 |
| Постійні витрати, долл США/кВт | 39,7 [100] | 23,4 [100] | 50,9 [100] | 100 [100] |
| Операційні (змінні) витрати, долл США/кВт×год | - | - | 5,00 [100] | 2,3 [100] |
| КВВП, % | 0,25 | 0,15 | 0,85 | 90 |
| Проектний термін експлуатації, років | 25 | 15 | 40 | 60 |
| Період будівництва, років | 1 | 1 | 4 | 6 |

Результати моделювання сценаріїв розвитку ОЕС України з використанням коду MESSAGE на довгостроковий період наведено на рисунку 4.15. Розрахунки виконано при врахуванні ставки дисконтування 10%, яка притаманна для країн що розвиваються (на відміну від 3% та 5% для розвинених країн). Розглянуто сценарії з вартістю будівництва легководних АЕС 4700

долл.США/кВт та 5900 долл.США/кВт, при різних податках C на викиди CO_2 ($C=0$; 5 та 50 долл.США/т). Відповідним чином зроблено індексацію сценаріїв (наприклад, N4700_C50 LWRn, що відповідає вартості будівництва 4700 долл.США/кВт, $C=50$ долл.США/т).

Результати демонструють, що частка 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 долл.США/кВт та до 10% при вартості будівництва АЕС на рівні 5900 долл.США/кВт при відсутності податку на викиди CO_2 ($C=0$ долл.США/т). Введення податку на викиди CO_2 на рівні 5 долл.США/т призводить до росту долі АЕС у виробництві електроенергії не більше 3%.

Значне збільшення присутності АЕС спостерігається для сценаріїв з податком на викиди CO_2 на рівні 50 долл.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 таблиці 4.12 необхідне врахування додаткових рішень щодо обґрунтування конкурентної привабливості АЕС в умовах впровадження альтернативної генерації після 2030 року.

Одним з підходів є врахування можливих ризиків (externalities) [101], 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 представлено у вартості електроенергії. Однак, даний підхід дозволяє

прийнятно 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 таблиці 4.13 [101].

Таблиця 4.13 Діапазон зміни та оцінка (вартісна) ризику для типів генерації електроенергії (цент/кВт×год)

| Значення | Вугіль | Нафта | Газ | АЕС | Гідро | Вітро | Сонячна | Біомаса |
|------------------------|--------|-------|------|-----|-------|-------|---------|---------|
| Мін | 3,0 | 4 | 0,49 | 0,2 | 0,03 | 0,001 | 0,25 | 0,08 |
| Мах | 9,5 | 9 | 3 | 1,5 | 1 | 0,25 | 0,6 | 3,5 |
| Прийняте у розрахунках | 5,4 | 5,9 | 1,7 | 0,6 | 0,4 | 0,1 | 0,5 | 1,3 |

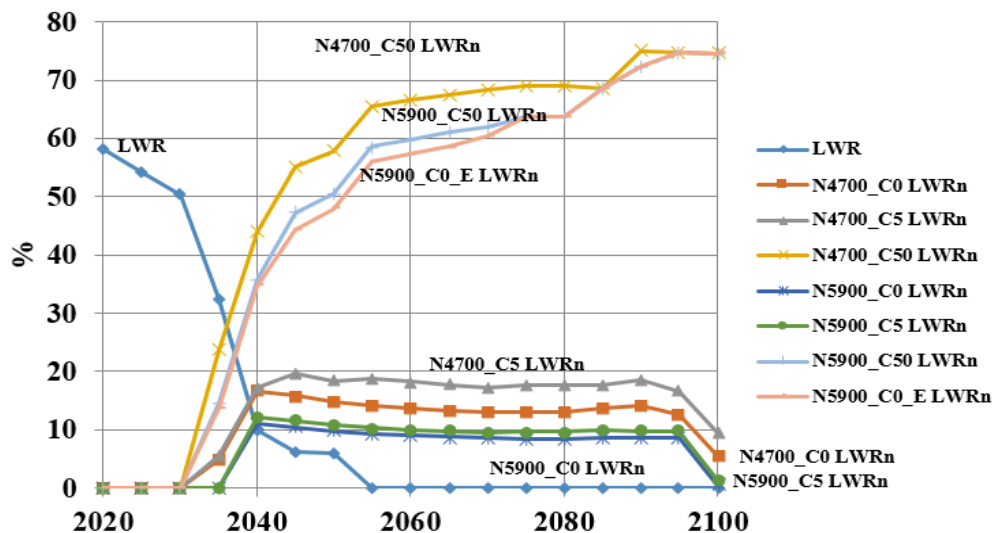


Рисунок 4.15. Частка АЕС у виробництві електроенергії в Україні для різної вартості будівництва АЕС та значень податку на викиди CO₂ та “externalities” (N5900_C0_E LWRn)

Результати розрахунків врахування можливих ризиків (externalities) також представлено на рисунку 4.16 (сценарій N5900_C0_E LWRn). Навить при вартості будівництва АЕС 5900 долл.США/кВт та нульового податку на викиди CO₂, врахування ризиків призводить до зростання долі АС 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 рисунку 4.16.

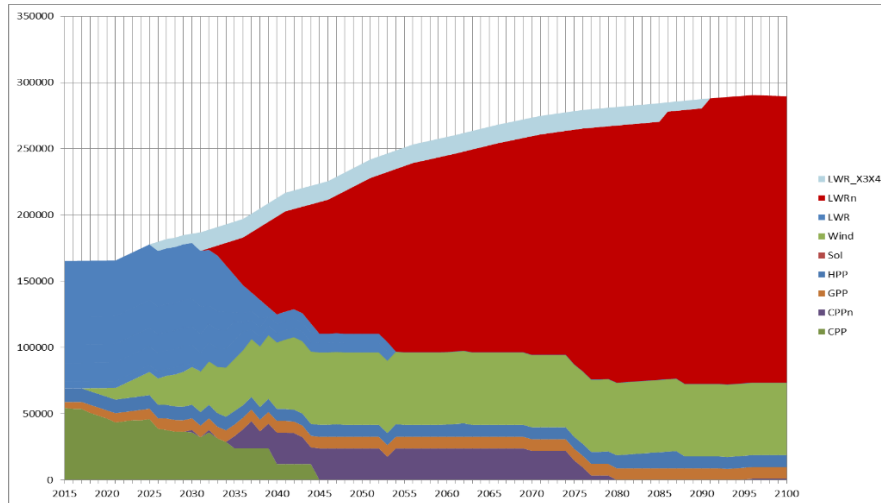


Рисунок 4.16 Структура ОЕС України при урахуванні ризиків впливу різних видів генерації (externalities)

Основні результати порівняльної оцінки наведено у [102]. Розроблено модель та проведено аналіз розвитку енергосистеми України з використанням коду MESSAGE MESSAGE. Проведено розрахунки, за результатами яких показано, що для умов ОЕС України збільшення податку на викиди CO_2 до 5 долл.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 CO_2 .

4.6 Висновки до Розділу 4

У даному розділі наведено результати апробації інструментарію прогнозного моделювання з використанням розроблених комп'ютерних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, а також з застосуванням методу аналізу часових трендів до підготовки техніко-економічної вхідної інформації та аналізу чутливості отриманих результатів до оцінки напрямків розвитку ЯПЦ України у довгостроковій перспективі.

Розроблено структурну схему підходу з апробації комп'ютерних моделей частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, що включає перевірку адекватності обраних ЯПЦ за економічним індикатором, якій у свою чергу отримується з використанням розрахункової програми MAGATE NEST. Метод враховує циклічність процедури вибору значення вартості АЕС як основного чинника, який впливає на загальну вартість електроенергії у ЯПЦ. Разом з тим, враховані додаткові параметри, які у моделі характеризують загальну економічну привабливість ЯПЦ (повернення інвестицій у будівництво АЕС, окупність інвестицій та величину дисконтування). За результатами циклічності у розрахунках з використанням NEST проводиться вибір прийнятних технічних та економічних параметрів АЕС для відповідних умов розвитку ЯПЦ. Ці параметри враховуються при формуванні переліку первинної інформації при розробці комп'ютерної моделі ЯПЦ.

Виконано верифікацію комп'ютерної моделі ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання шляхом порівняння з результатами застосування комп'ютерної програми MAGATE ROADMAPS_ET (ROADMAPS-Excel Tool (ET)) за обраними показниками ЯПЦ, що враховують обсяг накопичення ВЯП та потреби у природньому урані. Верифікацію виконано при розгляді довгострокової перспективи до 2100 року та за умов реалізації в Україні відкритого ЯПЦ. Використання одної обраної моделі для верифікації пов'язано з відсутністю експлуатаційних даних, які характеризують частково-замкнений та замкнений

ЯПЦ. Разом з тим враховується, що складні ЯПЦ розроблено на основі врахування взаємозв'язків у відкритому ЯПЦ.

Верифікацію проведено за реальними даними експлуатації АЕС та напрацювання ВЯП в Україні. Співставлення результатів розрахунків демонструє кореляцію між отриманим значенням основних характеристик ЯПЦ. При цьому, максимальне розходження у визначенні обсягу накопичення ВЯП складає 5,1%, у визначенні обсягу споживання природнього урану складає 12,3%, що для прогнозних моделей вважається прийнятним.

Наведено результати застосування кількісної критерійної інтегральної порівняльної оцінки ЯПЦ для підвищення ступеню обґрунтованості прийняття рішень та проведено його верифікацію.

Виходячи з досвіду і спираючись на експертні судження, для вирішення задачі критерійної порівняльної оцінки ЯПЦ, верифікацію проведено за переліком оціночних індикаторів враховуючи наступні вимоги:

- можливість проведення порівняння ЯПЦ на підставі чисельних значень технічних та економічних показників;
- не враховуються індикатори оцінки реакторних установок та враховувати оцінку з урахуванням поняття стійкого розвитку ЯПЦ.

Проведено апробацію запропонованого підходу з аналізу чутливості на основі аналізу трендів зміни техніко-економічних показників для цілей прогнозного моделювання ЯПЦ на прикладі зміни наведеної вартості виробництва електроенергії (LCOE) як результату застосування комп'ютерної моделі до зміни відповідних вхідних даних.

З урахуванням світового досвіду аналіз чутливості враховував чутливість LCOE для ЯПЦ 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). На відміну від загального підходу з застосуванням рівномірної зміни параметру з подальшим аналізом впливу на результат розрахунку, враховано тренд зміни обраного параметру. Таким чином,

застосовано нерівнозначну зміну параметру відносно його базового значення та продемонстровано підвищення адекватності прогнозної комп'ютерної моделі ЯПЦ.

Розроблені комп'ютерні моделі застосовано для опису ЯПЦ на основі відкритого, частково-замкненого та замкненого паливних циклів з врахуванням різних організаційно-технічних взаємозв'язків їх складових елементів та відповідних потоків ядерного матеріалу. Таким чином, виконано всебічного аналізу розроблених комп'ютерних моделей ЯПЦ з застосуванням до ядерної інфраструктури України.

С застосуванням розроблених моделей для програмного засобу MESSAGE виконано порівняльну оцінку ЯПЦ та відповідних шляхів поводження з ВЯП у довгостроковій перспективі з застосуванням до АЕС України.

Проведено порівняння отриманих результатів прогнозної оцінки розвитку ЯПЦ з вибором рішення щодо кінцевого поводження 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.

За результатами оцінки запропоновано до практичної реалізації на національному рівні ЯПЦ України, якій враховує накопичення ВЯП у довгострокових сховищах сухого типу з подальшим захороненням у геологічних формаціях.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та отримані автором результати вирішення актуальної науково-практичної задачі з удосконалення математичних та комп'ютерних методів організації процесів моделювання та їх використання до задач довгострокового прогнозування розвитку ЯПЦ шляхом 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.

Розроблені у рамках дисертаційного дослідження підходи до прогнозного моделювання ЯПЦ застосовані до вирішення завдання з поводження з ВЯП АЕС на кінцевому етапі ЯПЦ, визначення фінансових витрат держави на розвиток відповідної 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 варіантів частково-замкненого та замкненого варіантів ЯПЦ для завдань прогнозного моделювання, а також 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 критерійну 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 прогнозному моделюванні.

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

Отримані у рамках дисертаційної роботи результати підтверджують прийнятність 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.

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)

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р.
2. Закон України «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 (ВВР), 2012, № 40, ст. 476).
3. Jae-Sol Lee, K. Fukuda, R. Burcl, M Bell. LONG-TERM ISSUES ASSOCIATED WITH SPENT NUCLEAR POWER FUEL MANAGEMENT OPTIONS. International Atomic Energy Agency, Vienna [Електронний ресурс]. URL: <https://www.oecd-nea.org/pt/docs/iem/jeju02/session1/SessionI-02.pdf> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
4. Council Directives EU 2011/70/EURATOM: Establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste [Електронний ресурс]. URL: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/eur104759.pdf> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
5. INPRO METHODOLOGY FOR SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF NUCLEAR ENERGY SYSTEMS. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems. INPRO Manual — Overview of the Methodology Vienna: IAEA, 2008, 128 p. (IAEA-TECDOC-1575 Rev. 1).
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. Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES — Vienna: IAEA, 2018. — 341 p. — (IAEA Nuclear Energy Series. No. NP-T-4.9).

8. Розробка концепції поводження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС України: ВП НТЦ ДП НАЕК «Енергоатом», план-замовлення від 15.06.2015 №619-06-15/41.
9. Дослідження напрямків міжнародної співпраці у розвитку ядерно-енергетичної системи України на середню та довгострокову перспективу (SYNERGIES): ВП НТЦ ДП НАЕК «Енергоатом», план-замовлення від 18.03.2013 №525-03-13/41).
10. Участь України у проекті «Розробка глобальної архітектури ядерно-енергетичних систем на основі замкненого ЯПЦ з реакторами на теплових та швидких нейтронах (у рамках проекту МАГATE GAINS)»: ВП НТЦ ДП НАЕК «Енергоатом», план-замовлення від 06.11.2009 №256-11-09/41.
11. 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. — 164 p. — (IAEA-TECDOC-1636).
12. Analytical Framework for Analysis and Assessment of Transition Scenarios to Sustainable Nuclear Energy Systems [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/09/inpro-gains-2014.pdf> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
13. IAEA Project Develops Roadmapping Tool for Future Nuclear Energy Systems [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-project-develops-roadmapping-tool-for-future-nuclear-energy-systems> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
14. Аналіз практики, технологій з довгострокового зберігання, переробки відпрацьованого ядерного палива та поводження з цінними продуктами його переробки: ВП НТЦ ДП НАЕК «Енергоатом», план-замовлення від 06.11.2009 №256-11-09/41.
15. Про затвердження Стратегічних напрямів поводження з відпрацьованим ядерним паливом атомних електростанцій України з реакторами типу ВВЕР на період до 2030 року та Плану заходів щодо їх реалізації: наказ Міненерговугілля

від 2015 №386 [Електронний ресурс]. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50043&documentList_stind=3141 (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.

16. Дані щодо результатів виробничої діяльності ДП НАЕК «Енергоатом» за 1 кв. 2020 р. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.energoatom.com.ua/uploads/2020/tep-03-2020.pdf> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.

17. Про затвердження Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій: постанова Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 №1270 [Електронний ресурс]. URL: https://www.reestrnpa.gov.ua/REESTR/RNAweb.nsf/wpage/doc_card?OpenDocument&ID=6B0C803330FDEF0C2257968002EE197 (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.

18. Стан впровадження нових модифікацій ядерного палива на українських АЕС, у тому числі проходження етапів ліцензування палива виробництва компанії «Вестінгауз», інформація щодо запланованих нарад та про результати вже проведених (станом на 20.05.2020) [Електронний ресурс]. URL: <http://www.energoatom.com.ua/ua/actvts-16/implementation-160> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.

19. Про схвалення Концепції Державної цільової економічної програми розвитку атомно-промислового комплексу на період до 2020 року: розпорядженням Кабінету Міністрів України від 09.11.2016 №943 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/943-2016-%D1%80#Text> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.

20. Про заходи з підтримки розвитку ядерної енергетики та підвищення рівня безпеки у сфері використання ядерної енергії: указ Президента України від 4 квітня 2019 р. №104/2019 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/104/2019#Text> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.

21. Закон України «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом щодо розміщення, проектування та будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій» № 4384-VI від 9.02.2012р. (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2012, № 40, ст.476)
22. Про затвердження проекту “Будівництво централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій”: розпорядження Кабінету Міністрів України від 07.07.2017 №380-р [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/380-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
23. Інформаційний дайджест від 16.10.2019. Будівництво Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива на фінішній прямій [Електронний ресурс]. URL: http://www.energoatom.com.ua/ua/press_cent-19/novini_kompanii-20/p/budivnictvo_centralizovanogo_shovisa_vidprac_ovanogo_adernogo_paliva_na_finisnij_pramij_urij_nedaskovs_kij-45444 (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
24. А.Б. Тарнавський, Р.Ю. Сукач, Ю.Г. Сукач, М.Я. Колісник. Використання сухого сховища для зберігання відпрацьованого ядерного палива на Запорізькій АЕС / А.Б. Тарнавський // Науковий вісник НЛТУ України – 2013. – Вип. 23.1, С. 104 – 110.
25. Ю. П. Ковбасенко. Сравнительный анализ изотопного состава отработавшего топлива компаний «Вестингауз» и «ТВЭЛ» / Ю. П. Ковбасенко // ISSN 2073-6231. Ядерна та радіаційна безпека 3(71).2016, С 33 – 37.
26. Analysis of the Reuse of Uranium Recovered from the Reprocessing of Commercial LWR Spent Fuel: report by OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, ORNL/GNEP/LTR-2008-002, January 2009, 62 p.
27. Minimization of waste from uranium purification, enrichment and fuel fabrication — Vienna: IAEA, 1999. — 48 p. — (IAEA-TECDOC-1115).
28. Management of Reprocessed Uranium Current Status and Future Prospects — Vienna: IAEA, 2007. — 108 p. — (IAEA-TECDOC-1529).

29. Uranium 2016: Resources, Production and Demand: report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD 2016, NEA No. 7301, 550 p.
30. Про результати державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки попереднього звіту з аналізу безпеки Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива: постанова колегії Державної інспекції ядерного регулювання України від 3 листопада 2016 р. №08 [Електронний ресурс]. URL: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/uk/publish/article/339909> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
31. Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT). IAEA [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/publications/documents/treaties/npt> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
32. Nuclear Power in the World Today. World Nuclear Association (Updated March 2020) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
33. А.А. Афанасьев, Н.И. Власенко. Подходы при выполнении оценки инновационной ядерно-энергетической системы Украины с использованием методологии INPRO // Вопросы атомной науки и техники. — 2007. — № 2. — С. 23-28.
34. J. J. Jacobson, G. E. Matthern and S. J. Piet. Assessment of Deployment Scenarios of New Fuel Cycle Technologies [Електронний ресурс]. URL: <https://www.intechopen.com/books/nuclear-power-deployment-operation-and-sustainability/assessment-of-deployment-scenarios-of-new-fuel-cycle-technologies> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
35. З.О.Жадлун, Л.В.Галаєва, Н.Г.Шульга Оптимізаційні моделі та методи їх реалізації.: Навчальний посібник.- К.: НУБіПУ, 2012. — 150 с/
36. Талызин В.А., Лисогор Г.И. Линейные оптимизационные модели в экономике / В.А. Талызин, Г.И.Лисогор. – Казань: Казан. ун-т, 2015. – 66 с.

37. Муха В. С. Вычислительные методы и компьютерная алгебра: учеб.-метод. пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — Минск: БГУИР, 2010 – 148 с.: ил, ISBN 978-985-488-522-3, УДК 519.6 (075.8), ББК 22.19я73, М92
38. Губарь Ю. Курс «Введение в математическое моделирование», Лекция 5: «Компьютерное имитационное моделирование. Статистическое имитационное моделирование» // Интуит.ру, 15.03.2007
39. П.О. Стеблянко. Математичне моделювання технологічних процесів. Міністерство освіти і науки України. Дніпровський державний технічний університет Конспект лекцій. Затверджено редакційно-видавничою секцією науково-методичної ради ДДТУ 20 травня 2017 р, протокол № 5.
40. Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide. Vienna: IAEA, 2015 – 140 p. NES No.NG-T-5.2.
41. MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.energyplan.eu/othertools/global/message/> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
42. David Freynet, Christine Coquelet-Pascal, Romain Eschbach, Guillaume Krivtchik, Elsa Merle-Lucotte. Multiobjective Optimization for Nuclear Fleet Evolution Scenarios Using COSI [Електронний ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/291152805_Multiobjective_Optimization_for_Nuclear_Fleet_Evolution_Scenarios_Using_COSI (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
43. C. Coquelet-Pascal, M. Tiphine, G. Krivtchik, D. Freynet, C. Cany, R. Eschbach & C. Chabert (2015) COSI 6: A Tool for Nuclear Transition Scenario Studies and Application to SFR Deployment Scenarios with Minor Actinide Transmutation, Nuclear Technology, 192:2, 91-110, DOI: 10.13182/NT15-20
44. M. Samson, J.P. Grouiller, J. Pavageau, P. Marimbeau, J.M. Vidal: CESAR: A simplified Evolution Code for Reprocessing Applications, RECOD98, Nice, France, vol. 3, p 986, (1998)

45. Vidal, J.M.; Grouiller, J.P.; Launay, A.; Berthion, Y.; Marc, A.; Toubon, H.: CESAR: A Code for Nuclear Fuel and Waste Characterisation: report by Waste Management 2006 Symposium - WM'06 - Global Accomplishments in Environmental and Radioactive Waste Management: Education and Opportunity for the Next Generation of Waste Management Professionals; Tucson, AZ (United States); 26 Feb - 2 Mar 2006; Available from: WM Symposia, Inc., PO Box 13023, Tucson, AZ, 85732-3023 (US)
46. Benchmark Study on Nuclear Fuel Cycle Transition Scenarios Analysis Codes: report by NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), OECD. Nuclear Science NEA/NSC/WPFC/DOC(2012)16, June 2012, 108 p.
47. Progress in NEA nuclear science and data bank activities: report by NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), OECD, NEA/NSC/DOC(2010)14, 23 p.
48. IAEA Tools and Methodologies for Energy System Planning and Nuclear Energy System Assessments [Електронний ресурс]. URL: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/19916IAEA_Brochure_ToolsMethodologies_for_Energy_System_Planning.pdf (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
49. Nuclear Fuel Cycle Simulation System (VISTA) — Vienna: IAEA, 2007. — 95 p. — (IAEA-TECDOC-1535).
50. Energy Modeling Framework. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE) [Електронний ресурс]. URL: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/ENE/model/message.html> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
51. Глаголев М.В. 2012. Анализ чувствительности модели // ДОСиГИК. Т.3. № 3. С. 31-53. УДК 51-76:519.711.3
52. І.С. Грозний, Г.О. Тарасова. Застосування методу аналізу ієрархій до задач бенчмаркінгу виробничих процесів промислового підприємства // Інформаційні технології в економіці та управлінні. — 2014. — №3 — С. 130 – 138.

53. Я. О. Адаменко. Методи прийняття рішень при виборі альтернатив у процедурі оцінки впливів на довкілля // Науково-технічний журнал. — 2018. — № 2 (18) — С.83 — 93
54. Т. Саати. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва «Радио и связь» 1993. [Электронный ресурс]. URL: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/saaty.pdf> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
55. The Effects of the Uncertainty of Input Parameters on Nuclear Fuel Cycle Scenario Studies Nuclear Science: report by Nuclear Energy Agency - NEA/NSC/R, 2016 – 231 p. (<https://www.oecd-nea.org/science/docs/2016/nsc-r2016-4.pdf>).
56. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA), OECD 2013, No. 7061, 188 p.
57. W.I.Ko, S.R.Youn, R.X.Gao. Nuclear fuel cycle cost estimation and sensitivity analysis of unit costs on the basis of an equilibrium model. Nuclear Engineering and Technology. Volume 47, Issue 3, April 2015, Pages 306-331.
58. Economic Analysis Working Group. AFCI Economic Tools, Algorithms, and Methodology: report by Idaho National Laboratory - INL/EXT-07-13293, 2009 – 412 p. (https://thebulletin.org/third-party/nuclear-fuel-cost-calculator/assets/Shropshire_2009_Methods.pdf).
59. S.K. Kim, W.I. Ko, S.R. Youn, R.X. Gao. Nuclear fuel cycle cost estimation and sensitivity analysis of unit costs on the basis of an equilibrium model // Nuclear Engineering and Technology — Volume 47, Issue 3, April 2015, Pages 306-314
60. W.I.Ko, Fanxing Gao. Economic Analysis of Different Nuclear Fuel Cycle Options. Science and Technology of Nuclear Installations Volume 2012, Article ID 293467, 10 pages [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/stni/2012/293467/> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
61. В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев Анализ временных рядов и прогнозирование: Учебник. — М.: Финансы и статистика, 2001. — 228 с.

62. С. Дробышевский, В. Носко, Р. Энтов, А. Юдин. Эконометрический анализ динамических рядов основных макроэкономических показателей. Научные труды, № 34Р, Москва, 2001. — 250 с.
63. Н.М. Громова, Н.И. Громова. Основы экономического прогнозирования. Учебное пособие, 2006 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.monographies.ru/ru/book/view?id=10> (дата звернения: 19.07.2020). Назва з екрану.
64. P. Silvennoinen. Nuclear fuel cycle optimization: Methods and modelling techniques, 1982, 138 pages [Электронный ресурс]. URL: <https://cris.vtt.fi/en/publications/nuclear-fuel-cycle-optimization-methods-and-modelling-techniques> (дата звернения: 19.07.2020). Назва з екрану.
65. В.В. Коробеников, Д.А. Клинов. «Введение в нейтронно-физический расчёт ядерных реакторов». Учебное пособие по курсу «Нейтронно-физический расчёт ядерных реакторов», Обнинск, 2011г.
66. Sustainable development goals. United Nations. Department of Economic and Social Affairs [Электронный ресурс]. URL: <https://sdgs.un.org/goals> (дата звернения: 19.07.2020). Назва з екрану.
67. IAEA. International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, Vol. 9: Summary Volume (Washington, Oct. 1977) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/ru/publications/4128/international-nuclear-fuel-cycle-evaluation-vol-9-summary-volume-washington-oct-1977> (дата звернения: 19.07.2020). Назва з екрану
68. GENERATION-IV International forum, United States department of energy nuclear energy research advisory committee. A Technology Roadmap for Generation VI Nuclear Energy Systems, U.S. DOE and the Generation VI International Forum (2002). [Электронный ресурс]. URL: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40481/technology-roadmap (дата звернения: 19.07.2020). Назва з екрану

69. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies — Vienna: IAEA , 2005 — 171 p. (STI/PUB/1222, IAEA, Vienna (2005)).
70. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Infrastructure, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.12, IAEA, Vienna (2014).
71. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2015).
72. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Managing the Financial Risk Associated with the Financing of New Nuclear Power Plant Projects, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.6, IAEA, Vienna (2017).
73. Levelized Cost of Energy (LCOE). USA Department of Energy. DOE OFFICE OF INDIAN ENERGY. 1977 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/ru/publications/4128/international-nuclear-fuel-cycle-evaluation-vol-9-summary-volume-washington-oct-1977> (дата звернения: 19.07.2020). Назва з екрану
74. Андрианов А.А., Коровин Ю.А., Пшакин Г. М. Анализ влияния возможных сценариев развития ядерной энергетики на масштабы инспекционной деятельности по обеспечению режима нераспространения / Известия вузов. Ядерная энергетика. -2007.- №3. выпуск 2. – С. 10-19.
75. A. Schwenk-Ferrero, A. Andrianov. Comparison and Screening of Nuclear Fuel Cycle Options in View of Sustainable Performance and Waste Management. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/319690980_Comparison_and_Screening_of_Nuclear_Fuel_Cycle_Options_in_View_of_Sustainable_Performance_and_Waste_Management (дата звернения: 19.07.2020). Назва з екрану
76. A. Schwenk-Ferrerond, A. Andrianov. Nuclear Waste Management Decision-Making Support with MCDA. Science and Technology of Nuclear Installations

- Volume 2017, Article ID 9029406, 20 pages. [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1155/2017/9029406>. (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану
77. Протокол №1 засідання НТР ДП «НАЕК «Енергоатом» за темою: «Підходи к разработке концепции обращения с ОЯТ АЭС Украины и формирование критериев выбора РУ для сооружения АЭС с учетом аспектов ЯТЦ», затверджений 22.04.2015 р.
78. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Application of Multi-criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND, IAEA TECDOC No. 1902, Vienna (2020)
79. Международная практика прогнозирования мировых цен на финансовых рынках (сырье, акции, курсы валют) / под ред. Я. М. Миркина.—М. : Магистр, 2014. — 456 с.
80. Э.Е. Тихонов. Методы прогнозирования в условиях рынка: учебное пособие. - Невинномысск, 2006. - 221 с.
81. О.І. Кушлик-Дивульська, Б.Р. Кушлик. Основи теорії прийняття рішень. – К., 2014. – 94 с.
82. INTERNATIONAL MONETARY FUND [Електронний ресурс]. URL: <https://www.imf.org/external/index.htm> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану
83. Энергетична стратегія України на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 № 145-р.
84. Энергетична стратегія України на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071-р.
85. Энергетична стратегія України на період до 2035 року. Біла книга енергетичної політики України «Безпека та конкурентоспроможність» [Електронний ресурс]. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану

86. Б.К. Гордеев. Введение в экономику ядерного топливного цикла атомной энергетики. М.: ЦНИИАтоминфом, 2001, 128 с.
87. D. Shropshire, A. Korinny. IAEA Energy System Modeling Tools and NESAs Economics Support Tool. 7th GIF/INPRO-IAEA Interface Meeting, IAEA, Vienna, Austria. 1 March 2013.
88. О. В. Годун . Применение кода NEST для сравнительной экономической оценки энергетических систем / Ю. Г. Куцан, О. В. Годун, В. Н. Кирьянчук // Электронне моделювання. - 2018. - Т. 40, № 5. - С. 111-118. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/elmo_2018_40_5_10
89. CANDU advantages. Canadian nuclear association. [Электронный ресурс]. URL: <https://cna.ca/technology/energy/candu-technology/> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану
90. И.И. Сидоров. Головной блок нового поколения БН-800. Особенности ввода в эксплуатацию. 2016 [Электронный ресурс]. URL: http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/Materials_2016/Plenar_rus/Golovnoj_blok_novogo_pokoleniya._Osobennosti_VE.pdf (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану
91. 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).
92. Estimation of Nuclear Fuel Cycle Cost. Technical Subcommittee on Nuclear Power, Nuclear Fuel Cycle, etc. Data Sheet 1. Edited by Atomic Energy Commission Bureau. November 10, 2011. 58 p. [Электронный ресурс]. URL: http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/seimei/111110_1_e.pdf (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану
93. The Effects of the Uncertainty of Input Parameters on Nuclear Fuel Cycle Scenario Studies Nuclear Science. - NEA/NSC/R, 2016 – 231 p. (<https://www.oecd-neo.org/science/docs/2016/nsc-r2016-4.pdf>).
94. О. В. Годун. 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. 81-91. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/elmo_2019_41_3_8.
95. IAEA tool to help roadmap nuclear programmes. World Nuclear News. 15 June 2018 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/NP-IAEA-tool-to-help-roadmap-nuclear-programmes-1506185.html> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану
96. О. В. Годун. Розробка дорожньої карти розвитку ядерної енергетичної системи України / Ю. Г. Куцан, О. В. Годун // Моделювання та інформаційні технології. - 2018. - Вип. 85. - С. 27-34. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtit_2018_85_6
97. PRIS (Power Reactor Information System). IAEA. [Електронний ресурс]. URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
98. (iNFCIS) Integrated Nuclear Fuel Cycle Information System. IAEA. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/resources/databases/integrated-nuclear-fuel-cycle-information-system-infcis> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
99. World International Service on Energy. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wise-uranium.org/> (дата звернення: 19.07.2020). Назва з екрану.
100. Capital cost estimates for utility Scale Electricity Generating Plants. Washington: EIA, 2016 – 141 p.
101. Environmental Externalities from Electric Power Generation. The Case of RCREEE Member States. 2013 – 9 p. RCREEE
102. 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*)

ДОДАТОК А

**Складові елементи та вхідні дані моделі ЯПЦ
для комп'ютерного засобу MESSAGE**

1. Опис відкритого ЯПЦ

Варіант з реакторами LWR у комп'ютерному програмному засобі MESSAGE розглядається як базовий. Таким чином, всі ЯПЦ, які включають більш складну форму організаційно-технічної побудови, враховують наявність елементів відкритого ЯПЦ з LWR.

Моделювання інших варіантів здійснюється шляхом включення/виключення обмежень на виробництво електроенергії відповідними типами реакторів за допомогою параметра Annual bound on activity (abda). Значення abda = 0 означає виключення відповідної технології. У таблиці А.1 наведено приклад позначень елементів ЯПЦ у моделі MESSAGE.

Таблиця А.1 – Позначення елементів відкритого ЯПЦ в моделі MESSAGE

| Елемент ЯПЦ | Позначення в моделі |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Генерація | |
| реактор ВВЕР-1000 (діючі) X3,X4 нові реактори реактор ALWR | LWR_PP LWR_X3X4_PPn LWR_PPn ALWR_PP |
| Передній край ЯПЦ | |
| Видобуток урану Конверсія урану Збагачення урану – витрачена робота ЕРР – завод по збагаченню палива Фабрикація свіжого палива | U_extr cnLWR SWULWR enLWR LWR_fuel_fabr |
| Задній край ЯПЦ | |
| Проміжне (тимчасове 50 років) зберігання ВЯП Остаточне захоронення ВЯП | I_LWR SF_disp |

1.1 LWR (енергоблоки типу ВВЕР-1000, енергоблоки Хмельницької АЕС №3 та №4 (X3-X4), енергоблоки типу ВВЕР нові)

Таблиця А.2 - Характеристики: ВВЕР-1000, включаючи X3,X4. Позначення в моделі: LWR_PP, LWR_X3X4_PPn, LWR_PPn

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|----------|----------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| КВВП | % | - | 0.94×0.85×100 = 79,9% | Визначається як (plantfactor) × (operationtime) |

| | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Корисна потужність | | plant factor | 94 | З відрахуванням потужності на власні потреби: (1 – 0,06) % = 0,94 % |
| Час роботи на номінальній потужності | | operation time | 85 | коефіцієнт, що відображає передбачуваний час роботи блоків на номінальній проектній потужності (за відрахуванням часу ремонтів та інших простоїв) |
| Час експлуатації | рік | plant life | 45 – діючі 60 – Х3,Х4 60 – нові | |
| Час витримки ВЯП у приреакторному БВ | рік | lagtimes | 5 | |
| Потужність енергоблоку електрична | МВт | unit size | 1000 | |
| Вартість капітального будівництва | долл. США/кВт | | | |
| Добудова ХАЭС №3,4 LWR_X3X4_PP | | investment cost | 2400 | |
| Нові LWR_PPn | | investment cost | 3600 | |
| Постійні експлуатаційні витрати | долл. США /кВт/рік | fixed costs | 69,3 | |
| Час будівництва | років | constr.time | 6 | |
| Історія введення потужності | МВт | hist.cap | | |
| Змінні витрати | долл. США / кВт×г | var.costs | 0,5 | |
| Вхідні параметри технології | | multiple entries | | |
| Перше завантаження АЗ (Initial cores) | тонн/МВт | core in | 0,052685476 | |
| Повне завантаження АЗ (Final cores) | | core out | 0,052685476 | |

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Щорічне завантаження (Secondary inputs) | тонн/МВт ×рік | inp | 0,022570656 | |
| Щорічне вивантаження (Secondary outputs) | | outp | 0,022570656 | |
| Обмеження | | | | |
| Обмеження, пов'язане з часткою генерації (Constraints type 1 on activities) | | con1a | -1 | параметр, що штучно задає співвідношення між ядерною та неядерною технологіями не більше 50% |
| Обмеження на введення нових потужностей в рік (Bound new capacity addition) LWR_PP – действующие | МВт | bdc | 0 | Діючі блоки більше не вводяться |
| LWR_X3X4_PPn – X3,X4 | | | не більше 1000 | після 2016 року |
| LWR_PPn - нові | | | не більше 1000 | після 2016 року (нові ВВЕР не будуть вводиться раніше X3, X4) |

1.2 ALWR – покращені легководні реактори типу LWR

Таблиця А.3 - Характеристики ALWR

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|--------------------------|----------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| КВВП | % | - | 80 | В даному випадку КВВП виражається через plantfactor у зв'язку з відсутністю інших даних |
| Корисна потужність | | plant factor | 80 | |
| Час роботи на потужності | | operation time | - | Інформація відсутня |
| Час експлуатації | років | plant life | 60 | |

| | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Час витримки в приреакторному БВ | років | Lagtimes | 5 | Спеціально передбачений параметр для ВЯП |
| Потужність електрична | МВт | unit size | 1500 | Модель визначає встановлену потужність, яка буде задовольняти потребу в електроенергії |
| Вартість капітального будівництва | долл. США /кВт | investment cost | 3600 | |
| Постійні експлуатаційні витрати | долл. США /кВт/рік | fixed costs | 69,3 | |
| Час будівництва | років | constr.time | 6 | |
| Історія вводу потужностей | МВт | hist.cap | - | |
| Змінні витрати | долл. США /кВт×год | var.costs | 0,48 | |
| Вхідні параметри технології | | multiple entries | | |
| Перше завантаження АЗ (Initial cores) | тонн/МВт | core in | 0,071932 | |
| Перше вивантаження АЗ (Final cores) | | core out | 0,071932 | |
| Щорічне завантаження (Secondary inputs) | тонн/МВт ×рік | Inp | 0,017885 | |
| Щорічне вивантаження (Secondary outputs) | | Outp | 0,017885 | |
| Обмеження, пов'язане з часткою генерації (Constraints type 1 on activities) | | con1a | -1 | |
| Обмеження на введення нових потужностей в рік (Bound new capacity addition) | МВт | Bdc | 1000 | Вводяться не раніше 2020 року |

1.3 Передній край ЯПЦ

1.3.1 Видобуток урану

Позначення в моделі: U_extr

Таблиця А.4 - Видобуток природнього урану

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|--------------------------|----------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Запаси ресурсу | тонн | Volume (grade a) | 105 000 | |
| Цінова категорія ресурсу | долл. США /кг | Cost (grade a) | 130 | |
| Запаси ресурсу | тонн | Volume (Grade b) | 118 600 | запас у вищій цінній категорії включає в себе запаси нижніх ціннових категорій (223 600 – 105 000 = 118 600 тонн) |
| Цінова категорія ресурсу | долл. США/кг | Cost (grade b) | 260 | |

1.3.2 Конверсія урану

Позачення в моделі: cnLWR

Таблиця А.4 - Видобуток природнього урану

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|--------------------|----------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Вартість конверсії | долл. США /кг | varcost | 15 | Одне виробництво для LWR та ALWR. |

1.3.3 Збагачення урану

1.3.3.1 ОРР (одиниці роботи розділення)

Позначення в моделі: SWULWR

Таблиця А.5 - ОРР (для LWR та ALWR)

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|--------------|----------------|--------------------------|--------------------|---------------------------------|
| Вартість ОРР | долл. США/кг | var cost (вкладка alt a) | 155 | Одне виробництво для LWR и ALWR |

1.3.3.2 Збагачення урану для LWR
Позначення в моделі: enLWR - вкладка alta

Таблиця А.6 - Збагачення урану для ВВЕР-1000, включаючи Х3,Х4 та нові ВВЕР

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Кількість ОРР (SWULWR) на одиницю збагаченого урану | ОРР/т | inp | 6,49547794 |
| Необхідна кількість природного урану (після конверсії)на одиницю збагаченого урану | тонн | inp | 8,828633406 |
| Кількість збідненого урану, що утворюється, на одиницю збагаченого урану (в моделі DerU – сховище збідненого урану) | тонн | consa | 7,828633406 |

1.3.3.3 Збагачення урану для ALWR

Позначення в моделі: enLWR - вкладка altb

Таблиця А.7 - Збагачення урану для ALWR

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Кількість ОРР на одиницю збагаченого урану, SWULWR | ОРР/т | inp | 7,817608862 |
| Необхідна кількість природного урану (після конверсії)на одиницю збагаченого урану | тонн | inp | 10,19522777 |
| Кількість збідненого урану, що утворюється, на одиницю збагаченого урану (в моделі DerU – сховище збідненого урану) | тонн | consa | 9,19522777 |

1.3.3.4 Фабрикація палива для LWR (ВВЭР-1000, ALWR)

Позначення в моделі: LWR_Fuel_fabr

Таблиця А.8 - Фабркація свіжого палива LWR, включаючи діючі, Х3, Х4, нові ВВЕР, і ALWR

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Вартість фабрикації для ВВЕР (LWR, LWRn, Х3Х4) | долл. США/кг | Alt a – var cost | 250 |
| Вартість фабрикації для ALWR | | Alt b – var cost | 250 |

1.4 Задній край ЯПЦ

1.4.1.1 Проміжне зберігання в СВЯП

Позначення в моделі: Storage - I_LWR

ЗСВЯП та ЦСВЯП наведені в моделі однією технологією

Таблиця А.9 - Проміжне сховище ВЯП LWR

| Параметр | Од. виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Капітальне будівництво | долл. США/кг | Investment cost | 80 | |
| Максимльний об'єм | тонн | Max volume | Не обмежений | Передбачається, що при заповненні ЦСХОЯТ, сховище буде розширюватись новим модулем такою самою місткістю |
| Строк експлуатації | років | plant life | 100 | Ліцензія на 50 років, може бути подовжений ще на 50 років |

1.4.1.2 Остаточне захоронення

Позначення в моделі: Storage - SF_disp

Таблиця А.10 - Остаточне захоронення ВЯП

| Параметр | Од. виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|------------------------|------------|---------------------|--------------------|
| Капітальне будівництво | долл/кг | Investment cost | 600 |
| Масимальний об'єм | тонн | Max volume | не обмежений |

2. Опис частково-замкненого ЯПЦ з важководними реакторами CANDU

2.1 Структура ЯПЦ

Таблиця А.11 - Позначення елементів частково-замкненого ЯПЦ з CANDU в моделі MESSAGE

| Елемент ЯПЦ | Позначення технології | Виходи (позначення в моделі) |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| Генерація | | |
| реактор ВВЕР-1000: діючі: X3,X4: Нові: | LWR_PP LWR_X3X4_PPn LWR_PPn | Electricity fcLWR (ОЯТ) |
| реактор CANDU на природному U (NU) | HWR_PP | Electricity fcHWR (ОЯТ) |
| реактор CANDU на слабозбагаченому U (1,2) | enHWR_PP | |
| реактор CANDU на регенераті U (REUSE) | reHWR_PP | |
| Передній край ЯПЦ | | |
| Видобуток урану | U_extr | NU |
| Конверсія урану | cnLWR | ConvU |
| Збагачення урану: ОПП: технологія збагачення: | SWULWR enLWR | SWULWR, SWUALWR |
| Фабрикація сіжого палива: для ВВЕР: для CANDU: | LWR_fuel_fabr HWR_fuel_fabr | LWR_fuel, ALWR_fuel reHWR_fuel (регенер U) |
| Задній край ЯПЦ | | |
| Проміжне зберігання ВЯП після приреакторного охолодження у БВ | I_LWR I_ALWR | SF_disp (захоронення) |
| | I_LWR I_ALWR | LWR_repr (переробка) |
| | fcHWR | SF_HWR (захоронення) |
| Остаточне захоронення ВЯП LWR CANDU | SF_disp SF_HWR | Відсутній виход |
| Переробка ВЯП LWR | LWR_repr | ReU (регенерат U) PuTot (сховище Pu) |

2.2 HWRReU – Важководний реактор на регенованому урані

Позначення в моделі: reHWR

Таблиця А.12 - Характеристики: reHWR

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| КВВП | % | - | 90% | КВВП виражений через plantfactor |
| | | plant factor | 0,9 | |
| | | operation time | - | |
| Строк експлуатації | років | plant life | 30 | |
| Потужність | МВт | unit size | 728 | |
| Вартість капітального будівництва | долл. США/кВт | investment cost | 4000 | LWR + 400 долл/кВт |
| Постійні витрати | долл. США /кВт | fixed costs | 55 | |
| Строк будівництва | років | constr.time | 5 | |
| Історія введення потужностей | МВт | hist.cap | - | |
| Змінні витрати | долл. США /кВт×г | var.costs | 0,5 | |
| Входи | | multiple entries | | |
| Перше завантаження АЗ (Initial cores) | тонн/МВт | core in | 0,049236686 | |
| Повне вивантаження АЗ (Final cores) | | core out | 0,049236686 | |
| Щорічне перевантаження (Secondary inputs) | тонн/МВт | inp | 0,079602705 | |
| Щорічне вивантаження (Secondary outputs) | | outp | 0,079602705 | |
| Обмеження, пов'язане з часткою генерації Constraints type 1 on activities | | con1a | -1 | |
| Обмеження на введення нових потужностей в рік (Bound new capacity addition) | МВт | bdc | 1000 вводяться не раніше 2020 року | |

2.3 Передній карай ЯПЦ

2.3.1 Збагачення урану

ОРР (позначення SWULWR) и збагачення урану для LWR (позначення enLWR, вкладка alta) модулюються у відкритому ЯПЦ з LWR. Кількісні

характеристики збагачення урану для CANDU на слабозбагаченому урані наводяться в таблиці А.13. Технологія має два виходи: enHWR як збагачений до 1.2% уран та DepU як збіднений уран.

Таблиця 2А.13 - Кількісні характеристики збагачення урану CANDU (1,2%)

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Кількість ОРР на одиницю збагаченого урану, SWULWR | ОРР | inp | 0,5923779257 |
| Необхідна кількість природного урану (після конверсії) на одиницю збагаченого урану | тонн | inp | 2,060737527 |
| Кількість збідненого урану на одиницю збагаченого урану (DepU) | | consa | 1,060737527 |

2.3.2 Фабрикація палива для CANDU

Позначення в моделі: HWR_Fuel_fabr

Таблиця А.14 - Фабрикація свіжого палива CANDU

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|-------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Вартість фабрикації для HWR | тонн/МВт | Alt b – var cost | 120 |
| Вартість фабрикації для enHWR | | Alt c – var cost | 150 |
| Вартість фабрикації для reHWR | | Alt a – var cost | 200 |
| Маса переробленого урану для виробництва палива reHWR | кг | Alt a – consa | -1 |

2.4 Задній край

2.4.1 Переробка ВЯП (тільки ЯПЗ з REUSE)

Позначення моделі: LWR_repr

Таблиця А.15 - Переробка ВЯП LWR для виготовлення палива CANDU

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|-------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------------|
| Вартість переробка | долл. США /кг | var costs | 2000 |
| Розділ ВЯП на складові | | Max volume (вкладка alt a) | Сума повинна дорівнювати нулю |
| Весь об'єм сховища уран | | I_LWR | -1 |
| плутоній | | ReU | 0,93518829 |
| актиніди | | Putot | 0,01213106 |
| продукти поділу | | MAc | 0,00113518 |
| | | FPr | 0,05154547 |

2.4.2 Остаточне захоронення ВЯП CANDU

Позначення в моделі: Storage- I_HWR.
Застосовується до HWR, enHWR, reHWR

Таблиця А.16 - Остаточне захоронення ВЯП CANDU

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Капітальне будівництво | долл. США /кг | Investment cost | 600 |
| Максимальний об'єм | тонн | Max volume | не обмежений |

3. Опис замкненого ЯПЦ з реакторами на швидких нейтронах

3.1 Структура ЯПЦ

Таблиця А.17 - Представлення замкненого ЯПЦ в моделі MESSAGE

| Елемент ЯПЦ | Технологія або послуга | Виходи |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Генерація | | |
| реактор на швидких нейтронах FR с KB<1 (0,98) | FR_PP | Electricity fcFR (ОЯТ БН-800) |
| реактор на швидких нейтронах FR с KB>1 (1,2) | FR2_PP | Electricity fcFR2 (ОЯТ JSFR) |
| Передній край ЯПЦ | | |
| Видобуток урану | U_extr | NU |
| Конверсія урану | cnLWR | ConvU |
| Збагачення урану | SWULWR - EPP enLWR | SWULWR, SWUALWR |
| Фабрикація свіжого палива для LWR для акт.зони ШП для зони відтворення (бланкета) ШП | LWR_fuel_fabr FR_core_fabr FR_blank_fabr FR2_core_fabr FR2_blank_fabr | LWR_fuel, ALWR_fuel FR_core_fabr FR_blank_fabr FR2_core_fabr FR2_blank_fabr |
| Задній край ЯПЦ | | |
| Проміжне зберігання ВЯП LWR | I_LWR, I_ALWR | SF_disp (захоронення) |
| | | LWR_repr (переробка) |
| ВЯП БР | I_FR, I_FR2 | FR_repr (переробка) FR2_repr |
| Остаточне захоронення ВЯП LWR | SF_disp | Виходу нема |
| Переробка ВЯП LWR | LWR_repr | ReU (хранилище per U) PuTot (Pu для MOX) |

| | | |
|------------------|---------------------|-----------------------------------------------|
| | | MA (захоронення ВAB) FPr (захоронення ВAB) |
| Переробка ВЯП FR | FR_repr FR2_repr | PuTot (Pu для MOX) RedepU (склад U) |

3.2 Передній край ЯПЦ

Видобуток урану (U_{extr}), конверсія урану ($cnLWR$), ЕРР (SWULWR) та збагачення урану ($enLWR$, вкладка alta), а також фабрикація палива LWR ($LWR_{Fuel_{fabr}}$) моделюються в циклі LWR, відповідні характеристики переднього краю ЯПЦ наведені в паспорті ЯПЦ LWR.

3.2.1 Фабрикація палива для активної зони

Позначення в моделі: FR_core_fabr

Таблиця А.18 - Фабрикація палива для АЗ

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|----------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|----------|
| Вартість | долл. США /кг | Var costs | 2300 | |
| Ізотопний вміст палива FR (0,98) | | Alta - consa | depU | 0,7815 |
| | | | Putot | 0,2185 |
| Склад палива FR(1,2) | | Alt b - consa | depU | 0,7647 |
| | | | Putot | 0,2353 |

3.2.2 Фабрикація палива для бланкету

Позначення в моделі: FR_blank_fabr

Таблиця А.19 - Фабрикація палива для бланкета ШР

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру | Примітка |
|-----------------------|----------------|---------------------|--------------------|----------|
| Вартість | долл. США /кг | Var costs | 250 | |
| Склад палива FR(0,98) | | Alt a - consa | depU | -1 |
| Склад палива FR(1,2) | | Alt b - consa | depU | -1 |

3.3 Задний край

3.3.1 Зберігання ВЯП швидких реакторів

Позначення в моделі: Storage- I_FR, I2FR

Таблиця А.20 - Зберігання ВЯП

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Капітальне будівництво | долл. США /кг | Investment cost | 80 |
| Срок зберігання | рік | Retention time | не обмежений |
| Максимальний об'єм | тонн | Max volume | не обмежений |

3.3.2 Переробка ВЯП LWR

Позначення в моделі: LWR_repr

Таблиця А.21 - Переробка ВЯП легководних реакторів

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|-------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Вартість переробки ВЯП UOXLWR | долл. США /кг | var costs | 1150 |
| Розділ ВЯП на складові | | alt a - consa | |
| Загальний об'єм сховища | | I_LWR | -1 |
| уран | | ReU | 0,93518829 |
| плутоній | | Putot | 0,01213106 |
| актиніди | | MAc | 0,00113518 |
| продукти поділу | | FPr | 0,05154547 |

3.3.3 Переробка ВЯП швидких реакторів

Позначення в моделі: FR_repr

Таблиця А.22 - Переробка ВЯП

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|----------------------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Вартість переробки | долл. США /кг | var costs | 2000 |
| Розділ ВЯП ШР (0,98) на складові | | alt z - consa | |
| Загальний об'єм сховища ВЯП | тонн | I_FR | -1 |
| Перероблений уран з ВЯП | | RedepU | 0,8404 |
| Перероблений плутоній | | Putot | 0,12009 |
| актиніди | | MAc | 0,0011 |
| продукти поділу | | FPr | 0,0384092 |

3.3.4 Захоронення ВЯП LWR

Позначення в моделі: Storage- SF_disp

Таблиця А.23 - Остаточне захоронення ВЯП

| Параметр | Одиниця виміру | Позначення в моделі | Значення параметру |
|-------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| Вартість капітального будівництва сховища | долл. США /кг | Investment cost | 600 |
| Максимальний об'єм | тонн | Max volume | не обмежений |

ДОДАТОК Б

**Аналіз чутливості результатів прогновної оцінки
відкритого, частково-замкненого та замкненого ЯПЦ**

1. Відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію

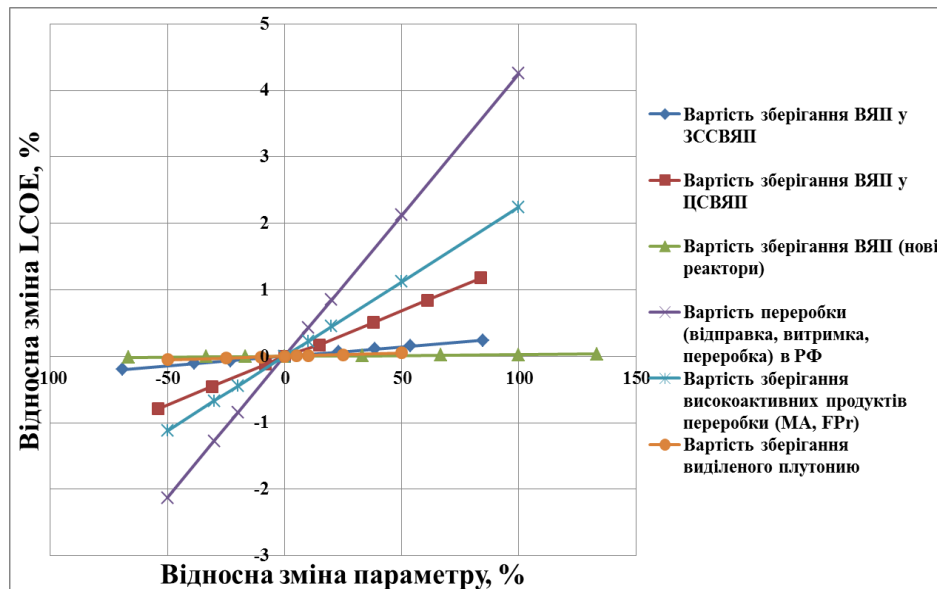


Рисунок Б 1. Відгук значення LCOE на зміну вхідного параметру для відкритого ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію

Таблиця Б 1. Результат розрахунку значення LCOE від зміни вхідного параметру (вартості елементів ЯПЦ) для відкритого ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію

| | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Вартість зберігання ВЯП у ССВЯП, долл/кг | 20 | 40 | 50 | 65 | 80 | 90 | 100 | 120 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,47 | 24,50 | 24,51 | 24,52 | 24,54 | 24,55 | 24,56 | 24,58 |
| Вартість зберігання ВЯП у ЦСВЯП, долл/кг | 200 | 300 | 400 | 435 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| LOE, долл/МВт×г | 24,33 | 24,41 | 24,49 | 24,52 | 24,58 | 24,66 | 24,74 | 24,83 |
| Вартість зберігання ВЯП (нові реактори), долл/кг | 100 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,52 | 24,53 | 24,52 | 24,52 | 24,52 | 24,52 | 24,53 | 24,53 |
| Вартість переробки (відправка, витримка, переробка) в РФ, долл/кг | 500 | 700 | 800 | 1000 | 1100 | 1200 | 1500 | 2000 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,04 | 24,23 | 24,33 | 24,52 | 24,62 | 24,71 | 25,00 | 25,48 |
| Вартість зберігання високоактивних продуктів переробки (МА, FPr), долл/кг | 5000 | 7000 | 8000 | 10000 | 11000 | 12000 | 15000 | 20000 |

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| LCOE, долл/МВт×г | 24,27 | 24,37 | 24,42 | 24,52 | 24,57 | 24,62 | 24,78 | 25,03 |
| Вартість зберігання виділеного плутонію, долл/кг | 1000 | 1500 | 1800 | 2000 | 2100 | 2200 | 2500 | 3000 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,51 | 24,52 | 24,52 | 24,52 | 24,52 | 24,52 | 24,53 | 24,53 |

2. Відкритий ЯПЦ з накопиченням ВЯП у ССВЯП та ЦСВЯП, з частковою переробкою ВЯП без використання урану та плутонію (передбачається переробка ВЯП, що вивозиться до РФ та ВЯП, який зберігається у ССВЯП ЗАЕС після завершення проектного терміну зберігання 50 років)

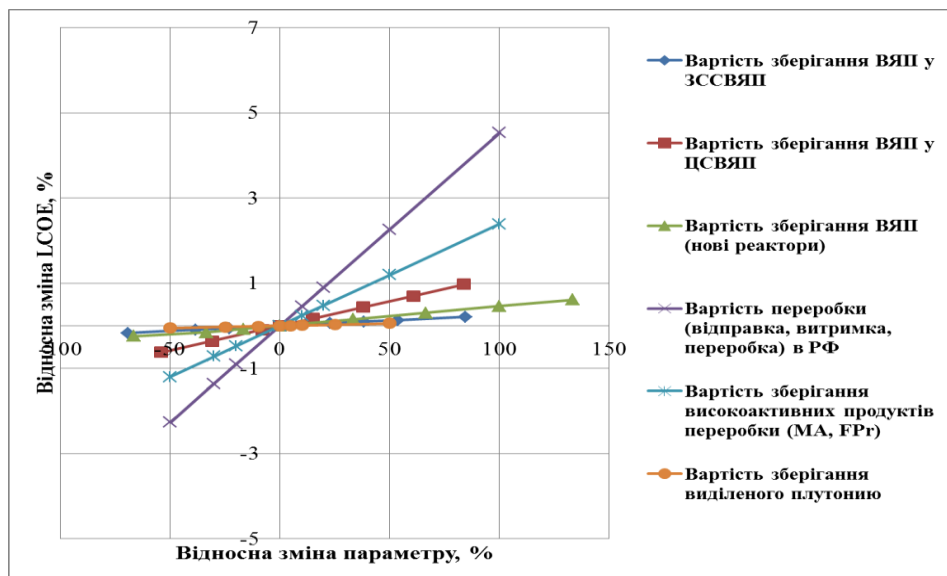


Рисунок Б 2. Відгук значення LCOE на зміну вхідного параметру для відкритого ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП після завершення проектного строку зберігання у ССВЯП

Таблиця Б 2. Результат розрахунку значення LCOE для відкритого ЯПЦ з частковою переробкою ВЯП після завершення проектного строку зберігання у ССВЯП

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Вартість зберігання ВЯП у ССВЯП, долл/кг | 20 | 40 | 50 | 65 | 80 | 90 | 100 | 120 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,88 | 24,90 | 24,91 | 24,93 | 24,94 | 24,95 | 24,96 | 24,98 |
| Вартість зберігання ВЯП у ЦСВЯП, долл/кг | 200 | 300 | 400 | 435 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,78 | 24,84 | 24,90 | 24,93 | 24,97 | 25,03 | 25,10 | 25,17 |

| | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Вартість зберігання ВЯП (нові реактори), долл/кг | 100 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| LCOE, долл/МВт×Г | 24,82 | 24,87 | 24,89 | 24,93 | 24,99 | 25,06 | 25,12 | 25,19 |
| Вартість переробки (відправка, витримка, переробка) в РФ, долл/кг | 500 | 700 | 800 | 1000 | 1100 | 1200 | 1500 | 2000 |
| LCOE, долл/МВт×Г | 24,39 | 24,61 | 24,71 | 24,93 | 25,03 | 25,14 | 25,46 | 25,99 |
| Вартість зберігання високоактивних продуктів переробки (МА, FPr), долл/кг | 5000 | 7000 | 8000 | 10000 | 11000 | 12000 | 15000 | 20000 |
| LCOE, долл/МВт×Г | 24,65 | 24,76 | 24,81 | 24,93 | 24,98 | 25,04 | 25,21 | 25,49 |
| Вартість зберігання виділеного плутонію, долл/кг | 1000 | 1500 | 1800 | 2000 | 2100 | 2200 | 2500 | 3000 |
| LCOE, долл/МВт×Г | 24,91 | 24,92 | 24,92 | 24,93 | 24,93 | 224,93 | 24,937 | 24,94 |

3. Відкритий ЯПЦ з накопиченням та захороненням ВЯП у геологічному сховищі після завершення строку зберігання у ССВЯП ЗАЕС та у ЦСВЯП (50 років)

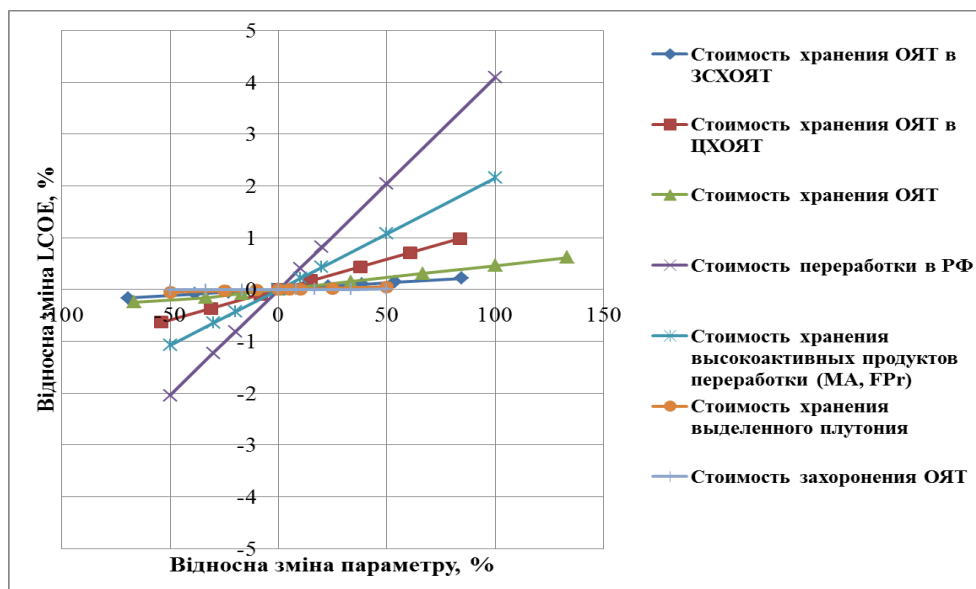


Рисунок Б 3. Відгук значення LCOE на зміну вхідного параметру для відкритого ЯПЦ з захороненням ВЯП у геологічному сховищі після завершення строку зберігання у ССВЯП ЗАЕС та у ЦСВЯП (50 років)

Таблиця Б 3. Результат розрахунку значення LCOE для відкритого ЯПЦ з захороненням ВЯП у геологічному сховищі після завершення строку зберігання у ССВЯП ЗАЕС та у ЦСВЯП (50 років)

| | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Вартість зберігання ВЯП у ССВЯП, долл/кг | 20 | 40 | 50 | 65 | 80 | 90 | 100 | 120 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,96 | 24,98 | 24,99 | 25,01 | 25,030 | 25,04 | 25,05 | 25,07 |
| Вартість зберігання ВЯП у ЦСВЯП, долл/кг | 200 | 300 | 400 | 435 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,81 | 24,90 | 24,98 | 25,01 | 25,06 | 25,15 | 25,23 | 25,32 |
| Вартість зберігання ВЯП (нові реактори), долл/кг | 100 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,99 | 25,00 | 25,00 | 25,01 | 25,01 | 25,02 | 25,02 | 25,03 |
| Вартість переробки (відправка, витримка, переробка) в РФ, долл/кг | 500 | 700 | 800 | 1000 | 1100 | 1200 | 1500 | 2000 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,55 | 24,73 | 24,82 | 25,01 | 25,106 | 25,19 | 25,47 | 25,93 |
| Вартість зберігання високоактивних продуктів переробки (МА, FPr), долл/кг | 5000 | 7000 | 8000 | 10000 | 11000 | 12000 | 15000 | 20000 |
| LCOE, долл/МВт×г | 24,36 | 24,46 | 24,51 | 25,01 | 25,062 | 25,11 | 25,25 | 25,50 |
| Вартість зберігання виділеного плутонію, долл/кг | 1000 | 1500 | 1800 | 2000 | 2100 | 2200 | 2500 | 3000 |
| LCOE, долл/МВт×г | 25,00 | 25,00 | 25,01 | 25,01 | 25,015 | 25,01 | 25,01 | 25,02 |
| Вартість захоронення ВЯП, долл/кг | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 800 | 900 |
| LCOE, долл/МВт×г | 25,01 | 25,01 | 25,01 | 25,01 | 25,014 | 25,01 | 25,01 | 25,01 |

4. Частково-замкнений ЯПЦ з переробкою ВЯП та повторним використанням урану. Моделюється переробка всього об'єму ВЯП, що вивозиться до РФ до 2020 року, та ВЯП, що вивантажується зі ССВЯП ЗАЕС після завершення проектного терміну його зберігання (50 років)

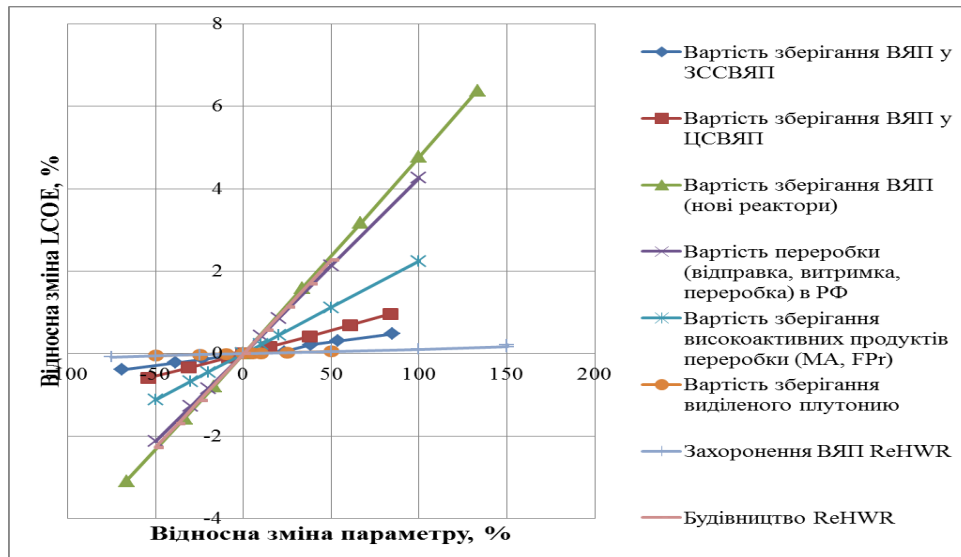


Рисунок Б 4. Відгук значення LCOE на змiну вхідного параметру для частково-замкненого ЯПЦ з переробкою ВЯП та повторним використанням урану

Таблиця Б 4. Результат розрахунку значення LCOE для частково-замкненого ЯПЦ з переробкою ВЯП та повторним використанням урану

| | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Вартість зберігання ВЯП у ССВЯП, долл/кг | 20 | 40 | 50 | 65 | 80 | 90 | 100 | 120 |
| LCOE, долл/МВт×г | 29,57 | 29,62 | 29,65 | 29,68 | 29,72 | 29,75 | 29,77 | 29,83 |
| Вартість зберігання ВЯП у ЦСВЯП, долл/кг | 200 | 300 | 400 | 435 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| LCOE, долл/МВт×г | 29,52 | 29,59 | 29,66 | 29,68 | 29,74 | 29,80 | 29,88 | 29,95 |
| Вартість зберігання ВЯП (нові реактори), долл/кг | 100 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| LCOE, долл/МВт×г | 28,64 | 29,15 | 29,41 | 29,68 | 30,22 | 30,76 | 31,30 | 31,84 |
| Вартість переробки (відправка, витримка, переробка) в РФ, долл/кг | 500 | 700 | 800 | 1000 | 1100 | 1200 | 1500 | 2000 |
| LCOE, долл/МВт×г | 29,11 | 29,34 | 29,49 | 29,68 | 29,80 | 29,91 | 30,26 | 30,83 |
| Вартість зберігання високоактивних продуктів | 5000 | 7000 | 8000 | 10000 | 11000 | 12000 | 15000 | 20000 |

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| переробки (МА, FPr), долл/кг | | | | | | | | | |
| LCOE, долл/МВт×г | 29,38 | 29,50 | 29,56 | 29,68 | 29,74 | 29,81 | 29,99 | 30,29 | |
| Вартість зберігання виділеного плутонію, долл/кг | 1000 | 1500 | 1800 | 2000 | 2100 | 2200 | 2500 | 3000 | |
| LCOE, долл/МВт×г | 29,67 | 29,68 | 29,68 | 29,68 | 29,69 | 29,69 | 29,69 | 29,70 | |
| Захоронення ВЯП ReHWR, долл/кг | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | |
| LCOE, долл/МВт×г | 29,46 | 29,50 | 29,55 | 29,59 | 29,68 | 29,79 | 29,87 | 29,96 | |
| Будівництво ReHWR, долл/кг | 2000 | 2500 | 3000 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | |
| LCOE, долл/МВт×г | 29,01 | 29,18 | 29,35 | 29,68 | 29,85 | 30,02 | 30,19 | 30,36 | |

5. Замкнений ЯПЦ з використанням плутонію у реакторах на швидких нейтронах FR

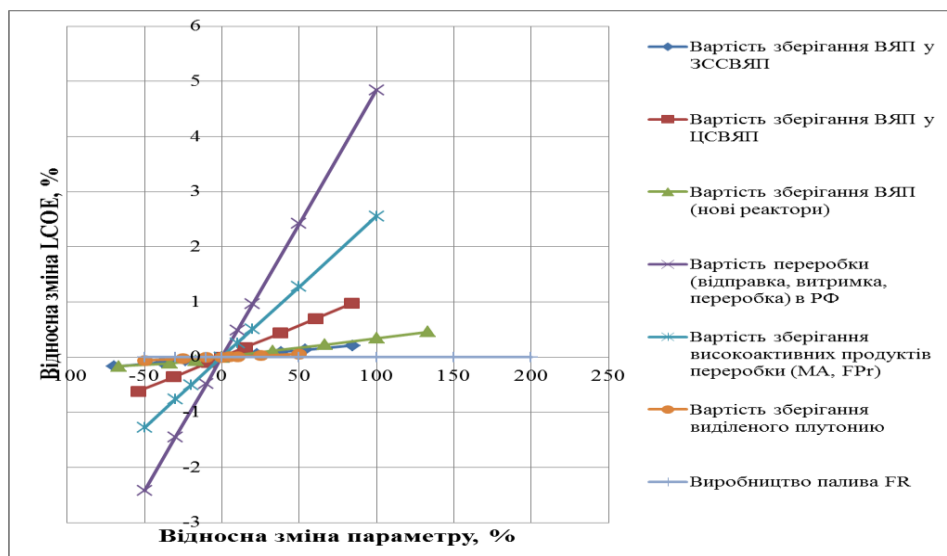


Рисунок Б 5. Відгук значення LCOE на зміну вхідного параметру для замкнутого ЯПЦ

Таблиця Б 5. Результат розрахунку значення LCOE для замкнутого ЯПЦ

| | | | | | | | | |
|--------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Вартість зберігання ВЯП у ССВЯП, USD/кг | 20 | 40 | 50 | 65 | 80 | 90 | 100 | 120 |
| LevCost, USD/МВт×г | 24,94 | 24,95 | 24,95 | 24,98 | 24,99 | 25,00 | 25,01 | 25,03 |
| Вартість зберігання ВЯП у ЦСВЯП, USD/кг | 200 | 300 | 400 | 435 | 500 | 600 | 700 | 800 |

ДОДАТОК В
Список публікацій за темою дисертації і відомості
про апробацію результатів дисертації

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати 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. 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.

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

6. 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.

Автором розроблено загальний алгоритм формування вхідних техніко-економічних даних складових технологій ядерно-паливних циклів, моделювання ядерної енергетичної системи України

7. 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)

Автором розроблено та обгрунтовано метод формування критеріїв оцінки проектів РУ нових АЕС щодо взаємозв'язку з ЯПЦ.

8. 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)

9. 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.

Автором розроблено та обгрунтовано метод аналізу чутливості на основі оцінки трендів зміни у часі техніко-економічних характеристик ЯПЦ для цілей прогнозного моделювання.

10. 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.

11. 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)

Автором розроблено та застосовано математичного алгоритму порівняльної оцінки ЯПЦ за переліком ключових індикаторів для цілей прогнозного моделювання.

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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. — 164 pp. IAEA-TECDOC-1636. (ISBN:978-92-0-112509-5).

13. Nuclear energy development in the 21st century: Global scenarios and regional trends. — Vienna : IAEA, 2010. — 79 pp. (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).

Автором розроблено підходи до побудови прогнозної моделі ЯПЦ, у тому числі України, з використанням програмного засобу MESSAGE

ДОДАТОК Г**Акти про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи**



УКРАЇНА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ІНСТИТУТ ФІЗИКИ ТВЕРДОГО ТІЛА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Institute of Solid State Physics, Material science and Technologies

вул. Академічна, 1, м. Харків, 61108; тел. +380-57-335-66-09; тел./факс +380-57-335-37-95;
Інтернет: www.kipt.kharkov.ua; E-mail: voyev@kipt.kharkov.ua; Ідентифікаційний код: 23452845

03.02.2020 № 14-00/03-21

на № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту фізики твердого тіла,
матеріалознавства і технологій ННЦ ХФТІ
НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор



В.М. Воеводін

2020 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
Годуна Олега Вікторовича «Прогнозне моделювання ядерно-паливних циклів
на основі аналізу трендів»

Комісія у складі голови – **М.М. Пилипенко**, вчений секретар Інституту
фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій (ІФТТМТ) ННЦ ХФТІ,
д.т.н., с.н.с.;

членів комісії:

С.Ю. Саєнко, начальник відділу ІФТТМТ, д.т.н., с.н.с.;

Г.Д. Толстолуцька, начальник відділу ІФТТМТ, д.ф.-м.н., професор;


Б.М. Широков, начальник відділу ІФТТМТ, д.т.н., с.н.с.

склала цей акт про те, що основні положення дисертаційного
дослідження **О.В. Годуна** «Прогнозне моделювання ядерно-паливних
циклів на основі аналізу трендів», а саме запропоновані методи до
підготовки первинної інформації з використанням аналізу трендів техніко-

економічних параметрів ядерно-паливних циклів, аналізу чутливості результатів розрахунків до зміни вхідного параметру, розроблення розрахункових схем ЯПЦ та розроблені комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого ЯПЦ, які реалізовано на прикладі ядерної енергетики України, набули реалізації в процесі наукової та практичної діяльності Інституту фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ ХФТІ НАН України за напрямком науково-технічного супроводу розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій в галузях економіки.

На основі проведеного аналізу комісія прийшла до висновку, що подані на розгляд матеріали заслуговують схвалення та запровадження для використання у процесі науково-технічної підтримки АЕС та атомно-промислового комплексу у частині забезпечення безпечного та економічно виправданого поводження з відпрацьованим ядерним паливом атомних станцій України. Базові принципи та основні положення дисертаційного дослідження О.В. Годуна застосовано для аналізу техніко-економічних параметрів новітніх технологій з поводження з відпрацьованим ядерним паливом вітчизняних атомних електростанцій, а саме довгострокового зберігання, переробки відпрацьованого ядерного палива та поводження з цінними продуктами його переробки.

Голова комісії:



М.М. Пилипенко

Члени комісії:



С.Ю. Саєнко

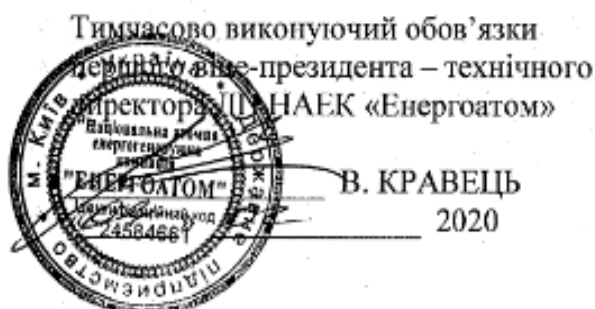
Г.Д. Толстолицька

Б.М. Широков

Вик. Габелкова С.В.

т.335-69-72

ЗАТВЕРДЖУЮ



АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження Годуна Олега Вікторовича
 «Прогнозне моделювання ядерно-паливних циклів на основі аналізу трендів»

Цим актом підтверджується, що основні положення дисертаційного дослідження Годуна О.В. «Прогнозне моделювання ядерно-паливних циклів на основі аналізу трендів» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме комп'ютерні моделі частково-замкненого та замкненого варіантів конфігурацій ЯПЦ України, із застосуванням яких виконано прогнозне моделювання та порівняльну оцінку варіантів ЯПЦ на довгострокову перспективу, а також результати апробації інструментарію прогнозного моделювання з використанням аналізу трендів до оцінки напрямків розвитку ЯПЦ України у довгостроковій перспективі використано при розробці матеріалів «Розробка концепції поводження з відпрацьованим ядерним паливом АЕС України» (план-замовлення від 15.06.2015 №619-06-15/41), «Дослідження напрямків міжнародної співпраці у розвитку ядерно-енергетичної системи України на середню та довгострокову перспективу (SYNERGIES)» (план-замовлення від 18.03.2013 №525-03-13/41), «Участь України у проекті «Розробка глобальної архітектури ядерно-енергетичних систем на основі замкненого ЯПЦ з реакторами на теплових та швидких нейтронах (у рамках проекту MAGATE GAINS)» (план-замовлення від 06.11.2009 №256-11-09/41), а також матеріалів до документу «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),

Матеріали дисертаційного дослідження Годуна О.В. «Прогнозне моделювання ядерно-паливних циклів на основі аналізу трендів» заслуговують схвалення та запровадження для використання у процесі науково-технічної підтримки АЕС у частині забезпечення ядерної та радіаційної безпеки поводження з ВЯП АЕС, а також визначення шляхів подальшого розвитку ядерної енергетики України.

Директор ВП НТЦ

Микола ВЛАСЕНКО

Керівник відділення
 науково-технічної підтримки
 ВП НТЦ у м.Одеса, к.т.н

Олександр БАЛАШЕВСЬКИЙ