

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Філонова Юлія Сергіївна

УДК 621.039.588

ДИСЕРТАЦІЯ
ОБҐРУНТУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОВІДВОДУ ВІД МЕТАЛУ
ВИГОРОДКИ РУ ТИПУ ВВЕР-1000 ПРИ ДЕГРАДАЦІЇ ЇЇ ГЕОМЕТРІЇ

143 – Атомна енергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

/Юлія ФІЛОНОВА/

Науковий керівник – Кондратюк Вадим Анатолійович, к.т.н.

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Філонова Ю.С. Обґрунтування надійності тепловідводу від металу вигородки РУ типу ВВЕР-1000 при деградації її геометрії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 143 – Атомна енергетика. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу деградації геометрії вигородки внутрішньокорпусної на зміну умов охолодження внутрішньокорпусних пристроїв реактору типу ВВЕР-1000.

У вступі обґрунтовано вибір теми досліджень, сформульовані мета і задачі дослідження, визначено методи дослідження, висвітлено зв'язок з науково-дослідними програмами та роботами, а також наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, охарактеризовано особистий внесок автора, приведені відомості про апробацію результатів дисертації, її структуру та обсяг.

У першому розділі проведено огляд наявних досліджень, пов'язаних з тематикою дисертації. Проаналізовано першопричини і особливості процесів деградації металу внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП), а також найбільш імовірні зміни відносно проєктної геометрії – вичерпання зазорів між вигородкою і шахтою, а також поява не передбачених проєктом РУ ВВЕР-1000 радіальних перетоків через розкриття кілець вигородки. Проведено порівняльний аналіз прогнозованих моментів вичерпання проєктних зазорів, що показує нагальну необхідність обґрунтування можливості подальшої експлуатації енергоблоків при наявності контакту. Зроблено огляд можливостей та досвіду проведення експериментальних досліджень і вимірювання реальної геометрії вигородки після довготривалої експлуатації. Показано наявні обмеження, пов'язані із можливістю проведення вимірювань тільки в «холодному» стані, та зроблено висновок щодо потреби в розробці надійних розрахункових моделей для прогнозування зміни

геометрії вигородки з урахуванням миттєвих параметрів радіаційних енерговиділень та температурного стану. Проведено детальний огляд досвіду моделювання температурного поля та радіаційних енерговиділень в елементах ВКП для подальшого аналізу деградації геометрії. З'ясовано невизначеності, наявні в існуючих підходах, та зроблено висновок щодо відсутності досліджень впливу наявності контакту між вигородкою та шахтою внутрішньокорпусними і розкриття кілець вигородки на зміну умов охолодження елементів ВКП і на подальшу динаміку формозміни, що є визначальним фактором при переоцінці можливості продовження строку експлуатації енергоблоків України. На основі літературного огляду сформульовано мету, завдання, предмет і об'єкт дослідження.

Другий розділ присвячений дослідженню зміни умов охолодження вигородки при деградації її геометрії, а саме її контакті із шахтою внутрішньокорпусною та розкритті кілець вигородки і як наслідок – появі не передбачених проєктом радіальних перетоків теплоносія з активної зони реактору.

Запропоновано методологію вирішення задачі дослідження зміни умов охолодження ВКП, що базується на поступовому аналізі. З метою проведення зазначеного аналізу розроблено універсальну (з точки зору конфігурування та задання граничних умов) розрахункову тривимірну CFD модель охолодження вигородки. Із використанням розробленої моделі проведено серію розрахунків для різних паливних кампаній енергоблоку АЕС України та обґрунтовано вибір представницької кампанії для подальшого аналізу деградації геометрії. Обґрунтовано вибір п'ятикільцевої моделі вигородки та отримано розрахункове температурне поле для проєктної геометрії ВКП, що використано для подальшого аналізу.

З метою дослідження зміни умов охолодження вигородки за наявності її контакту із шахтою запропоновано підхід із розглядом різних можливих конфігурацій контакту. В рамках аналізу розглянуто 8 варіантів контакту, серед яких – проєктна геометрія, шість прогнозованих станів (від цілком гіпотетичного повного контакту до більш реалізованих варіантів перекриття кільцевого зазору за рахунок контакту нижнього/верхнього буртів і їх комбінацій, а також на рівні

буртів, що відповідають найбільш енергонавантаженим перерізам вигородки), восьмий – реалістичний на основі попередньої оцінки на міцність для представницької кампанії. На основі розробленого підходу якомога повно проаналізовано всі імовірні стани ВКП при наявності контакту та з’ясовано його вплив на зміну температурного стану основних конструкційних елементів ВКП (вигородки, шахти, шпильок та різьбових тяг). Проведено порівняльну оцінку радіаційного розпухання на основі аналізу цільових функцій радіаційної повзучості – еквівалентних напружень, об’ємних деформацій розпухання та еквівалентних деформацій повзучості.

Досліджено вплив наявності розкриття кілець вигородки і появи радіальних перетоків на зміну умов охолодження ВКП. Проведено оцінку інтенсивності радіальних перетоків за допомогою аналітичної оцінки, та із застосуванням розробленої CFD – моделі, що дозволяє врахування наявності розкриття. Отримано можливу максимальну межу величини інтенсивності байпасу з активної зони до кільцевого каналу і каналів охолодження вигородки та проаналізовано його вплив на температурний стан вигородки. З’ясовано наявність появи зворотніх зв’язків типу «розкриття – локальна інтенсифікація охолодження – зменшення інтенсивності подальшого розкриття» та зроблено висновок щодо необхідності використання зв’язаного підходу з урахуванням взаємного впливу трьох фізик – нейтронно-фізичному, теплогідравлічному розрахунках та розрахунку міцності.

В третьому розділі представлено опис ключових складових частин нейтронно-фізичного модулю, який є частиною мультифізичного коду для аналізу впливу деградації геометрії вигородки на зміну умов її охолодження. Розроблений модуль складається з трьох основних частин до яких відносяться: інженерний аналіз паливних завантажень енергоблоку, безпосередньо модель транспорту нейтронів та гамма-квантів і параметричний аналіз. Гнучка система налаштувань дозволяє конфігурувати модуль в залежності від типу аналізу, що дає можливість проводити консервативні та реалістичні оцінки з урахуванням можливих радіальних перетоків теплоносія за межі активної зони. Побудована транспортна модель випромінювання, що базується на використанні коду Монте-Карло

MCNPX, та дозволяє задання нерівномірності температури та матеріального складу. За допомогою транспортної моделі а також розробленої підпрограми постобробки реалізовано синтез тривимірних $(r-\Theta-z)$ миттєвих та накопичених характеристик випромінення, які можуть передаватися в теплогідравлічний модуль та модуль розрахунків на міцність.

З метою економії розрахункових ресурсів, що є вкрай важливим при аналізі зв'язаних процесів, передбачена підпрограма генерації набору даних для оцінки впливу деградації геометрії вигородки на функціонали випромінення в металі вигородки. Для цього оцінені фактори зміни енерговиділення в основних елементах ВКП, які залежать від локальної температури теплоносія та металу (зв'язок з теплогідравлічним модулем), а також від співвідношення метал – вода (модуль розрахунків на міцність).

Четвертий розділ присвячено розробці комплексної зв'язаної мультифізичної процедури оцінки зміни умов охолодження елементів ВКП при деградації їх геометрії з урахуванням наявності зворотніх зв'язків типу «розкриття кілець вигородки – поява радіальних перетоків – локальна зміна умов охолодження металу вигородки – зміна інтенсивності розкриття». Запропоновано концепцію спряження блоків, що відповідають оцінкам трьох фізичних складових проблеми розпухання – нейтронно-фізичного модулю, теплогідравлічного аналізу та модулю оцінки міцності. Модифіковано та раціоналізовано модуль теплогідравлічного аналізу, та, відповідно, розділено його на три складові (субмоделі) – одновимірну теплогідравлічну модель байпасу активної зони, твердотільну модель основних елементів ВКП, та модифіковану CFD–модель активної зони. Наведено опис кожної складової модулю теплогідравлічного аналізу та розроблено ефективні інтерфейси спряження окремих модулів.

Застосовуючи розроблену мультифізичну процедуру спряженого аналізу зміни умов охолодження ВКП проведено розрахунковий аналіз деградації геометрії вигородки з урахуванням зворотніх зв'язків, пов'язаних з локальним впливом наявності радіальних перетоків на умови охолодження вигородки. В результаті оцінки уточнено значення розкриття кілець на момент 60-ї кампанії, що були

отримані в Розділі 2 в рамках виконання послідовного аналізу. Отримані величини зазорів між кільцями мають менші значення, які в середньому на 22% нижчі за результати консервативного послідовного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів. В роботі вперше:

- Створені комплексні теплогідравлічні та нейтронно-фізичні підходи для оцінки впливу на надійність тепловідводу від вигородки ВВЕР-1000 її непроектної зміни геометрії внаслідок радіаційного розпухання металу.
- Для вирішення температурної складової задачі побудовані спеціальні розрахункові моделі, які базуються на методах обчислювальної гідродинаміки, що дозволяють враховувати просторові особливості протікання теплоносія та процесів теплообміну в елементах внутрішньокорпусних приладів ВВЕР-1000 враховуючи локальний стан активної зони.
- Створено та застосовано методологію вирішення контактної задачі ВКП, що базується як на поступовому, так і на зв'язаному мультифізичному аналізі міцності (отриманні параметричних функцій радіаційного розпухання, формозміни ВКП), нейтронно-фізичних розрахунках і теплогідравлічному аналізі охолодження елементів ВКП починаючи від проектної геометрії і закінчуючи розрахованою формозміненою.
- Проаналізовано ймовірні конфігурації (як гіпотетичні, так і реально передбачувані) контакту вигородки із шахтою внутрішньокорпусною (який не передбачено проектом), що дозволило виявити можливі межі порушення умов омивання/охолодження ВКП в рамках послідовного підходу.
- Створено напіваналітичні методи щодо визначення впливу не передбачених проектом радіальних перетоків в рамках послідовного аналізу процесів деградації, що дало змогу оцінити консервативні межі значень інтенсивності перетоків та їх вплив на зміну умов охолодження вигородки.
- На основі оригінального зв'язаного міждисциплінарного підходу, який враховує особливості радіаційних енерговиділень, що формалізовані у вигляді параметричних функцій та власних методів одновимірної теплогідравліки з

аналітично отриманою функцією температурного поля теплоносія на елементарній ділянці інтегрування, був запропонований спосіб визначення усталеного (рівноважного) розкриття кілець. При цьому враховані особливості зміни геометрії за рахунок розпухання та температурного розширення з урахуванням наявності кріпильних елементів у вигляді міжкільцевих шпильок.

- Виявлено основний механізм зворотного зв'язку у вигляді взаємного впливу типу «деградація геометрії ВКП – розкриття кінець – поява радіальних перетоків з активної зони – зміна умов охолодження вигородки – зменшення інтенсивності розкриття кілець»

Розроблені підходи та моделі можуть бути застосовані для робіт із оцінки, обґрунтування і перепризначення термінів експлуатації енергоблоків України з реакторами ВВЕР-1000, які підходять до межі строку продовження терміну експлуатації, або, особливо, його перепризначення. Також, базуючись на розроблених підходах, є можливість аналізу впливу зміни умов охолодження ВКП на реакторну установку в цілому, шляхом модифікації розрахункових теплогідравлічних моделей РУ ВВЕР-1000 в RELAP5 з використанням досвіду розробленої в дисертації одновимірної схеми байпасу.

Ключові слова: вигородка, активна зона, ВВЕР-1000, безпечна експлуатація, деградація геометрії, температура, тепломасообмін, радіаційні енерговиділення, CFD, пористе середовище, теплогідравлічний розрахунок, сили тертя, підйомна сила, рівняння руху, чисельний експеримент, аналітичний розв'язок, параметрична функція, число Нуссельта.

ABSTRACT

Filonova Y.S. Justification of the possibility of reliable heat removal from the VVER-1000 reactor core baffle metal with its geometry degradation. – Qualification scientific study on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy of 143 «Nuclear power engineering» specialty. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Education and science ministry of Ukraine, Kyiv, 2023.

The thesis work is devoted to the study of the influence of the core baffle geometry degradation due to the change in the VVER-1000 reactor internals cooling conditions.

The introduction substantiates the choice of the research topic, formulates the purpose and objectives of the study, defines the research methods, highlights the connection with research programs and works, as well as the scientific novelty and practical significance of the results obtained, characterizes the personal contribution of the author, provides the approbation of the dissertation results, its structure and scope.

The first section reviews the existing research related to the subject of the thesis. So the following are analyzed: the root causes and peculiarities of the internals metal degradation processes, the most probable changes in relation to the design geometry - exhaustion of the gaps between the core baffle and reactor core barrel, as well as the appearance of radial flows not provided by the VVER-1000 reactor design because of the baffle rings opening.

A comparative analysis of the predicted moments of design gaps exhaustion is carried out, which shows the urgent needs to justify the possibility of further operation of power units in the presence of contact. A review of the possibilities and experience of experimental studies and measurements of the core baffle real geometry after long-term operation is made.

The existing limitations associated with the possibility of measurements only in the "cold" state are provided and a conclusion is made about the need to develop reliable calculation models for predicting changes in the core baffle geometry taking into account the instantaneous parameters of radiation energy release and temperature state. A detailed review of the temperature field modeling experience and radiation energy releases in the internals elements was carried out for further analysis of geometry degradation. The uncertainties in the existing approaches are clarified, concluded that there are no studies related to the influence of the contact presence between the core baffle and the reactor core barrel, the openings of the baffle rings on the change in the internals elements cooling

conditions and on the further dynamics of the form change, which is a determining factor in reassessing the possibility of epy Ukrainian nuclear power units life extension. Based on the literature review, the aim, objectives, study subject and object were formulated.

The second section covers to the study of changes in the core baffle cooling conditions during the degradation of its geometry, namely its contact with the reactor core barrel and the baffle rings opening, as a result, the appearance of project unconsidered radial coolant flows from the reactor core.

A methodology for solving the problem of studying the change in the internals cooling conditions, based on a gradual analysis, is proposed. In order to carry out this analysis, a universal (in terms of configuration and boundary conditions setting) computational three-dimensional CFD model of the core baffle cooling was developed. Using the developed model, a series of runs were performed for different fuel campaigns of Ukrainian NPP power unit and the choice of a representative campaign for the further analysis of geometry degradation was substantiated. The core baffle five-ring model is justified and the calculated temperature field for the design internal geometry is obtained, that is used for the further analysis.

In order to study the changes in the core baffle cooling conditions in the presence of its contact with the reactor core barrel, an approach with a consideration of various possible contact configurations is proposed. In the framework analysis, 8 variants of contact are considered, including the project design geometry, six predicted states (from a completely hypothetical full contact to more realistic variants of annular gap closing due to the contact of the lower/upper clamps and their combinations, also at the clamps levels corresponding to the most energy-loaded baffle cross-sections), the eighth one - realistic case based on a preliminary strength assessment for a representative fuel campaign. On the basis of the developed approach, all probable internal states in the presence of contact were analyzed the most completely. In addition, were clarified its influence on the change in the temperature state of the main internals structural elements (baffle, barrel, studs and tie bars). A comparative assessment of radiation swelling was carried out based on the analysis of target functions of radiation creep - equivalent stresses, volumetric deformations of swelling and equivalent creep deformations.

The influence of the presence the baffle rings opening and the appearance of radial flows on the change in the internals cooling conditions are investigated. The intensity of radial flows was estimated analytically and by using the developed CFD model, which allows taking into account the opening presence. The possible maximum limit of the bypass intensity from the reactor core to the annular channel and the baffle cooling channels was obtained and its influence on the baffle temperature state was analyzed. The following feedback type presence "opening - local cooling intensification - decrease in the intensity of further opening" had been elucidated and also the conclusion was made about the needs to use a coupled approach taking into account the mutual influence of the three physics type - neutron, thermal-hydraulic and strength analysis.

The third section presents a description of the key components of the neutron-physics module, which is a part of the multiphysics code for analyzing the impact of the reactor baffle geometry degradation and the change of its cooling conditions. The developed module consists of three main parts, which include: fuel loading engineering analysis unit, neutron and gamma-ray transport model and parametric analysis. A flexible system of settings allows configuring the module depending on the type of analysis, which makes it possible to carry out conservative and realistic assessments taking into account possible radial coolant flows outside the reactor core. A radiation transport model was built based on the Monte Carlo code MCNPX and allowing the setting of non-uniformity of temperature and material composition. Through the help of the transport model and the developed post-processing subprogram, the synthesis of three-dimensional (r - Θ - z) instantaneous and integral radiation characteristics is implemented, which can be exported to the thermal-hydraulic and strength calculations module.

In order to save computational resources, which is highly important in the analysis of coupled processes, a subroutine for generating a data set is provided to assess the impact of the baffle geometry degradation on the radiation functional in the baffle metal. For this purpose, the factors of changes in energy release in the main internal elements, which depend on the local temperature of the coolant and metal (connection with the thermal-hydraulic module), as well as on the metal-water ratio (strength calculation module), are estimated.

The fourth section includes the data of the complex coupled multiphysical procedure development for assessing the change in internals elements cooling conditions during the degradation of their geometry, taking into account the presence of the feedbacks type as "baffle rings opening - radial flows appearances - local change in the baffle metal cooling conditions – opening intensity change". The following concept of blocks conjugation corresponding to the estimates of three physical components of the swelling problem - neutron-physical module, thermal-hydraulic analysis and strength assessment module is proposed. The thermal-hydraulic analysis module was modified and rationalized, and, accordingly, it was divided into three components (sub-models) - a one-dimensional thermal-hydraulic model of the reactor core bypass, a solid model of the internals main elements, and a modified reactor core CFD model. The description of each component of the thermal-hydraulic analysis module is given and effective interfaces for coupling of individual modules are developed.

Applying the developed multiphysics procedure of the coupled analysis of changes in the internals cooling conditions, a calculation analysis of the baffle geometry degradation was carried out. The procedure considered feedback related to the local influence of the radial flows presence on the baffle cooling conditions. As a result of coupled assessment, the values of the rings opening after 60 years of operation, which were obtained in Section 2 as part of the sequential analysis, were clarified. The resulting values of the gaps between the rings have smaller values, which are on average 22% lower than the results of conservative sequential analysis.

Scientific novelty of the results. In the work for the first time:

- The issue of the contact problem of reactor internals as a result of their materials radiation swelling in terms of changing the conditions of cooling is considered;
- To solve the temperature component problem, the methods of computational fluid dynamics are proposed and applied, which allow to take into account the spatial features of the coolant flow and heat exchange processes.
- A methodology for solving the reactor core baffle contact problem has been developed and applied, which is based on both gradual and coupled multi-physical strength analysis (obtaining parametric functions of radiation swelling, baffle

deformation), neutron-physical calculations and thermal-hydraulic analysis of baffle elements cooling starting from the project design geometry to the calculated deformed one.

- The approach with the analysis of heat exchange conditions for a number of predicted (both hypothetical and actually assumed) configurations of the contact between the reactor core baffle and the reactor barrel is proposed. This approach made it possible to identify possible limits of the internals washing/cooling conditions violation within the framework of the sequential approach.

- An approach to the analysis of the influence of radial flows that not provided by the design within the framework of the sequential analysis of degradation processes is proposed. The conservative limits of the flow intensity values are obtained and their influence on the change of the baffle cooling conditions is analyzed. The necessity of performing a coupled multiphysics analysis is clarified.

- A coupled multiphysics analysis of the internals geometry degradation processes, which takes into account the mutual influence of three physics - neutron-physical, thermal-hydraulic processes and strength calculation is proposed, developed and applied for the first time.

- For the first time, the type of mutual influence "internals geometry degradation - baffle rings opening – reactor core radial flows appearances - change in the baffle cooling conditions – baffle opening intensity decreasing" was investigated.

The developed approaches and models can be applied to the assessment, justification and lifetime reassignment tasks of the Ukrainian nuclear power units with VVER-1000 reactors type, which are approaching the limit of lifetime extension, especially, its reassignment. Also, based on the developed approaches, it is possible to analyze the impact of changes in the internals cooling conditions and of the reactor unit as a whole by modifying the calculated thermal-hydraulic models of VVER-1000 in RELAP5, for which the developed 1-dimensional thermal hydraulic bypass model can be adopted.

Keywords: core baffle, reactor core, VVER-1000, safe operation, geometry degradation, temperature, heat and mass transfer, radiation energy release, CFD, porous body, thermal hydraulic calculation, friction forces, buoyancy, equation of motion, numerical experiment, analytical solution, parametric function, Nusselt number

Публікації, в яких представлені основні наукові результати дисертації:

1. Filonov V. Calculation of VVER-1000 core baffle temperature distribution for its swelling assessment / V. Filonov, Y. Filonova, Y. Dubyk, A. Bohdan // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(60). 2020. P. 35-46. DOI:<https://doi.org/10.15276/opu.1.60.2020.04>

2. Філонов В.В. Опис радіаційного модулю мультифізичного коду для аналізу деградації геометрії вигородки / В. В. Філонов, Ю. С. Філонова, О. В. Коваленко, В. А. Кондратюк. // Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». № 1. 2022 С. 81–89, DOI:<https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259232>

3. Filonova Y. Improved CFD framework for reactor core baffle swelling assessment/ Y. Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk, V. Kondratjuk // ASME J of Nuclear Rad Sci. Jan №7(1) 2021: 011404. Paper #NERS-20-1009 (10 pages). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4047495> (Q2, Scopus)

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Філонова Ю. С. Оценка распределения расходов по ВКУ реактора ВВЭР-1000. // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. 2017.

5. Філонова Ю. С. CFD модель охлаждения вигородки ВВЭР-1000 для оценки распухания. // Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. 2018.

6. Filonova Y. Reactor baffle cooling CFD framework for swelling assessment / Y. Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk // Proceedings of the 26th International Conference

on Nuclear Engineering ICONE26-82365. London, England, July 22-26, 2018. P. 10.
DOI:<https://doi.org/10.1115/ICONE26-82365>

7. Філонов В.В., Розрахунок температурного поля вигородки реактору ВВЕР-1000 для аналізу її розпухання /В.В. Філонов, Ю.С. Філонова, Я.Р. Дубик, А.В. Богдан // VI міжнародна науково-практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики», Одеський національний політехнічний університет, Україна, м. Одеса. Вересень 2018.

8. Філонова Ю.С., Усовершенствованная процедура аналитической оценки массовый граничных условий для охлаждения вигородки реактора ВВЭР-1000/ Ю.С. Філонова, В.В. Філонов, VI науково-практична конференція «Комп'ютерна гідромеханіка» // Інститут гідромеханіки НАН України, Україна, м. Київ. Вересень 2018.

9. Філонова Ю.С. Reactor core baffle temperature distribution evaluation for swelling assessment/Ю.С. Філонова, В.А. Кондратюк// Матеріали II міжнародної наукової мультидисциплінарної конференції студентів та молодих учених "Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future", 2018p.

10. Філонова Ю. С. Проблематика процесів деградації геометрії вигородки ВВЕР-1000 при роботі АЕС у понад проєктний термін. // Матеріали XVII-й міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів "Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики". 23 - 26 квітня. 2019 р.

11. Y. Dubyk, Swelling Of The WVER-1000 Reactor Core Baffle/ Y. Dubyk , V.Filonov, Y.Filonova//SMIRT 25, Charlotte, NC, USA, August 4-9, 2019, Division II

12. Y. Filonova. Changes in heat transfer conditions due to the contact of the core baffle and barrel during swelling processes/Y.Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk// Міжнародна конференція «International Conference VVER2019 – Recent and Future» // VVER2019, Prague, Czech Republic, листопад 2019.

13. Філонова Ю. С. Концепція спряженого розрахунку полів радіаційного енерговиділення та температури з урахуванням особливостей формозміни вигородки ВВЕР-1000/ Філонова Ю. С., О.В. Коваленко. // Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. 2021.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	15
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	23
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	29
1.1 Опис призначення та конструкції вигородки	30
1.2 Існуюча практика проведення вимірювань геометрії ВКП	34
1.3 Досвід моделювання температурного поля та радіаційних енерговиділень для подальшого аналізу деградації геометрії.....	39
1.3.1 Аналіз досвіду визначення температурного поля ВКП	40
1.3.2 Аналіз наявних оцінок енерговиділень в металі ВКП	43
1.4 Висновки до Розділу 1.....	49
2. АНАЛІЗ ЗМІНИ УМОВ ОХОЛОДЖЕННЯ ВИГОРОДКИ ПРИ НАЯВНОСТІ КОНТАКТУ ІЗ ШВК І ПОЯВІ РАДІАЛЬНИХ ПЕРЕТОКІВ.....	51
2.1 Оцінка локального стану охолодження вигородки при виникненні її контакту з ШВК.....	53
2.1.1 Створення розрахункової моделі для оцінки локального стану охолодження вигородки та її елементів.....	53
2.1.2 Вибір представницької паливної кампанії для подальших розрахунків	68
2.1.3 Розрахунковий аналіз стану ВКП при різних конфігураціях контакту вигородки з ШВК	70
2.2 Аналіз зміни умов охолодження ВКП при наявності радіальних перетоків між кільцями вигородки	78
2.3 Висновки до Розділу 2.....	83

ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ ВАРІАНТНИХ РОЗРАХУНКІВ НДС ВИГОРОДКИ ПРИ РОЗПУХАННІ ДЛЯ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ ЇЇ КОНТАКТУ ІЗ ШВК	158
ДОДАТОК Г. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ПІДХОДІВ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	160
ДОДАТОК Д. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	162

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення:

A	—	аналог коефіцієнта запасу
B	—	глибина вигоряння, МВт·доба/кг
c_p	—	питома ізобарна теплоємність, Дж/кг °С
d	—	діаметр, м
D_Σ	—	накопичена пошкоджуюча доза, зна
$DOtype$	—	конфігуратор налаштування процедури формування вхідних даних
$efFlux_j$	—	інтегральний витік нейтронів, s^{-1}
E_f	—	середня енергія одного акту ділення, MeV
E	—	енергія, MeV
f	—	площа живого перерізу, m^2
$f(z)$	—	безрозмірний аксіальний профіль
$F(Per_j, \dots)$	—	функція ефективного периметру витoku швидких нейтронів
F_Σ	—	накопичена величина флюенса, cm^{-2}
$FAtype$	—	конфігуратор налаштування процедури паливного аналізу
$\Phi(E)$	—	спектральна функція потоку нейтронів, $n/(cm^2 \cdot s)$
G	—	масова витрата, кг/с
g	—	прискорення вільного падіння, m/s^2
H	—	висота, м
h	—	висхідний напрямок руху теплоносія в активній зоні
I	—	інтенсивність випромінювання
k_k	—	відносне енерговиділення
K_{loss}	—	квадратичний коефіцієнт втрат (приведений коефіцієнт динамічної втрати)
K_{perm}	—	коефіцієнт проникності тіла (або коефіцієнт в'язкісних втрат)

k_Q^{er}	— коефіцієнт, враховуючий похибку визначення та підтримання теплової потужності
K_r	— радіальний коефіцієнт нерівномірності енерговиділення
L	— довжина каналу, м
N	— кількість кроків ітерацій/вузлів дискретизації
N_{FA}	— кількість ТВЗ
N_{cur}	— прогнозний термін експлуатації
N_i^{sec}	— кількість ТВЗ в представницькому секторі
N_l	— кількість шарів в аксіальному напрямку
N_p	— кількість твелів
N_{ref}	— кількість характерних паливних кампаній
Nu	— число Нусельта
p	— тиск, Па
P	— периметр, м
$Power_i$	— інтегральна потужність сектору, МВт
Pr	— число Прандтля
q_l	— лінійна густина теплового потоку, Вт/м
Q	— інтерфейсна густина теплового потоку Вт/м ³
Q_{heat}	— тепла потужність, Вт
Q_v	— об'ємна густина теплового потоку, Вт/м ³
r, Θ, z	— геометричні координати в циліндричній системі
R	— радіальна координата, м
R_p^f	— зовнішній радіус паливного осердя, м
Re	— число Рейнольдса
S	— площа перетину, м ²
T	— температура, °C
T_{ref}	— опорна температура, °C

V	— об'єм, м ³
w	— швидкість потоку, м/с
$w_{i,j}$	— вагові коефіцієнти елементарного джерела нейтронів
y^+	— безрозмірна координата прикордонного шару
z	— аксіальна координата, м
α	— коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м ² К)
ζ	— коефіцієнт втрати тиску
Δ	— різниця
δ	— елементарний приріст
Ψ	— поле енерговиділення/швидкості набору
$\sigma(E)$	— переріз зміщення на атом, барн
λ	— коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К)
μ	— коефіцієнт динамічної в'язкості, Па/с
$\tilde{\mu}_a$	— спектрально середньозважений коефіцієнт поглинання енергії
ν	— коефіцієнт кінематичної в'язкості, м ² /с
ν_f	— середній вихід швидких нейтронів під час ділення
τ	— час, с
ρ	— густина, кг/м ³
Π	— вектор змінних теплогідравлічних параметрів
$\Pi_{ref}(t)$	— референтний профіль зміни теплової потужності/витоку нейтронів в часі

Індекси:

ave	— середнє
base,б	— «базова» величина
Baffle /	
barrel	— кільцевий зазор між вигородкою і шахтою
cor,к	— «коригуюча» величина
Core	— активна зона

Core belt	—	гранований пояс
FA	—	паливна збірка/паливний аналіз
global	—	глобальна матриця
in	—	вхід
itr	—	поточна ітерація
L	—	повздовжній напрямок
last	—	на минулому часовому кроці
max	—	максимальне значення
min	—	мінімальне значення
out	—	вихід
r	—	радіальний
ref	—	опорне значення
sum	—	сумарне
експ	—	експлуатаційний

Скорочення:

АЕС	—	атомна електростанція
АЗ	—	аварійний захист
АкЗ	—	активна зона
ВВЕР	—	водо-водяний енергетичний реактор
ВКП	—	внутрішньокорпусний пристрій
ВП	—	відокремлений підрозділ
ГУ	—	граничні умови
ДП	НАЕК	
«Енергоатом»	—	Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом»
ЗНА	—	зміщення на атом
ІЯД	—	інститут ядерних досліджень
КГО	—	коефіцієнт гідравлічного опору
МК	—	Монте-Карло

МСО	–	Метод скінчених об'ємів
НАЕК	–	Національна атомна енергогенеруюча компанія
НАН	–	Національна академія наук
ПСЕ	–	Продовження строків експлуатації
РТ	–	різьбова тяга
РУ	–	реакторна установка
СЛАР	–	Система лінійних алгебраїчних рівнянь
СЛДР	–	Система лінійних диференціальних рівнянь
ТВЗ	–	тепловиділяюча збірка
ХФТІ ЦПАЗ	–	Харківський фізико-технічний інститут, центр проектування активних зон
ШВК	–	Шахта внутрішньокорпусна
CFD	–	Computational fluid dynamics
PLF	–	Pressure loss factor
TMM	–	Transfer Matrix Method

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день актуальними є роботи з розрахункового обґрунтування можливості експлуатації енергоблоків АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000 у понад проєктний термін. Найбільш відповідальними елементами реакторних установок є такі не підлягаючі заміні елементи як корпус реактора, та внутрішньокорпусні пристрої (ВКП). Виходячи з досвіду проведення подібних робіт з розрахункових обґрунтувань надійності обладнання, найсуттєвішим обмежуючим фактором надійної роботи енергоблоків у понад проєктний період є деградація внутрішньокорпусних пристроїв під дією нейтронного випромінювання. Вигородка являє собою внутрішньокорпусний пристрій, однією з основних функцій якого є залізо-водний захист корпусу реактора від потоку високоенергетичних нейтронів. В процесі експлуатації вона піддається найбільш інтенсивному нейтронному та гамма-опроміненню, внаслідок чого спостерігаються такі феномени як радіаційні енерговиділення за рахунок гамма-розігріву та радіаційне розпухання і повзучість металу. Дослідження впливу випромінювання при високих температурах на аустенітні сталі, з яких виготовлені ВКП, вказують на значну деградацію матеріалу, що, насамперед, проявляється в зміні його міцнісних характеристик. Як наслідок, відбувається радіаційне розпухання і повзучість матеріалу, що викликає значні геометричні зміни внутрішньокорпусних пристроїв, зокрема, вигородки, і може призводити до порушення проєктної геометрії ВКП, їх контакту та порушенню працездатності. Питання появи контакту між ВКП має декілька складових, зокрема, аналіз умов виконання критеріїв міцності в разі контакту, а також аналіз впливу порушення схеми протікання охолоджуючого теплоносія і, як наслідок, зміни умов охолодження внутрішньокорпусних пристроїв, на надійність подальшої роботи РУ в цілому. Останні проведені оцінки прогнозованого моменту контакту вигородки внутрішньокорпусної із шахтою, враховуючи той факт, що більшість українських РУ із ВВЕР-1000 вичерпали свій проєктний термін експлуатації в 30 років, вказують на крайню необхідність вирішення обох складових контактної задачі

найближчим часом. Важливим фактором є неможливість дослідження та вимірювань реальної геометрії вигородки внутрішньокорпусної в гарячому стані. Відповідно, дані щодо реальної формозміни вигородки можуть бути отримані лише за рахунок обґрунтованого аналізу та побудови спеціальних розрахункових моделей, а їх достовірність може бути погоджена даними натурних експериментів щодо геометрії в холодному стані. Загалом, задача полягає у вирішенні питання міцнісної задачі та аналізу зміни умов охолодження. Міцнісна складова даного питання раніше розглядалася з метою дослідження можливості контакту та прогнозування самого моменту контакту. Таким чином, питання щодо збереження надійності охолодження металу вигородки при деградації її геометрії і, як наслідок, утворення не передбачених проєктом перетоків між кільцями вигородки до моменту роботи над дисертацією не було досліджено і, відповідно, наразі є не вирішеним, а, значить, – актуальним, та потребує комплексного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» за пріоритетним напрямом «Енергетика та енергоефективність»; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Дослідження теплогідрравлічних процесів в елементах систем тепловідведення для перспективних об'єктів атомної енергетики» (№ Держ.реєстр. 0119U001065, період виконання 01.01.2019 р. – 31.12.2021 р.), яка була виконана на кафедрі атомних електричних станцій і інженерної теплофізики КПІ ім. Ігоря Сікорського (з 2022 р. кафедра атомної енергетики) за пріоритетним тематичним напрямом «Технології атомної енергетики та методи оцінки її безпеки»

Мета і завдання дослідження. Мета даної дисертаційної роботи полягає в обґрунтуванні надійності охолодження металу вигородки та елементів ВКП реакторних установок ВВЕР-1000 при врахуванні деградації їх геометрії задля підтвердження можливості безпечної експлуатації у понадпроектний термін при наявності непередбачених проєктом відхилень (змін).

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

1. Аналіз ключових факторів, що визначають процеси деградації геометрії ВКП та найбільш характерні зони деградації, що можуть впливати на надійність їх охолодження.
2. Аналіз існуючої практики дослідження зміни геометрії вигородки наявними експериментальними засобами та відповідно досвіду моделювання радіаційних енерговиділень та температурного поля в металі ВКП.
3. Розробка методології вирішення контактної задачі, що складається з аналізу міцнісних та теплогідравлічних процесів при деградації геометрії.
4. Розробка та вдосконалення інструментів існуючих та дозволених у вітчизняній галузі теплогідравлічних моделей або процедур для виконання аналізу з обґрунтування надійності охолодження металу ВКП у понадпроектний термін.
5. Аналіз необхідності розробки мультифізичної процедури зв'язаного аналізу, що включає модулі нейтронно-фізичного, теплогідравлічного аналізу та функції з оцінки міцності.

Об'єктом дослідження є теплогідравлічні процеси в активній зоні та охолоджуючих каналах вигородки реакторів ВВЕР-1000.

Предметом дослідження є тепловий стан характерних елементів РУ ВВЕР-1000 при наявності деградації геометрії ВКП.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувались:

1. Розрахунково-аналітичні методи з метою аналітичного моделювання активної зони і байпасу теплоносія, та отримання «замикаючих» граничних умов для подальшого розрахункового аналізу.
2. Розрахункові методи чисельного моделювання теплогідравлічних процесів і процесів формозміни геометрії як послідовно, так і зв'язано.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Створені комплексні теплогідравлічні та нейтронно-фізичні підходи для оцінки впливу на надійність тепловідводу від вигородки ВВЕР-1000 внаслідок радіаційного розпухання металу при непроєктній зміні геометрії.

- Для вирішення температурної складової задачі побудовані спеціальні розрахункові моделі, які базуються на методах обчислювальної гідродинаміки, що дозволяє враховувати просторові особливості протікання теплоносія та процесів теплообміну в елементах внутрішньокорпусних приладів ВВЕР-1000 враховуючи локальний стан активної зони.

- Створено та застосовано методологію вирішення контактної задачі ВКП, що базується як на поступовому, так і на зв'язаному мультифізичному аналізі міцності (отриманні параметричних функцій радіаційного розпухання, формозміни ВКП), нейтронно-фізичних розрахунках і теплогідравлічному аналізі охолодження елементів ВКП починаючи від проєктної геометрії і закінчуючи розрахованою формозміненою.

- Проаналізовано ймовірні конфігурації (як гіпотетичні, так і реально передбачувані) контакту вигородки із шахтою внутрішньокорпусною (не передбачено проєктом), що дозволило виявити можливі межі порушення умов омивання/охолодження ВКП в рамках послідовного підходу.

- Створено напіваналітичні методи щодо визначення впливу не передбачених проєктом радіальних перетоків в рамках послідовного аналізу процесів деградації, що дало змогу оцінити консервативні межі значень інтенсивності перетоків та їх вплив на зміну умов охолодження вигородки.

- На основі оригінального зв'язаного міждисциплінарного підходу, який враховує особливості радіаційних енерговиділень, що формалізовані у вигляді параметричних функцій та власних методів одновимірної теплогідравліки з аналітично отриманою функцією температурного поля теплоносія на елементарній ділянці інтегрування був запропонований спосіб визначення усталеного (рівноважного) розкриття кілець. При цьому враховані особливості зміни геометрії за рахунок розпухання та температурного розширення з урахуванням наявності кріпильних елементів у вигляді міжкільцевих шпильок.

- Виявлено основний механізм зворотного зв'язку у вигляді взаємного впливу типу «деградація геометрії ВКП – розкриття кілець – поява радіальних

перетоків з активної зони – зміна умов охолодження вигородки – зменшення інтенсивності розкриття кілець»

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність дисертації полягає в тому, що розроблені підходи та моделі є одними із основних для створення єдиного, загальногалузевого підходу для робіт із оцінки, обґрунтування і перепризначення термінів експлуатації енергоблоків України з реакторами ВВЕР-1000 у понадпроектний термін. Отримані результати є базовими для загальногалузевого аналізу впливу непроєктних відхилень на теплогідравлічну надійність активної зони ВВЕР-1000, оскільки частина висновків є основою для модифікації розрахункових теплогідравлічних моделей РУ ВВЕР-1000 в RELAP5.

Результати дисертації впроваджено при виконанні оцінки технічного стану і обґрунтуванні можливості довгострокової експлуатації елементів ВКП реакторних установок типу ВВЕР-1000 енергоблоків АЕС України, що засвідчується довідкою про впровадження (ДОДАТОК Г).

На основі результатів дисертації зроблено висновки про можливість обґрунтування безпечної експлуатації ВКП РУ ВВЕР-1000 при появі контакту між вигородкою і шахтою та радіальних перетоків між кільцями вигородки з урахуванням особливостей процесів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана на базі ТОВ «ППП-Центр» під науковим керівництвом к.т.н., Кондратюка В.А., який надавав допомогу у формулюванні ключових цілей досліджень.

Здобувачем виконано:

- Дослідження наявних невирішених питань, пов'язаних з тематикою дисертації, формулювання мети та задач дослідження;
- Розробка та реалізація методології аналізу впливу деградації геометрії елементів ВКП на зміну умов їх охолодження;
- Розробка та реалізація відповідних розрахункових моделей, представлених в дисертації;

- Розрахунковий аналіз та формулювання висновків щодо отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Проміжні результати роботи доповідалися на:

- XV, XVI, XVII, XIX Міжнародних науково-практичних конференціях аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Україна, м. Київ, 2017 р., 2018 р., 2019 р., 2021 р.);

- 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26-82365. (London, England, July 22-26, 2018);

- VI міжнародній науково-практичній конференції «Безпека та ефективність атомної енергетики» (Одеський національний політехнічний університет. (Україна, м. Одеса, вересень 2018 р.).

- VI науково-практичній конференції «Комп'ютерна гідромеханіка» (Інститут гідромеханіки НАН України, Україна, м. Київ, вересень 2018 р.)

- II міжнародній науковій мультидисциплінарній конференції студентів та молодих учених “Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future”. (Україна, м. Дніпро, 2018 р.)

- 25th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. (Charlotte, NC, USA, August 4-9, 2019)

- Міжнародній конференції «International Conference VVER2019 – Recent and Future» (Prague, Czech Republic, листопад 2019 р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи представлені у 13 публікаціях наукових робіт, серед яких: 2 статті у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у міжнародному виданні, віднесеному до другого квартилю (Q2, Scopus); 10 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає – 164 сторінки, у тому числі 59 – рисунків, 8 – таблиць, список використаної літератури, що включає 73 найменування, 5 додатків на 16 сторінках.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Роботи з продовження терміну експлуатації енергоблоків атомних станцій у понад проєктний період, а також розробка нових підходів для розширення попередньо оцінених можливих років продовження ресурсу енергоблоків, в яких цей період майже вичерпано наразі є ключовими для вітчизняних реакторних установок типу ВВЕР.

У зв'язку із розвитком тенденції продовження строку експлуатації (ПСЕ) з кінця 90-х років минулого століття з'явилися науково-дослідні роботи, присвячені вивченню радіаційних ефектів, що спостерігаються в аустенітних сталях внутрішньокорпусних пристроїв реакторних установок із ВВЕР [1-3].

Всі елементи ВКП ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 виготовлені з аустенітної сталі 08X18H10T та її зварних з'єднань. Ця сталь у вихідному (неопромінену) стані має високу пластичність та корозійну стійкість в середовищі теплоносія першого контуру, тому довгий час вважалося, що елементи ВКП вельми довговічні та не можуть обмежувати ресурс реакторної установки [4].

Проведені за останні 20 років лабораторні дослідження фізико-механічних властивостей та характеристик опромінених аустенітних сталей, а також випадки пошкодження ВКП закордонних АЕС показали, що під впливом інтенсивного нейтронного випромінювання аустенітні сталі сильно деградують, що може призвести до значного обмеження ресурсу ВКП.

Так, в ранніх роботах [5-7] зазначається значний вплив нейтронного опромінення на фізико-механічні властивості аустенітних сталей, що проявляється у підвищенні їх міцності, зниженні пластичності а також в об'ємних змінах, пов'язаних із радіаційним розпуханням [2, 8]. Автори відзначають посилення деградації механічних властивостей сталей під дією високих флюенсів нейтронів та підвищених температур.

Особливістю елементів ВКП є те, що за рахунок свого розташування в реакторній установці вони накопичують значну нейтронну пошкоджуючу дозу в процесі експлуатації. Насамперед, це стосується вигородки внутрішньокорпусної,

однією з основних функцій якої є залізо-водний захист корпусу реактору від високоенергетичного випромінювання.

1.1 Опис призначення та конструкції вигородки

Вигородка являється внутрішньокорпусним пристроєм та призначена для:

- формування поля енерговиділення;
- нейтронного захисту корпусу реактора;
- дистанціювання периферійних тепловиділяючих збірок (ТВЗ);
- зниження витоку нейтронів з активної зони реактора;
- зменшення протічок теплоносія повз активну зону реактора;
- розміщення збірок «променевих» зразків-свідків корпусної сталі;
- розміщення датчиків системи контролю нейтронного потоку при перевантаженні.

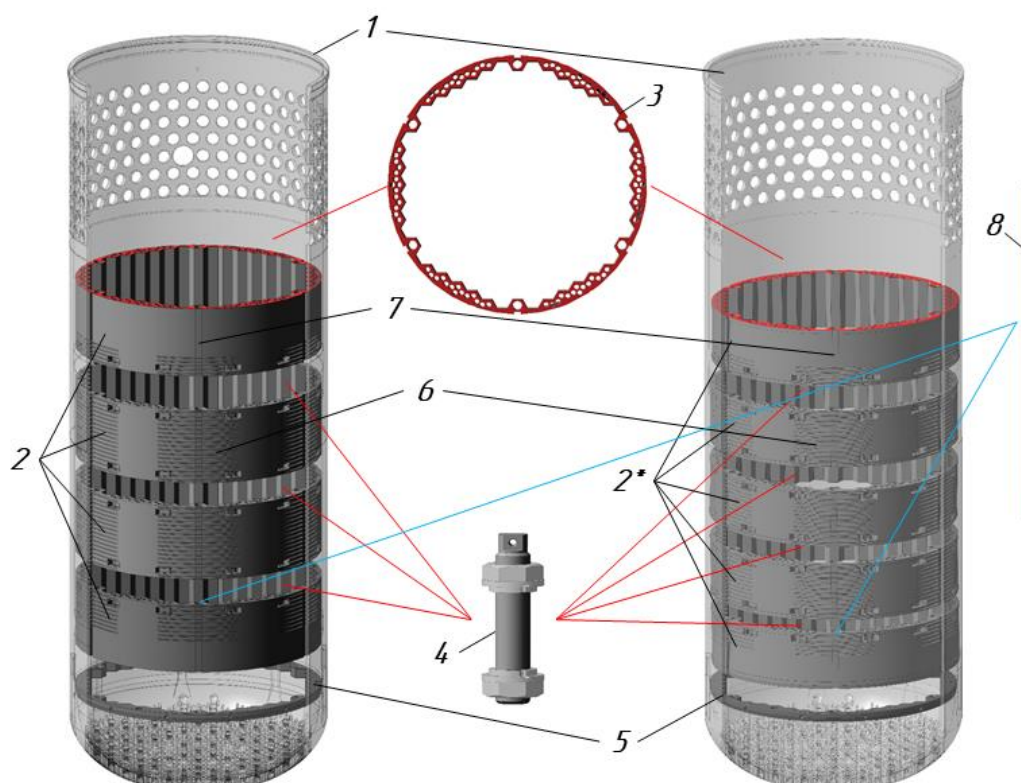
Загальний вигляд вигородки, встановленої в шахту внутрішньокорпусну, представлено на Рис. 1.1.

Конструкційно вигородка представляє собою циліндричну обичайку, що складається з чотирьох, або п'яти (в залежності від проєкту РУ) кілець (2, Рис. 1.1) – одного нижнього, двох або трьох середніх та одного верхнього. Кожні два кільця вигородки скріплені між собою 12 шпильками (4, Рис. 1.1).

На зовнішній поверхні кілець вигородки виконані поперечні кільцеві проточки (6, Рис. 1.1) і наскрізні вертикальні пази - канали (7, Рис. 1.1), що створюють ребра вигородки і призначені для організації потоку теплоносія між шахтою і вигородкою з метою їх охолодження. При цьому, згідно проєкту, мінімальна величина зазору між кільцями вигородки та внутрішньою поверхнею внутрішньокорпусної шахти (ШВК) в холодному стані складає – 2.5 мм.

Внутрішня конфігурація кілець вигородки повторює профіль граней периферійних касет активної зони (3, Рис. 1.1) з мінімальним зазором в 5 мм, створюючи, таким чином, умови для протікання теплоносія і відведення тепла від периферійних тепловиділяючих збірок [10-11].

З метою забезпечення надійного охолодження металу вигородки в ній передбачені охолоджуючі канали (3, Рис. 1.1), через які байпасує теплоносії. Витрата байпасуючого теплоносія визначається профілюючими отворами у гранованому поясі (5, Рис. 1.1). Вигородка встановлюється на гранований пояс ШВК і закріплена на ньому за допомогою різьбових тяг (8, Рис. 1.1), встановлених в шести великих каналах вигородки. При установці вигородки на гранований пояс шахти, канали в вигородці збігаються з відповідними отворами в гранованому поясі шахти.



- | | | |
|---|-----------------------|----------------------------|
| 1 – шахта внутрішньокорпусна | 4 – шпилька | 7 – вертикальний паз-канал |
| 2, 2* – кільця вигородки (4 або 5 кілець) | 5 – гранований пояс | 8 – різьбова тяга |
| 3 – поперечний переріз кілець вигородки | 6 – кільцева проточка | |

Рис. 1.1 – Загальний вигляд розміщення вигородки внутрішньокорпусної та гранованого поясу в шахті

Згідно з положеннями Типової програми по оцінці технічного стану та продовження строку експлуатації внутрішньокорпусних пристроїв реакторів типу

ВВЕР-1000 [12], при виконанні розрахунків радіаційного розпухання та прогресуючої формозміни вигородки внутрішньокорпусної повинна бути виконана оцінка величини зазору між вигородкою та тепловіділяючими збірками (ТВЗ), величини зазору між вигородкою та шахтою внутрішньокорпусною (ШВК), а також імовірного виникнення зазору між окремими кільцями вигородки.

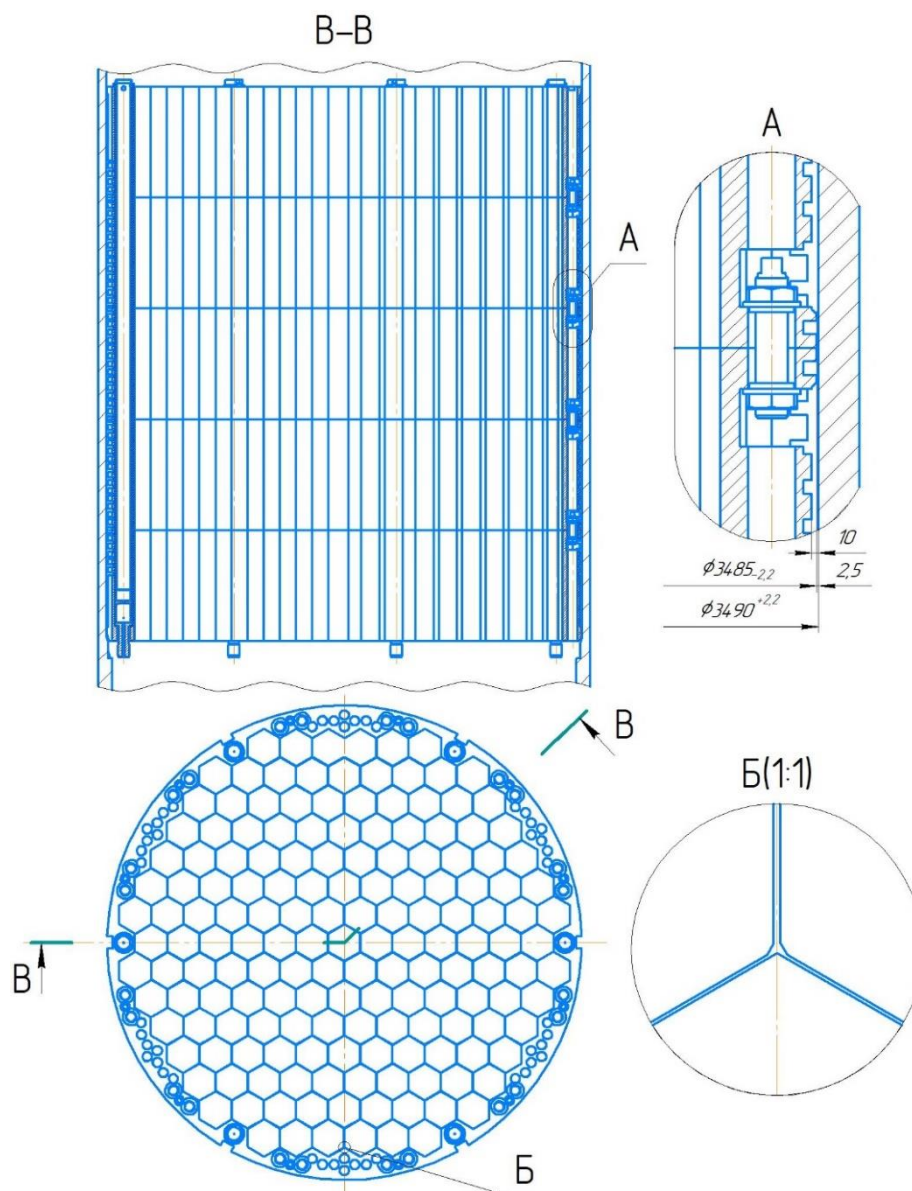


Рис. 1.2 – Схематичне зображення номінальних зазорів між вигородкою та ТВЗ (переріз Б) і вигородкою та ШВК (переріз А)

Відповідно до проєктної межі безпечної експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР – обмежуючим фактором з точки зору зміни геометричного

стану є контакт вигородки та периферійного палива. Проте, попередній аналіз формозміни внутрішньокорпусних пристроїв [35-39, 43], який є обов'язковим при продовженні ресурсу, показав, що більш очікуваним є контакт вигородки та шахти, який передувє контакту з ядерним паливом. Отримані прогнозовані моменти вичерпання зазорів для енергоблоків АЕС України зведено у Табл. 1.1.

Табл. 1.1 – Порівняльний аналіз результатів розрахунків формозміни ВКП для енергоблоків АЕС України [35-39, 43]

Найменування контакту	АЕС-1	АЕС-2	АЕС-3	АЕС-4	АЕС-5	АЕС-6	АЕС-7	АЕС-8	АЕС-1-3 ¹
Контакт вигородки з ШВК ("гарячий" стан), кампанія	35	35	35	36	35	38	46	40	21
Контакт вигородки з ШВК ("холодний" стан), кампанія	47	47	51	>60	45	>60	>60	56	60
Контакт вигородки з ТВЗ ("гарячий" стан), кампанія	>60	>60	>60	58	>60	>60	>60	54	58
Контакт вигородки з ТВЗ ("холодний" стан), кампанія	>60	>60	>60	>60	>60	>60	>60	59	>60
¹ - Відповідає розрахункам з уточненням результатів радіаційного енерговиділення									

З наведеного в Табл. 1.1 порівняльного аналізу видно, що зміна величин відповідних зазорів при експлуатації реакторної установки є одним з нагальних питань в рамках робіт з обґрунтування можливості безпечної експлуатації вітчизняних енергоблоків з РУ типу ВВЕР-1000. При чому, вичерпання проєктного зазору відбувається, в першу чергу, між зовнішньою поверхнею вигородки та внутрішньою поверхнею шахти саме в «гарячому» стані, та, за останніми оцінками, знаходиться в межах 35-40 кампаній (за уточненими розрахунками – навіть 21 кампаній), що відповідає наявному строку експлуатації енергоблоків України.

Додатковим фактором є те, що із-за особливості конструкції вигородки виникають радіальні перетоки теплоносія із активної зони на периферію вигородки. Такий стан не передбачений проектом, тому у вітчизняній галузі виникають дискусії щодо подальшої безпечної експлуатації РУ.

1.2 Існуюча практика проведення вимірювань геометрії ВКП

Виходячи з наявної проблематики зміни геометричних розмірів вигородки внутрішньокорпусної, можливого вичерпання проектних зазорів між вигородкою і ТВЗ та вигородкою і шахтою внутрішньокорпусною, а також імовірної появи не передбаченого проектом розкриття між кільцями вигородки логічним являється проведення натурного вимірювання зміненої геометрії після довгострокової експлуатації. Варто зазначити, що подібна процедура являється можливою тільки в холодному стані при умові вивантаження паливних касет з активної зони реактора. Сама по собі умова проведення вимірювань в холодному стані накладає певне обмеження, так як на геометричні параметри наявних вузьких зазорів між ВКП впливають не тільки фактори накопиченої пошкоджувальної дози, але й миттєві фактори роботи в гарячому стані – певному діапазоні температур, та радіаційні енерговиділення.

Тим не менш, існує певна практика проведення реальних вимірювань зміни геометрії вигородки після її довгострокової експлуатації під час планово попереджувальних робіт. Так, експериментальне визначення зміни геометрії вигородки реактора ВВЕР-1000 за рахунок радіаційного розпухання та повзучості матеріалу проводилося на вигородці енергоблока № 1 Балаковської АЕС [14], який перебував в експлуатації понад 27 років. Для цього в ЗАТ «Діаконт» було розроблено та виготовлено спеціальну систему вимірювання геометрії ВКП – «СТС-К-ВКУ», основним елементом якої є телевізійний зонд. Основою методу являється використання генерації лазерного променя та аналіз відстані до точки перетину лазера з поверхнею вигородки за допомогою телевізійної камери. Даний зонд виконаний у циліндричному корпусі довжиною близько 1 м з нержавіючої

сталі, в якому за захисним склом розміщені лазер та телевізійна камера. Конструкція зонда дозволяє його обертання навколо осі на 360° . Лазер генерує луч в площині, перпендикулярній осі зонда (Рис. 1.3). Телевізійна камера спрямована на точку перетину лазерного променя та внутрішньої поверхні вигородки. Це дозволяє використовувати тріангуляційний метод, коли зміна відстані визначається за величиною зміщення проекції лазерного променя в полі зображення камери.

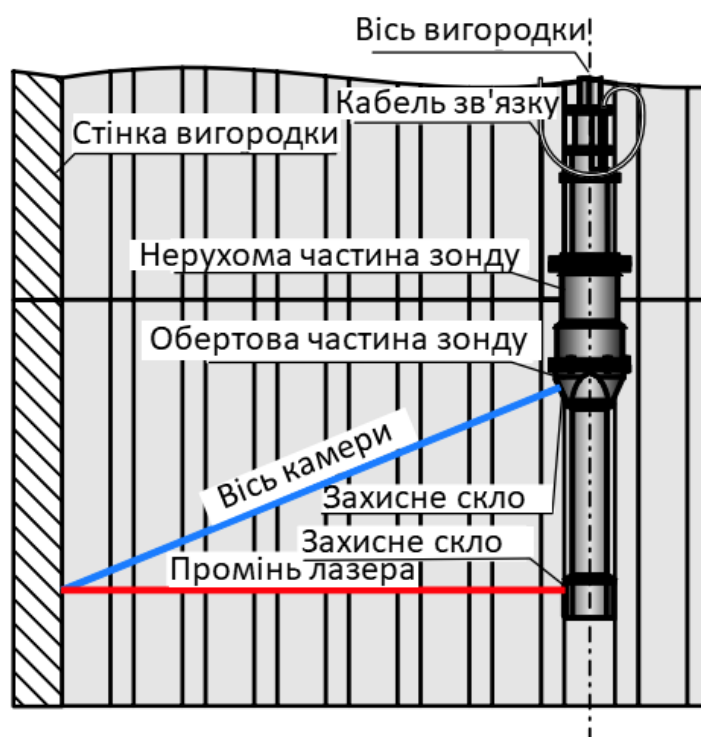


Рис. 1.3 – Схематичне зображення розміщення зонда при вимірюванні зміни геометрії вигородки [14]

За допомогою даної установки були проведені вимірювання геометрії вигородки в двох перерізах кожного з її кілець. Кожен вимір проводився з повним оборотом телевізійного зонда. Після обробки результатів даних вимірювань автори визначали виміряні переміщення ребер вигородки та розраховували середні по 12 секторах переміщення однотипних ребер. Таким чином авторами [14] було отримано висотний розподіл виміряних переміщень (Рис. 1.4).

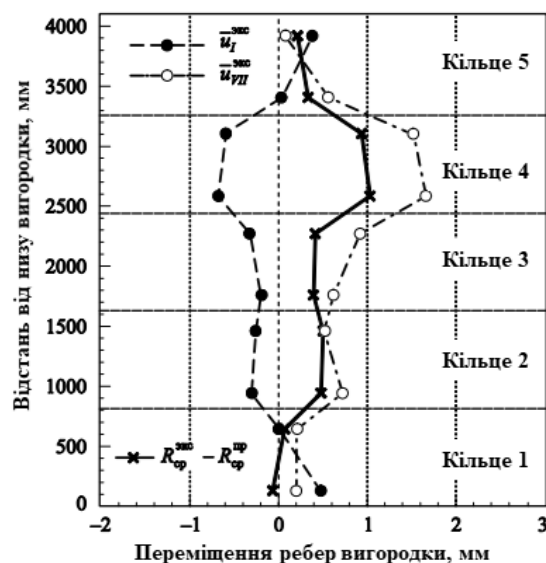
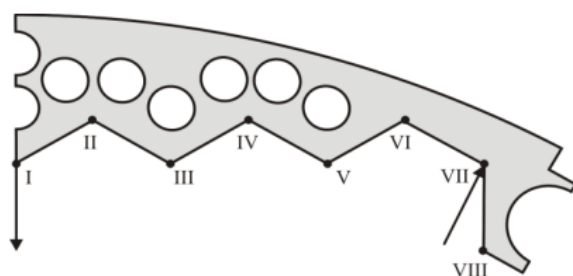


Рис. 1.4 – Висотний розподіл виміряних переміщень I та VII ребер за 27 років експлуатації вигородки Балаковської АЕС [14].

В результаті проведених експериментальних вимірювань автори отримали значення переміщень ребер вигородки, які знаходились в межах 2 мм.

Подібні роботи з вимірювання зміни геометрії вигородки також проводилися і на вітчизняних АЕС. Так, в роботі [16] наведено розгортку відносних переміщень внутрішніх граней вигородки енергоблоку ПАЕС-2 (Рис. 1.5).

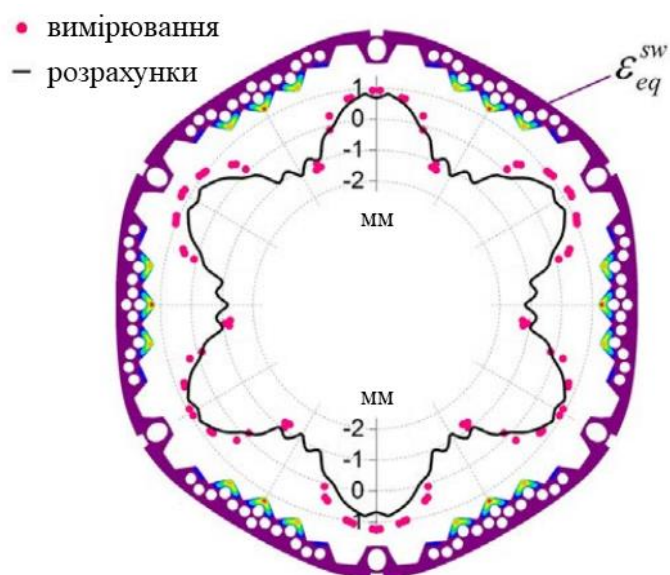


Рис. 1.5 – Дані вимірювань геометрії внутрішньої поверхні вигородки для енергоблоку ПАЕС-2, отримані авторами [16]

У роботі [27] наводяться результати вимірювань для енергоблоків ЗАЕС-1 та ЗАЕС-2, що проводилися спеціалістами ТОВ «ІПП-Центр». Для вимірювань використовується розроблена установка безконтактного типу, що базується на використанні ультразвукових датчиків. Загальний вигляд установки та її розміщення в активній зоні реактору наведено на Рис. 1.6.

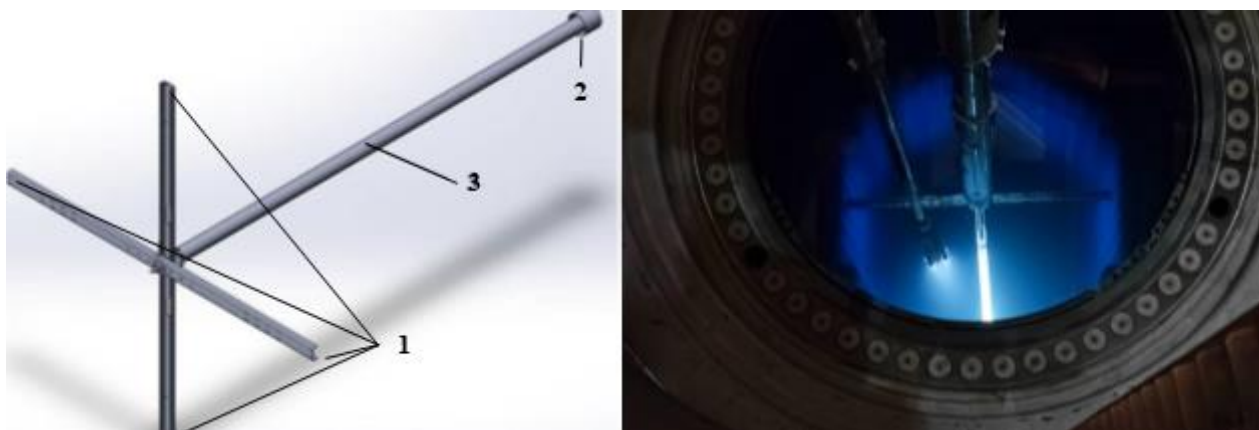


Рис. 1.6 – Загальний вигляд системи просторового вимірювання геометрії вигородки (1 – місця розміщення датчиків, 2 – місце кріплення, 3 – траверса)

Представлена установка складається з двох взаємно перпендикулярних балок, скріплених між собою по центру та закріплених на центральній траверсі (3, Рис. 1.6). У верхній частині траверса закріплюється до штока машини перезавантаження палива. Ультразвукові датчики з роздільною здатністю вимірювання 0.01 мм розташовуються на кінцях взаємно перпендикулярних балок (1, Рис. 1.6), а дроти від датчиків підключаються до записуючого пристрою, що розташовується в безпечній зоні. За допомогою даної установки проведено два типи вимірювань – на різних висотах з обертанням траверси на кожному рівні, та із фіксацією кута розташування балок і зміною лише осьової координати. Другий тип вимірювань показав більш надійні результати, так як при обертанні траверси на кожному рівні були отримані великі відхилення. Таким чином, використовуючи другий підхід вимірювань зі зміною горизонтальної площини розташування датчиків із кроком 100 мм, вдалося отримати близько 40 точок по висоті вигородки для кожного фіксованого кута повороту траверси. Проведені вимірювання

відхилення точок внутрішньої поверхні вигородки для 31-ї кампанії енергоблоків ЗАЕС-1 та ЗАЕС-2 в рамках роботи [27] співставленні із розрахунковими значеннями для двох виділених точок.

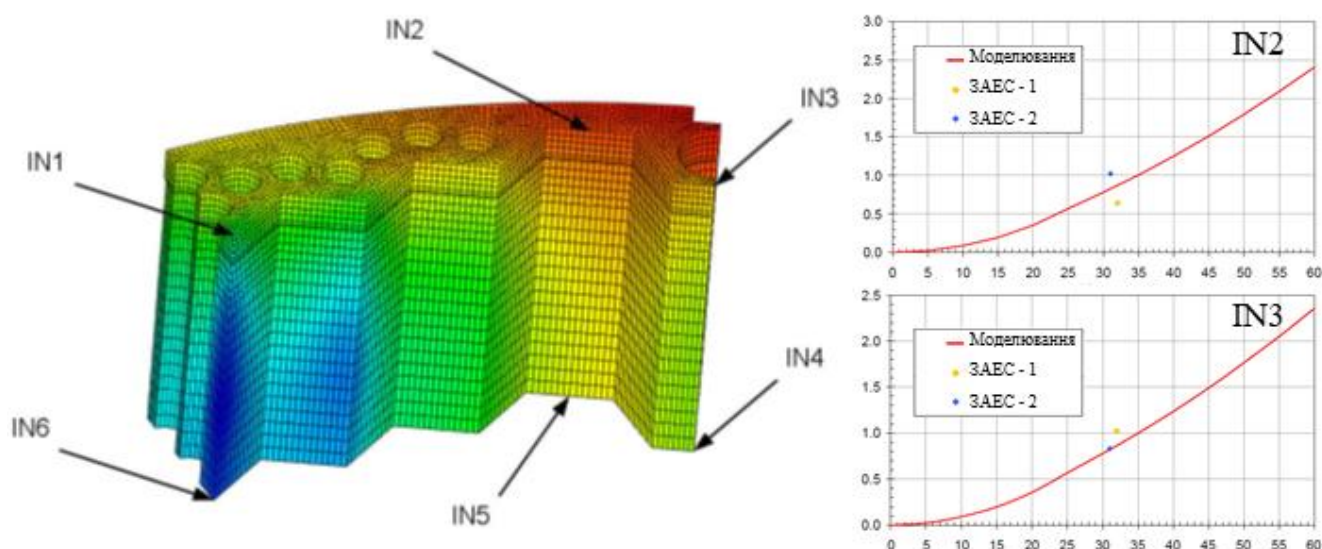


Рис. 1.7 – Співставлення результатів вимірювань із розрахунковими значеннями для двох точок внутрішньої поверхні вигородки [27]

Автори [27] зазначають непогану збіжність отриманих результатів розрахункового прогнозування для двох аналізованих точок із результатами вимірювань.

Наведені способи вимірювань використовують безконтактні методи, що в кожному випадку вносить похибку вимірювань, і відповідно складність інтерпретації результатів. Спеціалістами вітчизняного ВП «КБ Атомприлад» ДП «НАЕК «Енергоатом» було запропоновано реалізувати установку контактного типу [17]. Розроблений концепт являє собою установку, що використовує роликові датчики. Такий принцип проведення вимірювань мав зняти невизначеність, пов'язану із співставленням положення штанги із віссю вигородки. Проте, на момент проведення даного аналізу установка залишається не реалізованою, та, відповідно, дані вимірювань за допомогою контактного способу відсутні.

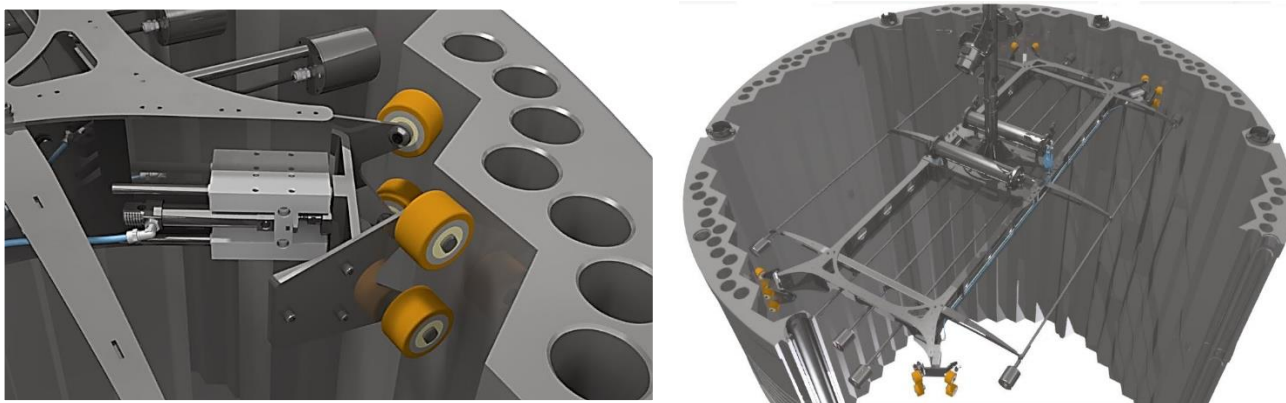


Рис. 1.8 – Перспективна установка вимірювання геометрії вигороди контактного типу, запропонована спеціалістами ВП «КБ Атомприлад» ДП "НАЕК «Енергоатом» [17]

Варто відзначити, що всі наведені вимірювання проведені для холодного стану ВКП і дозволяють дослідити тільки зміну геометрії внутрішньої поверхні вигородки. Таким чином, виникає потреба в розробці надійних розрахункових моделей для прогнозування зміни геометрії вигородки з урахуванням миттєвих параметрів радіаційних енерговиділень та температурного стану, які б дозволили прогнозувати зміну зазорів не тільки між вигородкою та ТВЗ, а й між вигородкою і ШВК, та моделювати процес розкриття кілець вигородки.

1.3 Досвід моделювання температурного поля та радіаційних енерговиділень для подальшого аналізу деградації геометрії

Основною причиною зміни геометричного стану є сукупність впливу накопленої радіаційної дози, а також нерівномірність температурного поля. Отже, загалом, задача оцінки деградації металу ВКП складається з трьох підзадач – нейтронно-фізичної складової, задачі визначення температурного поля та, відповідно, міцнісної складової.

«Класичний» аналіз, який застосовується при продовженні терміну експлуатації, складається з послідовних етапів, у кожному з яких виконується

оцінка радіаційних умов, температурного поля та, нарешті, оцінка міцності [13,18-28].

1.3.1 Аналіз досвіду визначення температурного поля ВКП

У рамках магістерської роботи [34] було проаналізовано ряд робіт з визначення температурного поля в металі вигородки для подальшого розрахунку величини розпухання, а саме:

- Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України [18], наведені значення максимальної температури в вигородці ~ 488 °С при амплітуді об'ємного енерговиділення – 11 Вт/см³;

- У Науково-дослідному інституті атомних реакторів в Демитровграді отримані ще більші значення максимальної температури, що досягає ~ 460 °С [20]. При таких температурах та наведених дозах можливим є значне розпухання в окремих ділянках вигородки, яке після 30 років експлуатації оцінюється в 12%, що призводить до збільшення зовнішнього діаметру на 5 мм;

- Розрахунки температурного поля в перерізі вигородки, проведені в роботах [21,22] в двомірній постановці, показують, що максимальна температура матеріалу вигородки може досягати величини $T_{\max} = 407$ °С і локалізується в області малого об'єму за рахунок гамма-розігріву (Рис. 1.9);

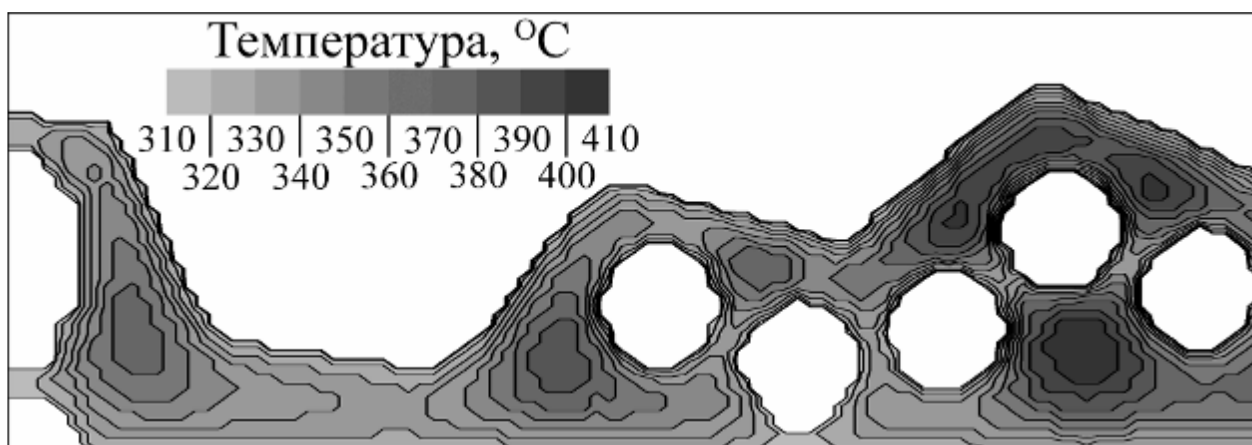


Рис. 1.9 – Розподіл температури в найбільш навантаженому перерізі вигородки реактору ВВЕР-1000 [21]

- У роботі [23] отримано розподіл температури в перерізі вигородки, де максимальне значення температури досягає 403,5 °C;

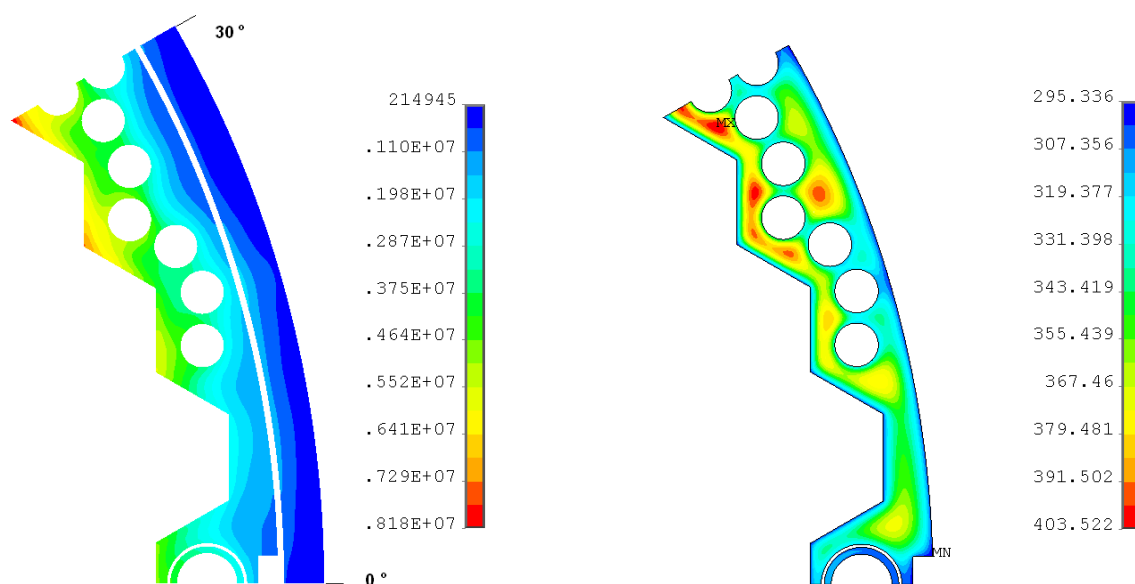


Рис. 1.10 – Значення енерговиділень в перерізі вигородки і шахти (Вт/м³) та отриманий авторами розподіл температури у металі вигородки [23]

- У роботах [24] та [26] застосовуються тривимірні моделі та максимально отримане значення температури досягає 435.5 °C;

Так, у рамках магістерської роботи [34] фактично проаналізовано «класичний» підхід до розрахунків формозміни ВКП та з'ясовано необхідність вдосконалення даного підходу з точки зору визначення температурного поля ВКП та:

- вказано на існування невизначеності в оцінці температурного поля металу вигородки, що суттєво впливає на результати подальшої оцінки міцності (суттєва залежність моделі об'ємного розпухання від температурного поля);
- запропоновано підхід вдосконалення методики визначення температурного поля в металі ВКП шляхом застосування CFD-моделювання;
- для забезпечення можливості обмеження меж розрахункової моделі розроблено та використано підхід з попередньою аналітичною оцінкою заміщуючих граничних умов;

- розроблено відповідну CFD-модель охолодження вигородки та отримано температурне поле вигородки та елементів ВКП при роботі РУ на номінальному рівні потужності [29, 30].

При такому підході температурне поле в металі ВКП отримується для обраної представницької кампанії та в подальшому використовується на наступному кроці міцнісного аналізу [30], що в першому наближенні дає змогу оцінити прогнозований стан геометрії ВКП.

Описаний підхід та розроблені автором моделі широко застосовувалися останні 6 років в рамках робіт з продовження терміну експлуатації енергоблоків вітчизняних АЕС України [35-39, 43].

Так, при виконанні робіт з обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації енергоблоку ПАЕС-3 [39] автором було вдосконалено розроблену в рамках [34] модель та проаналізовано вплив врахування наявності ребер охолодження в кільцях вигородки на прикладі чотирьох кільцевої моделі.

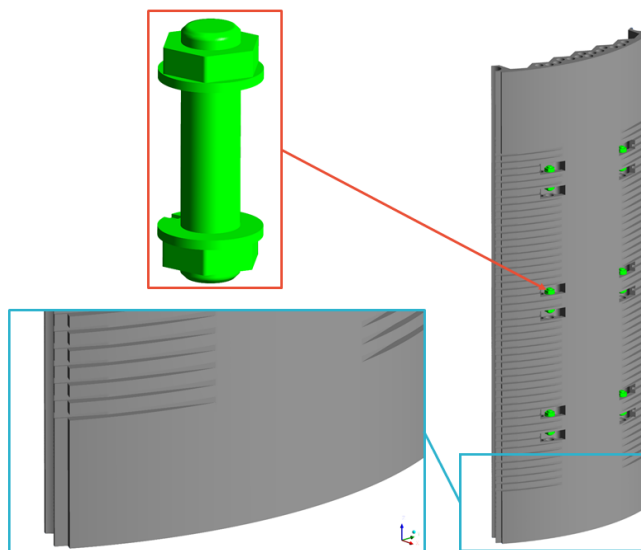


Рис. 1.11 – Загальний вигляд геометричної моделі вигородки з урахуванням ребер охолодження

При проведенні в рамках [39] тестових розрахунків було виявлено невелике зниження середньої об'ємної та максимальної температур металу вигородки при врахування геометрією наявності ребер охолодження.

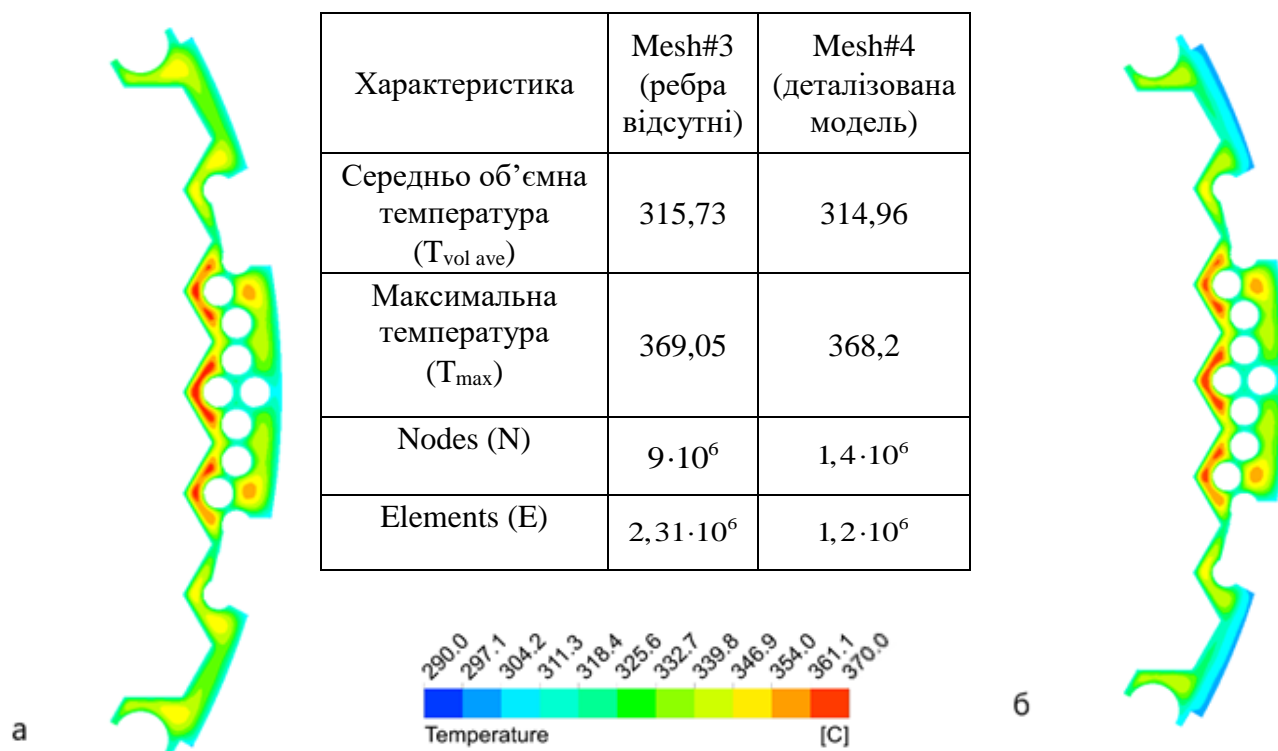


Рис. 1.12 – Співставлення результуючих полів температури в найбільш навантаженому перерізі вигородки при моделюванні спрощеної геометрії вигородки (а) та із врахуванням ребер охолодження (б) [39]

При цьому зроблено висновок, що відмінність полів температур в перерізі має локальний характер. Зважаючи на чутливість моделей об'ємного розпухання до величин середньооб'ємної та максимальної температури в металі, зроблено висновок про доцільність врахування геометричного уточнення кілець вигородки з метою подальшого розрахункового аналізу розпухання. Дані результати відображено в роботі [32].

1.3.2 Аналіз наявних оцінок енерговиділень в металі ВКП

З проведеного в п. 1.3.1 аналізу досвіду визначення температурного поля в металі ВКП видно наявну невизначеність не тільки в підходах, застосовуваних при оцінці поля температур, а й велику відмінність в застосовуваних даних з енерговиділення, оцінка яких передусь вирішенню температурної складової задачі.

Для енергоблоків України в рамках робіт з обґрунтування можливості продовження експлуатації було проведено ряд робіт з оцінки поля радіаційного енерговиділення в металі ВКП. Так, для енергоблоку РАЕС-3 було виконано розрахункове обґрунтування радіаційних енерговиділень [40] та отримано відповідні двовимірні поля енерговиділення в перерізі вигородки.

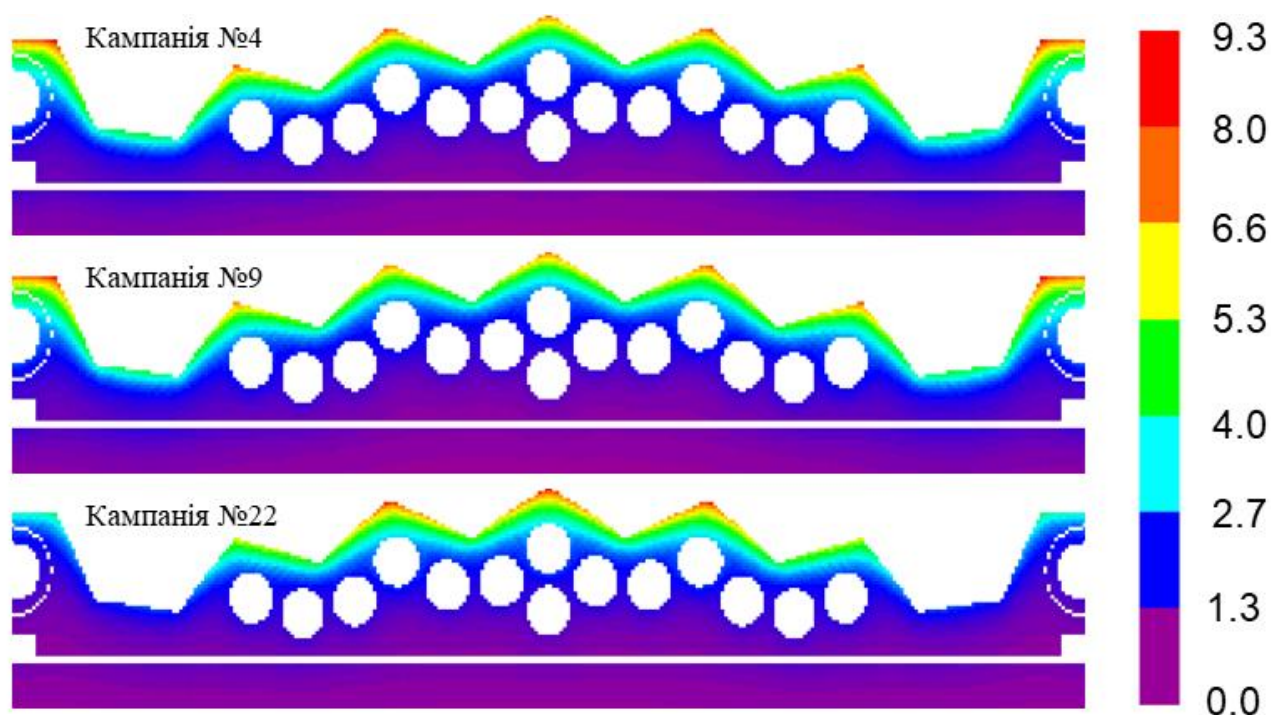


Рис. 1.13 – Двовимірні поля радіаційних енерговиділень (Вт/см^3) в найбільш енергонавантаженому перерізі вигородки [40]

В наведеній оцінці амплітудне значення радіаційного енерговиділення досягає 9.3 Вт/см^3 . Надалі ці результати приймаються в якості літературних та використовуються для ряду енергоблоків України (ЗАЕС-1,2,3,4) [35-38] при проведенні робіт з ПСЕ.

Для енергоблоку ЗАЕС-4 в подальшому було проведено оцінку енерговиділення компанією Westinghouse EC LLC [41]. В даній роботі було застосовано тривимірну модель 60-градусного сектору, яка включала активну зону, вигородку, байпасуючий теплоносій, внутрішньокорпусну шахту, теплоносій в опускній ділянці, метал корпусу реактора та шахту. Загальний вигляд моделі та

отримані поля енерговиділень з амплітудним значенням 8.8 Вт/см^3 в максимально навантаженому перерізі вигородки та на внутрішній поверхні шахти внутрішньокорпусної наведено на Рис. 1.14.

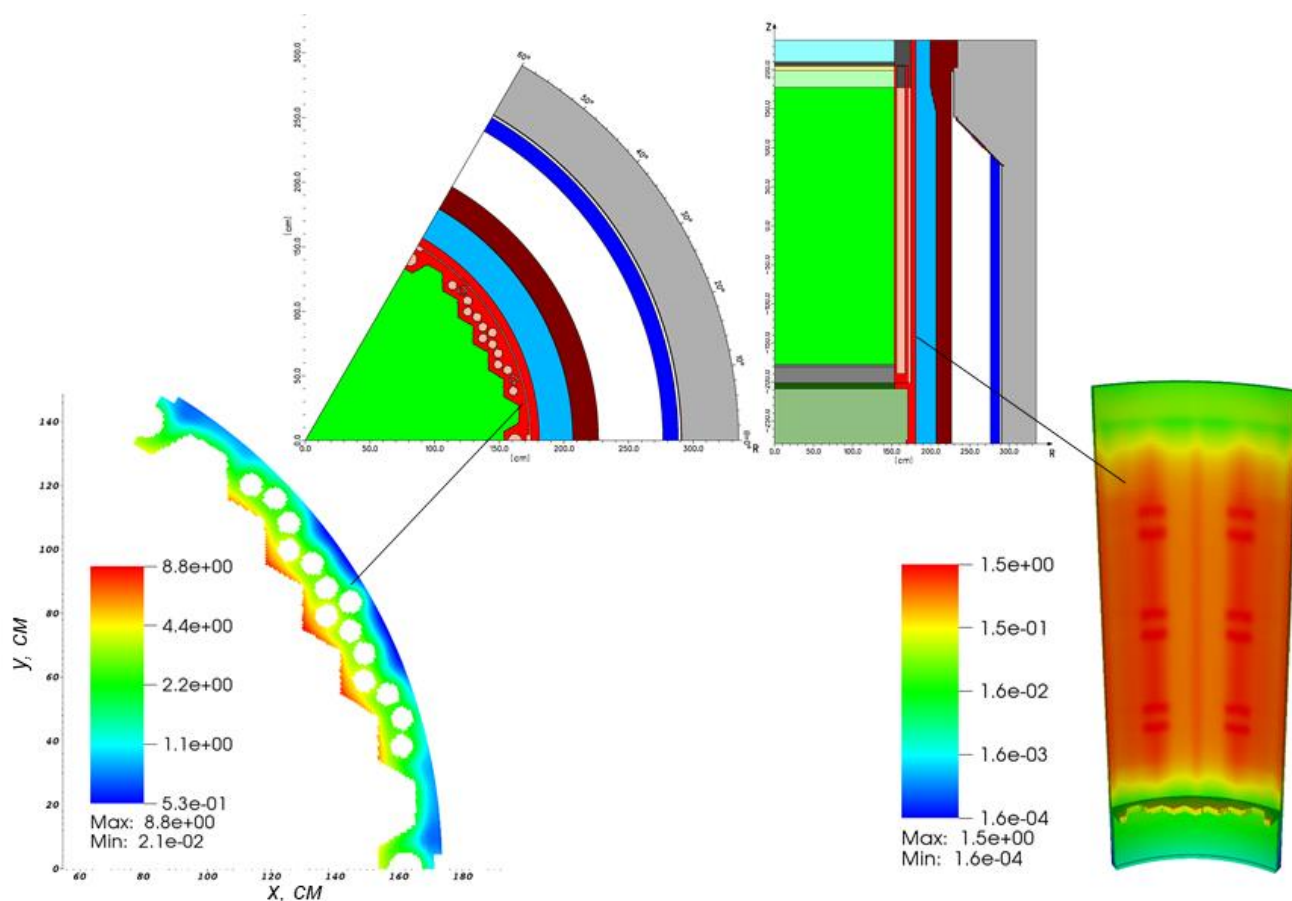


Рис. 1.14 – Загальний вигляд моделі та отримані поля енерговиділення для ВКП енергоблоку ЗАЕС-4 [41]

У 2019 році для уточнення полів енерговиділень на енергоблоці ЗАЕС-1 було проведено розрахунковий аналіз спеціалістами ХФТІ НТК ЯТЦ [42]. В даній роботі також застосовується тривимірна модель активної зони, ВКП та охолоджуючого теплоносія, розроблена за допомогою коду Монте-Карло MCNPX. Загальний вигляд моделі та отримані поля енерговиділення в максимально навантаженому перерізі вигородки з амплітудним значенням 9.48 Вт/см^3 , та на її зовнішній поверхні зображено на Рис. 1.15.

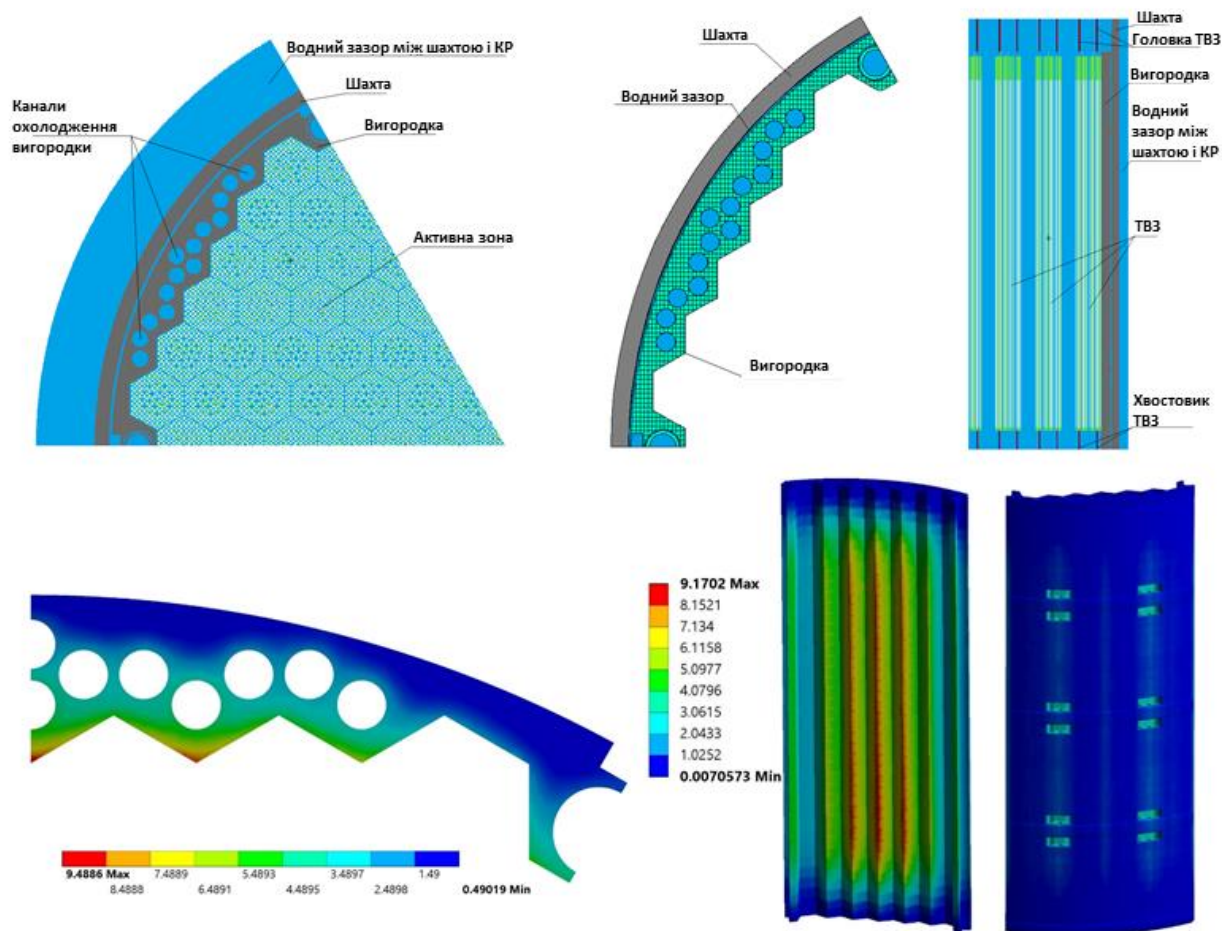


Рис. 1.15 – Загальний вигляд моделі MCNPX та поля енерговиділення в максимально навантаженому перерізі та на зовнішній поверхні вигородки, отримані спеціалістами ХФТІ НТК ЯТЦ [42]

Останньою подібною роботою, проведеною спеціалістами ÚJV Řež [43] для енергоблоку ПАЕС-1 у 2020 році враховано геометричні особливості вигородки – наявність ребер охолодження утворених кільцевими проточками, що видно із зображення перерізу моделі (Рис. 1.16).

Загалом, аналізуючи досвід останніх 5 років в проведенні розрахунків радіаційних енерговиділень, можна дійти висновків, що існує певна невизначеність, яка відображається у відмінностях амплітудних значень. Проте, в порівнянні з першими амплітудними значеннями, наведеними в п. 1.3.1, з роками відмінність в оцінках зменшується.

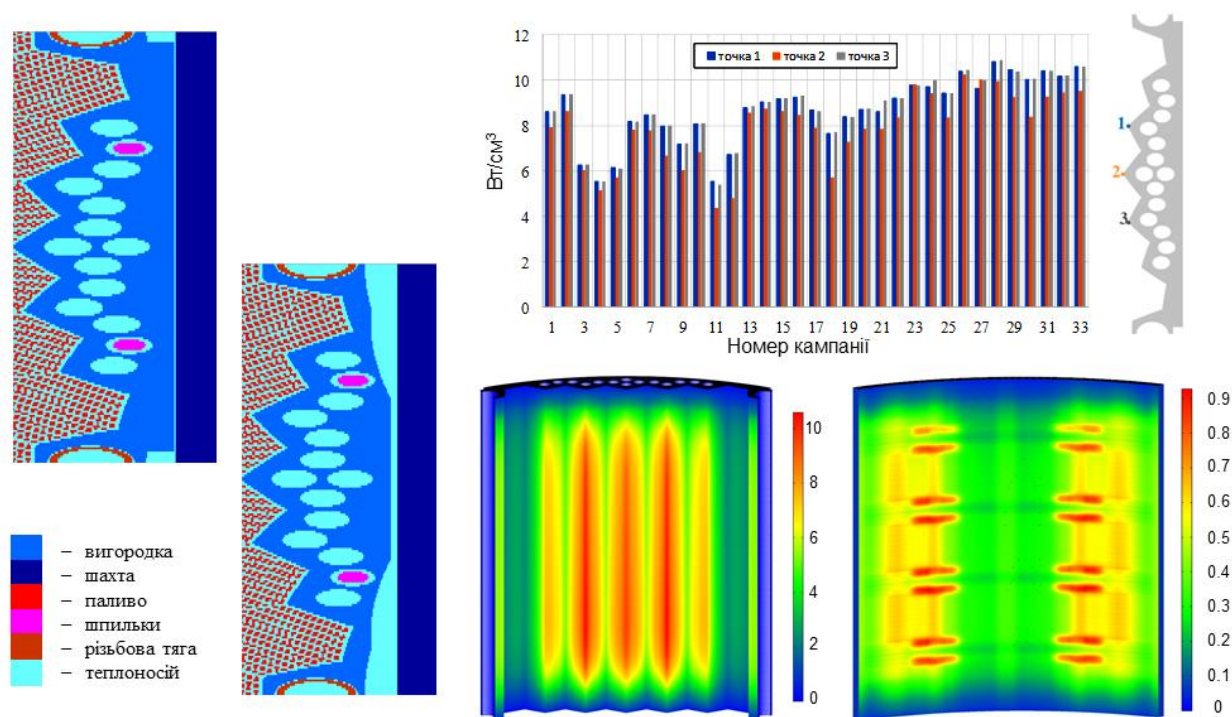


Рис. 1.16 – Перерізи розрахункової моделі на рівні бурта вигородки (в місці з'єднання кілець та вище, на рівні кільцевої проточки) [43]

Згідно наявному досвіду [34] використання даних по енерговиділенням в елементах ВКП, для подальшої оцінки температурного поля, не виключенням є випадки, коли поле радіаційних енерговиділень представлено лише для твердого тіла вигородки внутрішньокорпусної. В таких випадках розроблено та застосовується спеціальна процедура проєктування наявних даних на інші елементи ВКП [34].

Згідно з фізичним допущенням про збереження функції накопичення і ослаблення амплітуди тепловиділення, оцінка енерговиділення в шпильках, фрагменті шахти і різбовій тязі здійснюється наступним чином:

- енерговиділення в об'ємі розглянутих елементів отримується шляхом «проєктування» тепловиділення з граничного об'єму вигородки в напрямку нормальному до поверхні тіл з урахуванням фактору послаблення, викликаного наявністю теплоносія;
- коефіцієнт лінійного ослаблення визначається як зважена величина згідно із спектральним розподілом поля гамма-квантів;

- для шпильок енерговиділення приймаються на кордоні реальної геометрії вигородки близько шпильок з урахуванням лінійного ослаблення.

Спрощену схему застосованої для проектування наявних в твердому тілі вигородки даних на інші елементи ВКП зображено на Рис. 1.17.

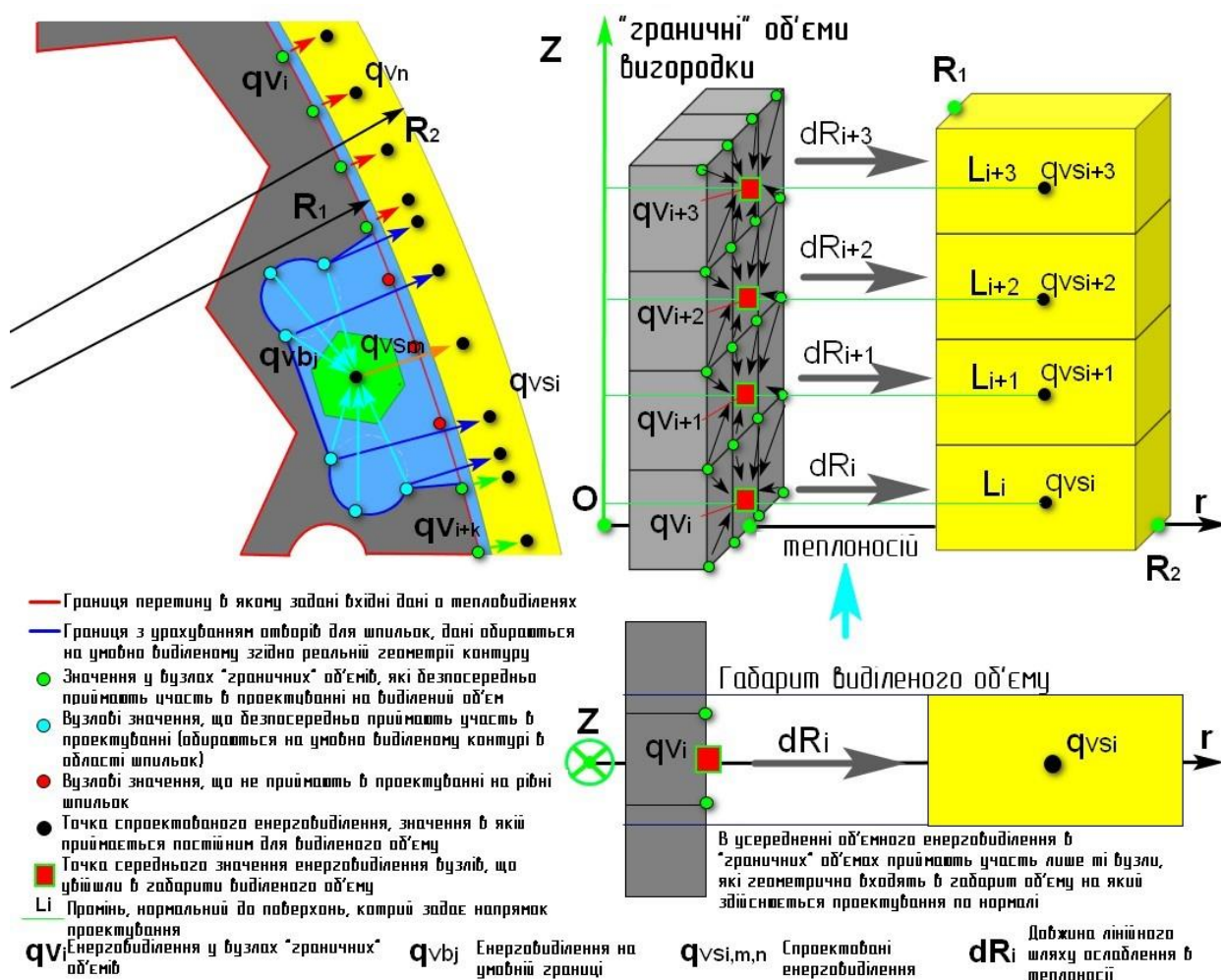


Рис. 1.17 – Спрощена схема оцінки енерговиділення в елементах на основі даних на зовнішній границі вигородки [34]

Використовуючи даний підхід, виконується проектування відомих даних з енерговиділень. Приклад результатів роботи процедури наведено на Рис. 1.18.

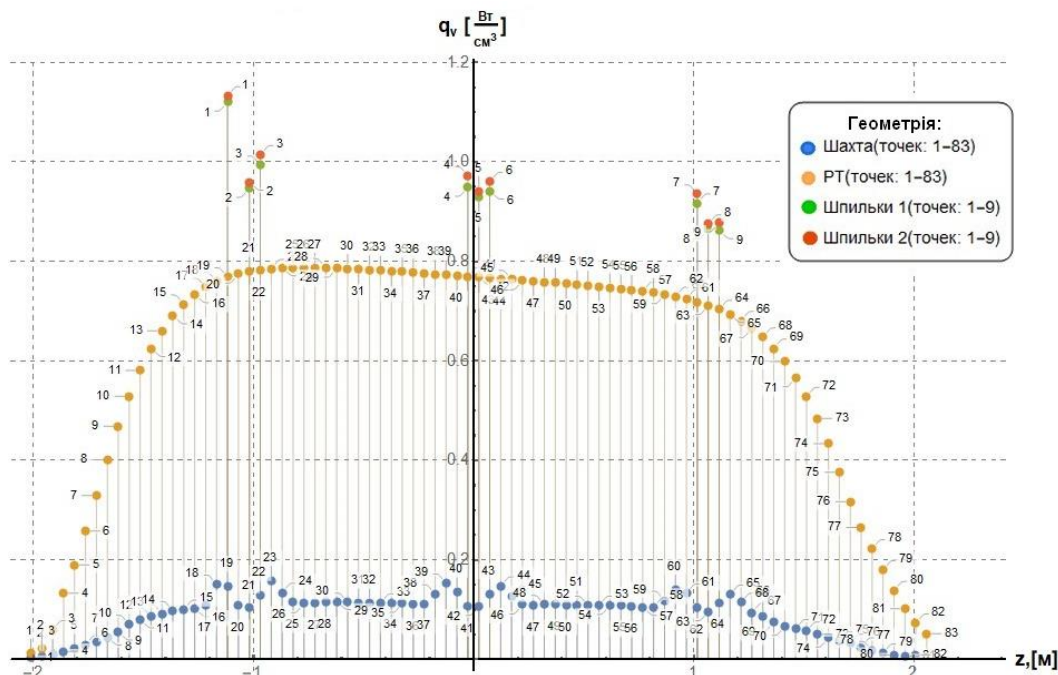


Рис. 1.18 – Результат роботи процедури проєктування даних з енерговиділень на шахту, РТ (різбові тяги) та шпильки.

1.4 Висновки до Розділу 1

В першому розділі проведено огляд наявних досліджень, пов'язаних з тематикою дисертації. Насамперед проаналізовано та показано першопричини виникнення проблеми формозміни внутрішньокорпусних пристроїв у реакторних установках ВВЕР-1000. З'ясовано, що найбільше деградує метал вигородки внутрішньокорпусної. Проаналізовано конструктивні особливості розміщення вигородки в активній зоні реактору та показано, що найбільш імовірними змінами відносно проєктної геометрії являються вичерпання зазору між вигородкою і шахтою, а також поява не передбачених проєктом РУ ВВЕР-1000 радіальних перетоків через розкриття кілець вигородки. Наведено порівняльний аналіз отримуваних прогнозів щодо вичерпання зазору між вигородкою і ШВК для різних енергоблоків України, який показав нагальну необхідність обґрунтування можливості подальшої експлуатації енергоблоків при наявності контакту, так як за проведеними розрахунковими оцінками вичерпання зазору відбувається на 35-40 кампанії, а при застосуванні останніх уточнених даних з радіаційного

енерговиділення – на 21 кампанії. Варто відзначити, що більшість енергоблоків України пройшло межу в 30 років експлуатації, а деякі з них підходять до строку експлуатації 40 років.

Зроблено огляд можливостей та досвіду проведення експериментальних досліджень і вимірювання реальної геометрії вигородки після довготривалої експлуатації. Показано наявні обмеження, пов'язані із можливістю проведення вимірювань тільки в «холодному» стані та зроблено висновок щодо потреби в розробці надійних розрахункових моделей для прогнозування зміни геометрії вигородки з урахуванням миттєвих параметрів радіаційних енерговиділень та температурного стану, які б дозволили прогнозувати зміну зазорів не тільки між вигородкою та ТВЗ, а й між вигородкою і ШВК та моделювати процес розкриття кілець вигородки.

Проведено детальний аналіз досвіду моделювання температурного поля та радіаційних енерговиділень в елементах ВКП для подальшого аналізу деградації геометрії. З'ясовано, що наявний досвід охоплює використання послідовного підходу оцінки енерговиділень, визначення температурного поля в металі вигородки і подальшого міцнісного аналізу формозміни. При чому, вказано на наявні невизначеності в оцінці температурного поля, що на момент виконання даної роботи насамперед викликані відмінностями в оцінках енерговиділень. У зв'язку з чим проаналізовано та наведено всі наявні дані з радіаційних енерговиділень в елементах ВКП, які застосовувалися для енергоблоків України. З даного аналізу видно тенденцію до геометричного уточнення моделей, проте дані уточнення стосуються лише врахування особливостей проєктної геометрії, та у випадку аналізу процесів деградації потребують її врахування.

За результатами представленого аналізу зроблено висновок щодо відсутності досліджень впливу наявності контакту між вигородкою та шахтою внутрішньокорпусними і розкриття кілець вигородки на зміну умов охолодження елементів ВКП і на подальшу динаміку формозміни, що є визначальним фактором при переоцінці можливості продовження строку експлуатації енергоблоків України, а, отже, потребує дослідження.

2. АНАЛІЗ ЗМІНИ УМОВ ОХОЛОДЖЕННЯ ВИГОРОДКИ ПРИ НАЯВНОСТІ КОНТАКТУ ІЗ ШВК І ПОЯВІ РАДІАЛЬНИХ ПЕРЕТОКІВ

Згідно з попередніми комплексними оцінками стану вигородки в надпроектний термін експлуатації не виключається можливість її часткового контакту з шахтою. Наявність зміни прохідного перерізу кільцевого зазору, а також охолоджуючого каналу не передбачена проектом і, отже, вимагає додаткового аналізу і обґрунтування. Деградація геометрії вигородки призводить до того, що змінюється витрата, в першу чергу, через кільцевий канал, а також утворюються радіальні перетоки теплоносія з АкЗ в охолоджуючі елементи вигородки.

Витрата через кільцевий канал між вигородкою і шахтою для режиму нормальної експлуатації оцінюється в 44-50 кг/с [38]. При гіпотетичному перекритті нижнього та верхнього буртів вигородки зміна витрати через активну зону не перевищить $\sim 0,3\%$, що можна порівняти з турбулентними флуктуаціями. Інтенсивність перетоків залежить від геометричних характеристик між кільцевого розкриття і є фактичним параметром, що визначає вплив на РУ.

В даному розділі пропонується двоетапний аналіз. На першому етапі проводиться оцінка локального стану охолодження вигородки і появи радіального витоку теплоносія з АкЗ. Послідовно розглядаються варіанти гіпотетичних контактів вигородки та ШВК, починаючи з найбільш консервативного варіанта (нереалізованого) і закінчуючи реалістичною конфігурацією. Для обґрунтування теплогідравлічної надійності застосовані методи обчислювальної гідродинаміки для універсальної (в контексті граничних умов) розрахункової моделі вигородки з п'ятьма кільцями. Для кожного з розглянутих варіантів контакту проводиться оцінка розпухання вигородки.

На другому етапі, на основі попередньої оцінки розкриття кілець вигородки, оцінюється інтенсивність радіального перетоку із АкЗ, а також зміна температурного поля вигородки, що дозволить отримати розуміння відносно консервативності впливу радіального байпасу.

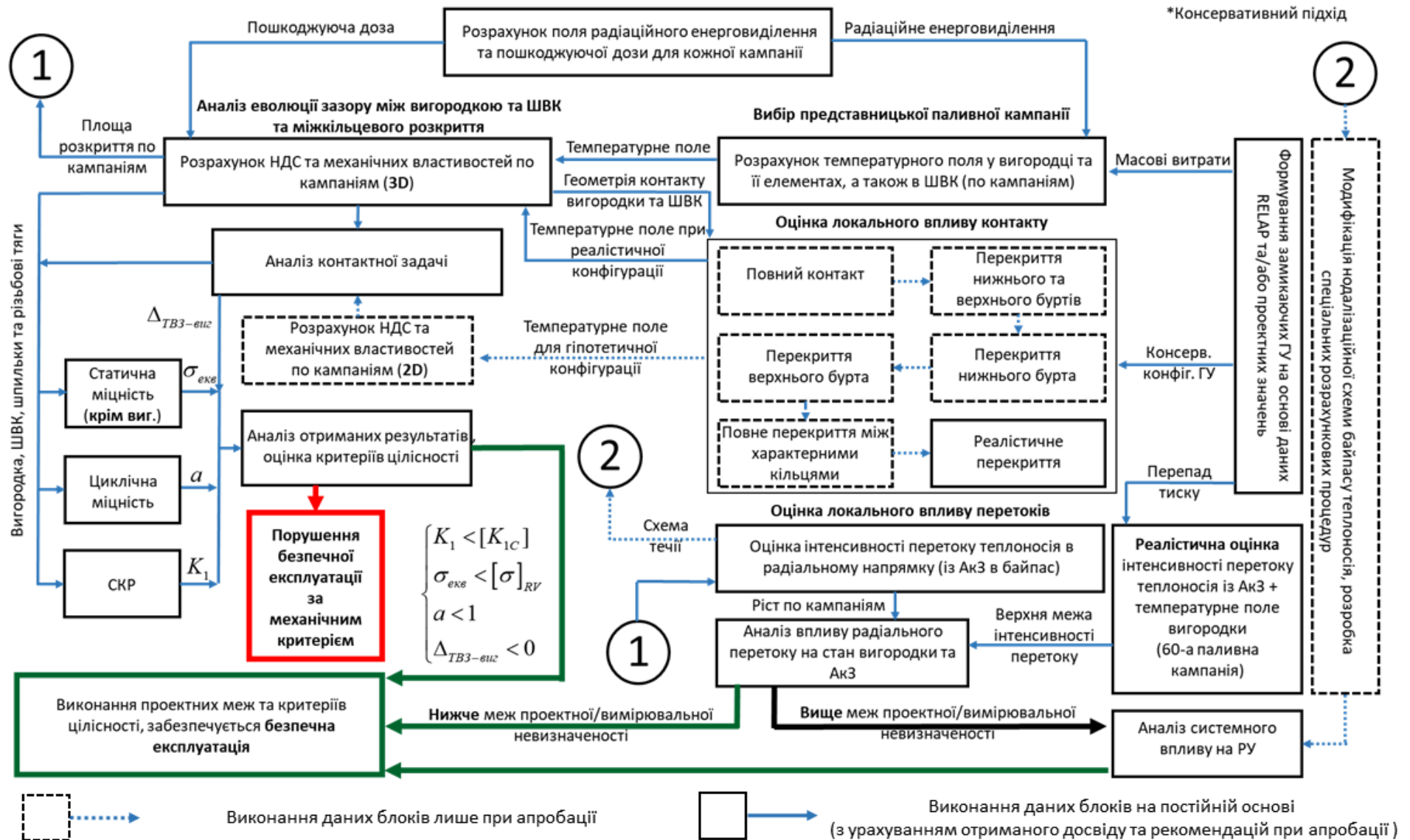


Рис. 2.1 – Схематичне представлення запропонованого підходу до оцінки впливу наявності контакту вигордки із ШВК та появи радіальних перетоків на умови охолодження ВКП

Варто зазначити, що радіальні перетоки, тобто зміна конфігурації охолодження активної зони є непроєктним ефектом розпухання вигородки і, в загальному, є мультифізичною проблемою, досвід розв'язання якої на енергоблоках з реакторами ВВЕР-1000 відсутній не лише на вітчизняних АЕС. В даному розділі наведені результати, які можуть інтерпретуватися як відправна точка, яка дає можливість оцінити ступінь впливу як на АкЗ так і на стан вигородки, а також зрозуміти, що є консервативним станом для даної проблеми.

Так як дана дисертаційна робота є логічним продовженням магістерської роботи автора, розроблені та застосовані в рамках даної роботи розрахункові моделі є вдосконаленням запропонованих раніше [34] підходів. А саме, розроблено розрахункову модель з однозначними ГУ для всіх конфігурацій, яка є геометрично уточненою. Для обґрунтування впливу наявності контакту з ШВК або радіального перетоку оцінюється номінальний стан РУ.

Наведені нижче результати розрахунків були отримані за допомогою програмного засобу ANSYS CFX 18.

2.1 Оцінка локального стану охолодження вигородки при виникненні її контакту з ШВК

2.1.1 Створення розрахункової моделі для оцінки локального стану охолодження вигородки та її елементів

Існують три різні підходи при моделюванні теплогідравлічних процесів засобами CFD, які базуються на рівні просторової дискретизації (глибині і ширині).

Перший з них заснований на детальному моделюванні системи обладнання (ширині задачі), з урахуванням детальної геометрії кожної одиниці [46] (глибині задачі). На теперішній час така постановка практично не реалізована через високу вимогливість до обчислювальних ресурсів.

Другий підхід заснований на моделюванні процесів на максимально наближеній до реальності геометрії, в першу чергу, за рахунок деталізації в глибину (до найдрібніших конструкційних елементів). Системний вплив інших

цілісних об'єктів (деталізація в ширину) замінюються еквівалентним впливом, заданим відповідними граничними умовами [38]. Такі граничні умови формуються виходячи з оцінок, отриманих у системних кодах типу RELAP. Даний підхід є дуже витратним з точки зору обчислювальних ресурсів і реалізується лише в особливих випадках. Просторова дискретизація задачі має порядок 10^9 контрольних об'ємів.

У третьому підході задача спрощується як в ширину, так і в глибину, при цьому граничні умови формуються вже не тільки з урахуванням системного впливу на одиницю обладнання, але і на характерні конструкційні елементи в рамках геометрії об'єкта. Такий підхід широко застосовується в задачах визначення теплогідравлічних характеристик елементів обладнання, а також їх систем, спрощуючи постановку виходячи з вимоги до деталізації і точності визначення характеристик протікаючих фізичних процесів [47], [48].

Фактично, для оцінки температурного стану ШВК, вигородки та її елементів, застосовується синтез третього та другого підходів. Так вигородка та ШВК, як елементи реактора, разом із байпасом моделюються окремо від реактора, але геометрично точно (другий підхід), проте, активна зона моделюється спрощено (третій підхід).

Таким чином, виникає необхідність формувати відповідні замикаючі граничні умови. В загальному, від «якості» замикаючих ГУ залежить і коректність результатів, що отримані при моделюванні. В загальному випадку, класичними ГУ в подібного роду розрахунках є температури та масова витрата на вході, а також тиск на виході. Така комбінація є досить стабільна (в розрахунковому сенсі), оскільки при розрахунку полів швидкості, тиску та температури є опорна прив'язка для кожного із типів теплогідравлічних параметрів. Практика подібного аналізу базується на формуванні замикаючих ГУ на основі даних RELAP5, а саме перепаду тиску по висоті вигородки.

Наведена нижче розрахункова модель вигородки використовує граничні умови типу «тиск-тиск» на вході та виході, що при коректній імплементації функцій еквівалентного гідравлічного опору та відтворенні геометрії профілювання дозволяє для стаціонарного стану позбутися необхідності

попередньої оцінки масових ГУ. Таким чином, дана модель не потребує використання заміщуючих масових ГУ, а використовує стаціонарний перепад тиску. Фактично це дозволяє більш детально розраховувати перерозподіл масових витрат з урахуванням геометричних особливостей. Слід зазначити, що локальні особливості практично не впливають на максимальне значення температури (із-за специфіки розташування, а також аксіального рівня), але впливають на середньооб'ємну величину. Модель доповнюється гранованим поясом з профільюючими елементами, що дозволяє детально враховувати локальні особливості охолодження.

Необхідність застосування CFD аналізу для визначення температурного поля вигородки обумовлюється потребою врахування таких особливостей:

- розподілу температури і коефіцієнта тепловіддачі поза активною зоною для врахування впливу енерговиділення в вигородці на підігрів байпаса теплоносія;
- визначення температурного поля в з'єднувальних шпильках кілець вигородки;
- врахування впливу розподілу поля енерговиділення на положення максимально нагрітого перерізу вигородки.

Наявність теплопровідності в металі вигородки в аксіальному напрямку, а також аксіального профілю розподілу енерговиділення в вигородці призводить до зменшення максимальної температури через врахування моделлю крайових ефектів. Розрахункова модель має двоплощинну періодичність, площини якої утворюють двохграний кут 60 градусів. В аксіальному напрямку модель обмежена висотою вигородки та гранованого поясу. При побудові розрахункової моделі були прийняті деякі геометричні спрощення (Табл. 2.1), врахування яких практично не позначається на результатах моделювання та фізичні припущення (Табл. 2.2), які практично не можливо врахувати через відсутність екстенсивних та інтенсивних характеристик процесу (наприклад, врахування реального термічного опору між кільцями вигородки).

Табл. 2.1 – Основні геометричні спрощення

Назва елемента моделі (процес)	Опис
Активна зона	Представляється у вигляді пористого тіла (коефіцієнт об'ємної пористості ε_f дорівнює 1, при цьому коефіцієнт втрати тиску - K_{loss} (PLF) імплементований аналітично), з перерізу якого вираховані шестигранні області, що відповідають за площею металу ТВЗ. Такий підхід спрощує постановку, оскільки фактичне налаштування моделі здійснюється лише одним параметром - додатковим дисипативним моментом, дані про який можна отримати або з нодальних кодів, або за допомогою додаткової (в тому числі аналітичної) оцінки. Наявність спрощеної геометрії активної зони дозволяє враховувати нерівномірність поля енерговиділення в радіальному напрямку, що впливає на температуру вигородки.
Радіальний байпас теплоносія	В розрахунковій CFD моделі не враховується реальна конфігурація міжкільцевого розкриття. Геометрично розкриття реалізовано у вигляді рівномірної щілини між кільцями вигородки еквівалентною висотою 4 мм.
Вигородка	У розрахунковій моделі вигородка набрана з окремих кілець, геометрія яких максимально наближена до реальної. Згідно з проведеними раніше тестовими розрахунками (результати наведені в п. 1.3), видно невелике зниження середньооб'ємної і максимальної температур металу вигородки внаслідок врахування охолоджуючих ребер, виходячи з чого в наступних розрахунках враховується їх наявність. Не враховується можлива часткова транспортна приварка пари кілець, що є консервативним з точки зору радіального розкриття (Рис. 2.2).
Загальні спрощення: Загальні спрощення, які застосовані до всіх елементів моделі – це вилучення різних дрібних геометричних особливостей, які не впливають на картину течії, але збільшують просторову дискретизацію через малі характерні розміри відносно загального габариту даного об'єкту (наприклад, в гайках і шпильках відсутні скруглення, різьблення)	

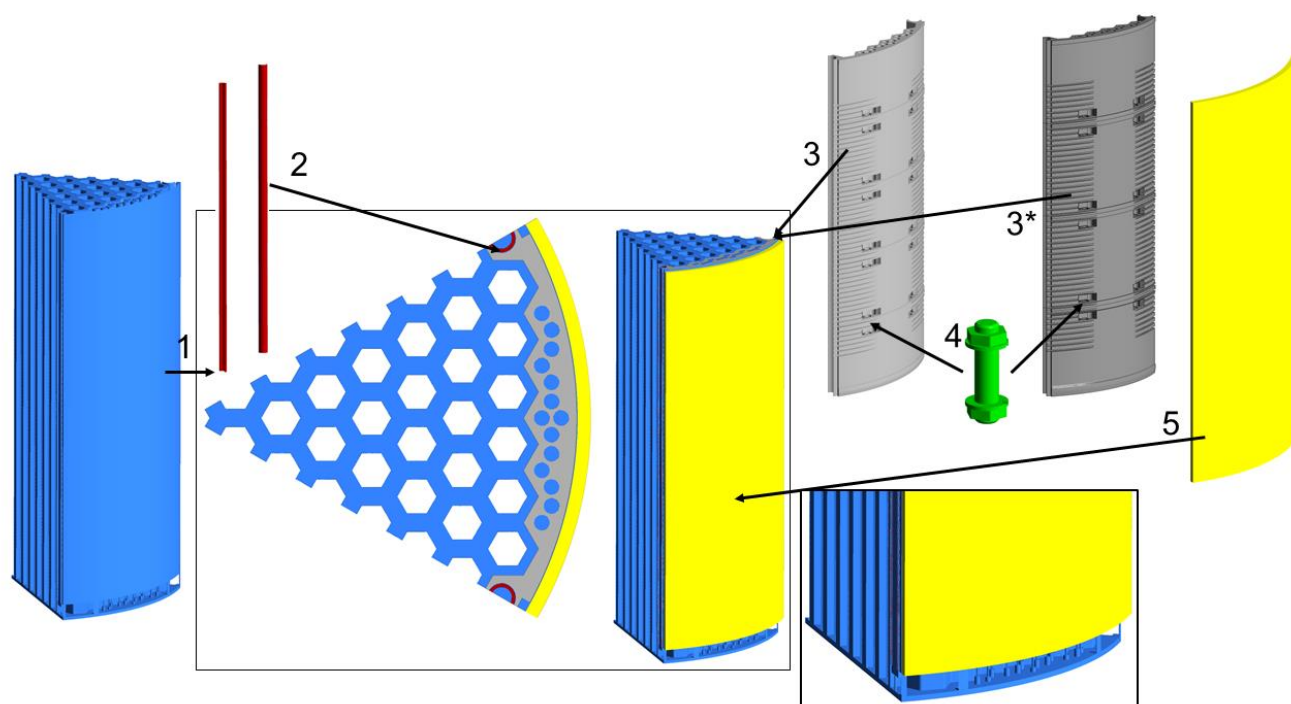
Табл. 2.2 – Основні фізичні допущення

Допущення	Елементи моделі
Термічний опір: Не враховується термічний опір в контактах сталевих елементів вигородки.	Вигородка, шпильки, гайки.
Зрив потоку, реальна вихрова структура на всіх границях розрахункової моделі: Зрив потоку виключається шляхом перетворення геометрії охолоджуючих каналів, а також виключення уступів. На вхідних границях моделі приймається 5% ступінь турбулентності потоку, а на вихідних – враховується можливість зворотного потоку.	Охолоджуючі канали
Енерговиділення в активній зоні: Імплементується як об'ємне джерело теплової енергії, яке формується як синтез аксіального та радіального профілю. Радіальний профіль формується на основі відповідних картограм паливного завантаження.	Пористе тіло активної зони
Теплофізичні властивості: Не враховуються будь-які зміни теплофізичних властивостей сталі ВКП реактора при деградації під впливом випромінювання.	Вигородка, шахта, шпильки
Теплоносій вважається однофазним, не враховується наявність газової фази, яка може виникнути при радіолізі води, а також парової фази (до 0,5 - 1,1%) при наявності гіпотетичних аномальних теплогідравлічних процесів [49].	Охолоджуючі канали, активна зона
Врахування реальної площі розкриття відбувається за допомогою еквівалентного моменту опору, який імплементується у відповідну просторову частину моделі. Якщо розрахункова площа розкриття є більшою ніж у випадку закладеної у розрахункову модель, то коригуючий втрату тиску в радіальному напрямку момент стає від'ємним, що є аналогом напірного руху. Якщо оцінене розкриття є меншим ніж те, що закладено в моделі, то додатковий момент є додатною величиною, що може трактуватися як додатковий гідравлічний опір. Більш детально див. нижче.	Радіальний переток теплоносія.
Відкидається енерговиділення в охолоджуючих каналах за рахунок уповільнення швидких нейтронів, а також ослаблення потоку гамма-квантів через передбачувано малий вклад в порівнянні з підігрівом з боку поверхні вигородки.	



Рис. 2.2 – Транспортна приварка кілець вигородки

На основі описаного досвіду та застосованих геометричних спрощень і фізичних допущень розроблено розрахункові моделі для чотирьох та п'яти кільцевої вигородки, загальний вигляд яких наведено на Рис. 2.3.



1 – теплоносій (активна зона, охолоджуючі канали)

2 – різьбові тяги

4 – шпильки

3, 3* – вигородка (п'яти і чотирьох кільцева)

5 – фрагмент шахти реактора

6 – профілюючі канали в гранованому поясі (лише для моделі стаціонарного стану)

Рис. 2.3 – Загальний вигляд розрахункової моделі

Граничні умови для розрахункової моделі сформульовані у формі Діріхле (силові та масові ГУ) і Неймана (теплові ГУ). Найменування граничних умов для зовнішніх поверхонь п'яти кільцевої моделі наведено на Рис. 2.4. Граничні умови у чотирьох кільцевій моделі конфігуровано аналогічним чином.

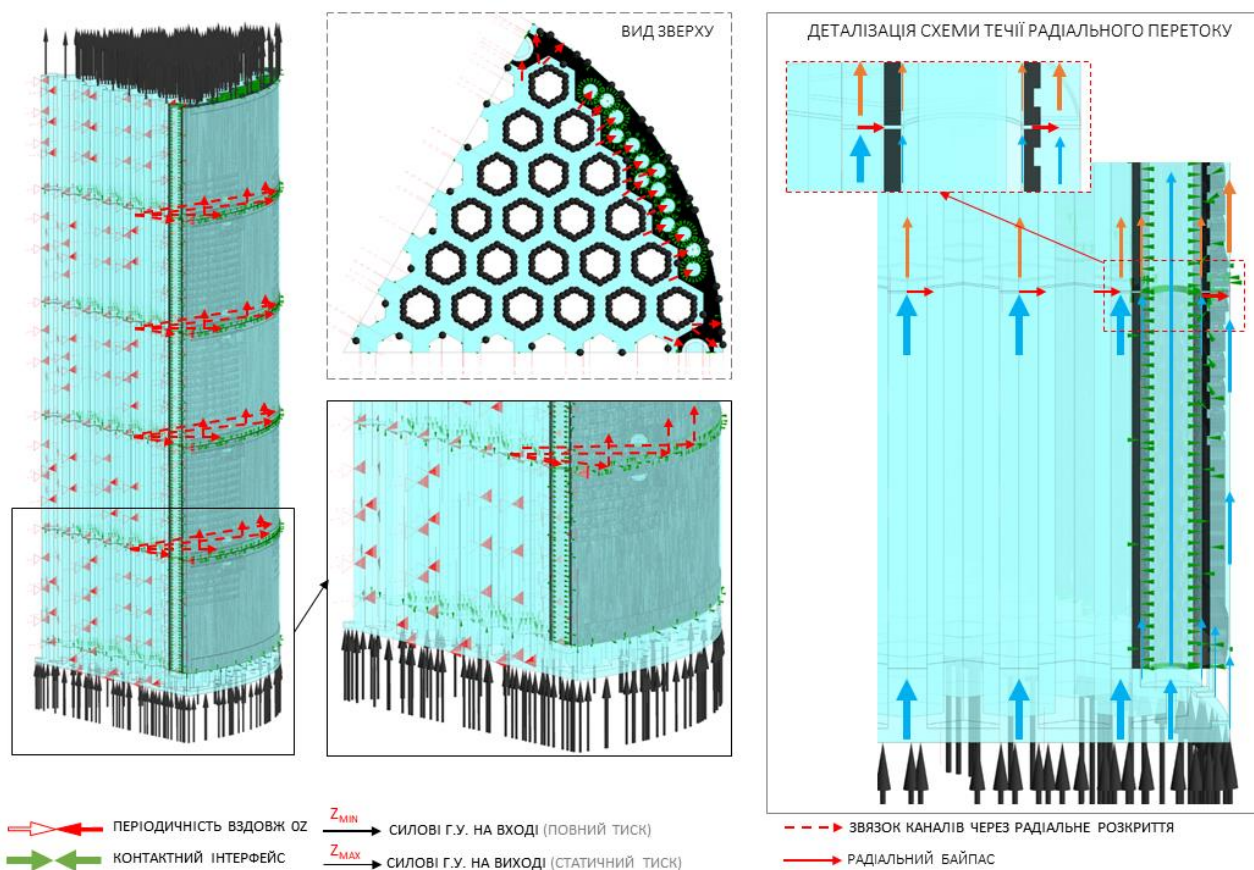


Рис. 2.4 – Граничні умови CFD моделі ШВК, п'яти кільцевої вигородки та її елементів

У випадку відсутності радіального байпасу відповідні інтерфейси відсутні, а граничні умови зберігаються.

Специфіка тривимірного розрахунку спрощеної моделі активної зони полягає у наступному. Модель пористого тіла, яка є поширеною у світовій практиці при моделюванні процесів в активній зоні, в першу чергу, для отримання аксіального, радіального і азимутального розподілу інтегральних характеристик: тиску і температури для однофазного середовища, може бути описана системою рівнянь (2.1), яка є повною гідродинамічною постановкою.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f)}{dt} + \text{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{U}) = 0 \\ \frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f U_{x,y,z})}{dt} + \text{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{U} U_{x,y,z}) = -\varepsilon_f [\text{grad}(p)]_{x,y,z} + \text{div}(\sigma[\mu, \mu_{\text{эф}}]) - K_{x,y,z}^{\text{loss}} \rho_f |\vec{U}| \cdot U_{x,y,z} + \varepsilon_f \rho_f g_{x,y,z} \\ c_p^f \left(\frac{\partial(\varepsilon_f \rho_f T_f)}{dt} + \text{div}(\varepsilon_f \rho_f \vec{U} T_f) \right) = \text{div} \left[\left(\lambda_f + \frac{\mu_{\text{эф}} c_p^f}{\text{Pr}_t} \right) \text{grad}(T_f) \right] + q_v(x, y, z) - K_{x,y,z}^{\text{loss}} \rho_f |\vec{U}|^2 \cdot U_{x,y,z} + \\ + \varepsilon_f \rho_f g_{x,y,z} U_{x,y,z} - \varepsilon_f [\text{grad}(p U_{x,y,z})] \\ \rho_f = f(p, T_f) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Наведена система рівнянь є загальним підходом до опису пористості однофазного середовища. $\sigma[\mu, \mu_{\text{эф}}]$ - є нічим іншим як тензором напружень, компоненти якого, згідно реологічному закону Ньютона, зв'язуються з тензором швидкостей деформації. Після цього, в залежності від підходу і додаткової реологічної аналогії (гіпотези), виключають всі члени напружень. Наприклад, в разі RANS тензор напружень Рейнольдса, отриманий після лінеаризації за часом, пов'язується з пульсаційними швидкостями потоку на основі гіпотези Буссінеска. У цьому випадку з'являється параметр $\mu_{\text{эф}}$, який необхідно визначати замикаючими модельними або емпіричними співвідношеннями. Теж саме стосується і рівняння Фур'є-Кірхгофа в яке вводиться член, який характеризує збільшення теплопровідності за рахунок турбулентності потоку. У припущенні суперпозиції процесів, а також теплової аналогії Рейнольдса загальна теплопровідність визначається як $\left(\lambda_f + \frac{\mu_{\text{эф}} c_p^f}{\text{Pr}_t} \right)$, де турбулентне значення числа Прандтля в більшості випадків приймається рівним 0,9, або замикається додатковим співвідношенням, наприклад за допомогою ренормгрупового підходу (RNG). Особливо останнє характерно для нелінійних задач теплообміну (наприклад, СКТ). У разі, якщо можливо виділити з експериментів $\lambda_{\text{эф}} = \frac{\mu_{\text{эф}} c_p^f}{\text{Pr}_t}$, то рівняння енергії Фур'є-Кірхгофа доповнюється додатковими співвідношеннями, які враховують взаємний напрямок $\text{grad}(T_f)$ і \vec{U} .

Визначальні характеристики, які необхідні для моделі пористого тіла активної зони ($q_v(x, y, z)$ та $K_{x,y,z}^{loss}$) формуються наступним чином. Функція гідравлічного опору $K_{x,y,z}^{loss}$ формується у вигляді залежності від аксіальної координати, та враховує локальну зміну за рахунок наявності дистанціонуючих решіток. Загальний вигляд залежності, яка вбудована в розрахункову модель наведено в (2.2). Відповідний аксіальний розподіл показаний на Рис. 2.5.

$$K_{x,y,z}^{loss}(z) = \frac{\omega_{in}(z)}{\Delta H_{in}} C_{in} \text{Re}^{\alpha_{in}} + \frac{\omega_{fr}(z)}{d_h} C_{fr} \text{Re}^{\alpha_{fr}} + \frac{\omega_g(z)}{\Delta H_g} C_g \text{Re}^{\alpha_g} + \frac{\omega_{out}(z)}{\Delta H_{out}} C_{out} \text{Re}^{\alpha_{out}} \quad (2.2)$$

$\omega(z)$ - функція «дії» відповідної складової, яка залежить лише від геометричних характеристик. Характерний розмір – еквівалентний гідравлічний діаметр решітки ТВЕЛ, який прийнятий рівним 10.5 мм.

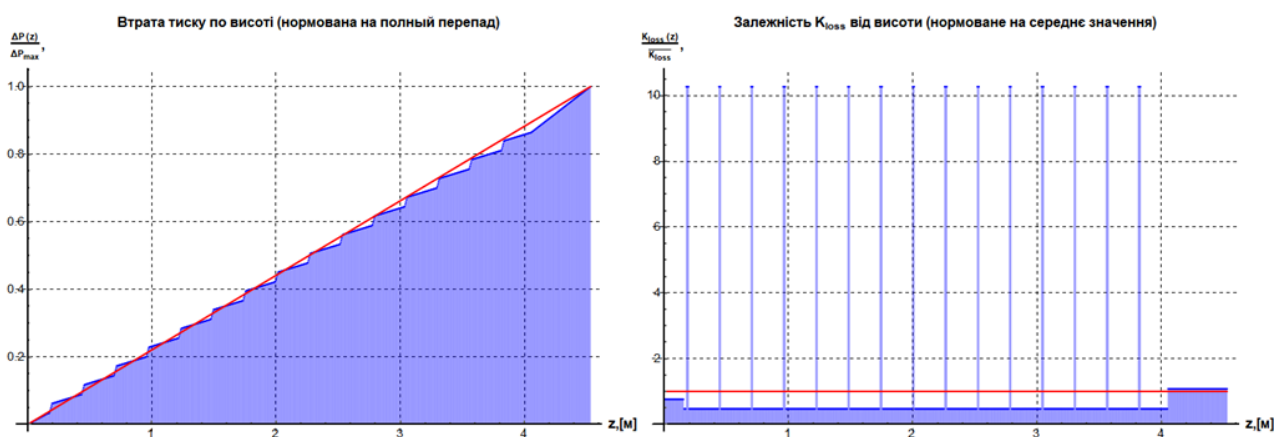


Рис. 2.5 – Функція перепаду тиску по висоті ТВЗ

Прийняті значення коефіцієнтів (2.2) наступні:

- Втрата на вході – $C_{in} = 3.5403; \alpha_{in} = -0.174; \Delta H_{in} = 0.155[\text{м}]$.
- Втрата на виході – $C_{out} = 2.4704; \alpha_{out} = -0.0332; \Delta H_{out} = 0.476[\text{м}]$.
- Втрата на тертя – $C_{fr} = 0.1898; \alpha_{fr} = -0.2; d_g = 0.0105[\text{м}]$.

- Втрата на дистанціонуючих решітках $C_g \text{Re}^{\alpha_g} \approx 0.31; \Delta H_g = 0.02$.

Функція $q_v(x, y, z)$ визначається наступним чином. На основі експлуатаційної картограми паливного завантаження (Рис. 3.5) (для відносного енерговиділення в кожній ТВЗ) та прийнятого аксіального профілю (Рис. 3.6). формується просторовий розподіл енерговиділення.

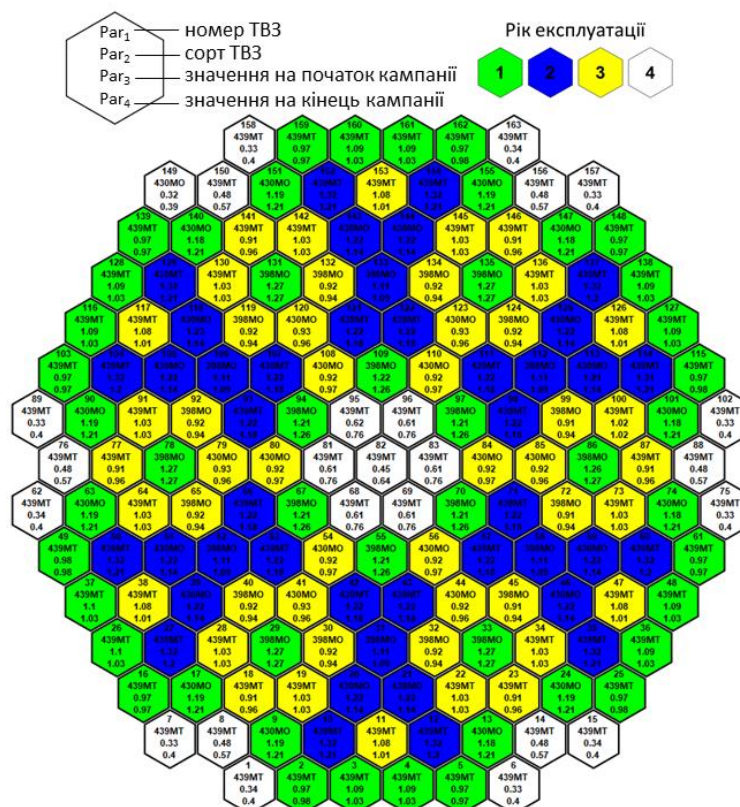


Рис. 2.6 – Картограма паливного завантаження (відносні енерговиділення)

Формування розподілу поля енерговиділення в активній зоні з урахуванням прийнятих фізичних допущень (див. Табл. 2.2) здійснюється шляхом представлення функції енерговиділення у вигляді добутку двох форм-факторів: радіального і аксіального (2.3).

$$q_v(x, y, z) = q_v^{\max} f(z) \Psi(x, y) \quad (2.3)$$

де q_v^{\max} - амплітуда об'ємного енерговиділення, $\Psi(x, y)$ - функція енерговиділення в поперечному перерізі АкЗ, яка формується на основі картограми (Рис. 2.6).

Є декілька варіантів формування $\Psi(x, y)$, які використовують різний шаблон інтерполяції. Для випадку стаціонарного аналізу формується інтерполяційна функція на основі даних у 163 точках, що фактично «розмазує» границю ТВЗ, а отже, і температурного поля (аналог дифузії).

Амплітудне значення енерговиділення визначається як (2.4).

$$q_v^{\max} = \frac{Q_t}{\int_V f(z) \Psi(x, y) dV} \quad (2.4)$$

де Q_t - тепла потужність АкЗ.

Варто відзначити, що в залежності від способу формування $\Psi(x, y)$ амплітудне значення буде також відрізнятися, що відповідає конкретній формі інтерполяційної функції (використовується перший порядок інтерполяції за для уникнення числових артефактів). Фактично це є $\Psi(x, y)$ умовною вагою кожного ТВЗ в енерговиділенні і відповідає відносному енерговиділенню k_k на картограмі.

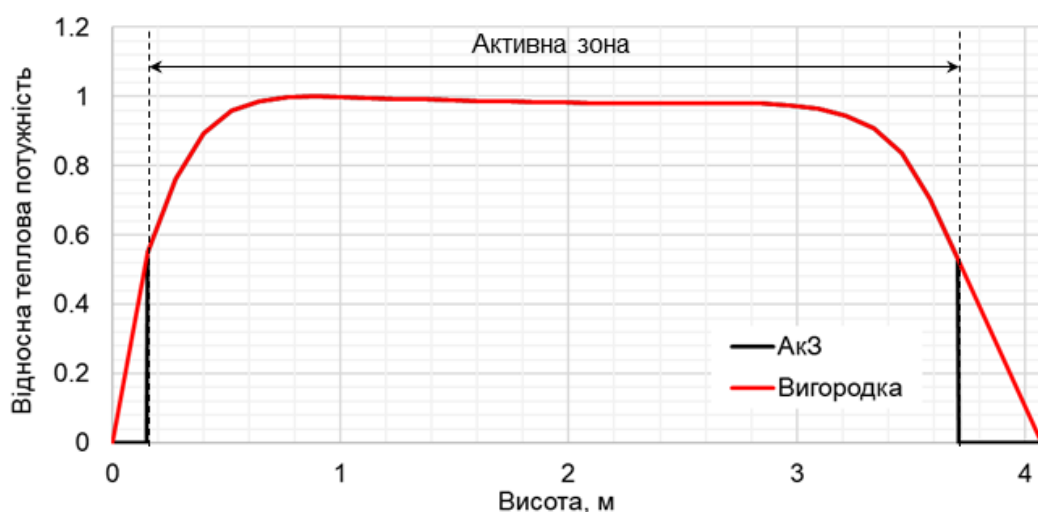


Рис. 2.7 – Аксіальний розподіл енерговиділення прийнятий при розрахунках

У випадку розрахунку температурного поля вигородки з урахуванням радіальних перетоків теплоносія із АкЗ (напрямок руху теплоносія цілком визначений, оскільки втрата тиску в АкЗ є в середньому рівномірною, тоді як при профілюванні байпасу в гранованому поясі втрачається більше 80% всього перепаду). Як було зазначено в Табл. 2.2, в розрахунковій моделі розкриття між кільцями рівномірне і становить 4 мм для всіх стиків. Така конфігурація значно спрощує розрахункову модель, проте оцінка інтенсивності радіального перетоку є значно завищеною, оскільки оціночна площа розкриття, навіть на момент 60-ї паливної кампанії, у найбільш навантаженому контакті кілець є значно меншою. У першому наближенні це враховується шляхом введення спеціального силового фактору, який визначається виходячи із припущення, що основна гідравлічна втрата зосереджена на вхідній границі відповідної щілини. Тобто сумарний коефіцієнт гідравлічного опору (КГО) приблизно рівний КГО раптового звуження, який приймається рівним 0.5. Враховуючи той факт, що на умовному виході із щілини відбувається раптове розширення теплоносія в кільцевому каналі, то сумарний КГО приймається близьким до одиниці ($K_{loss} = 1.0$). Вважається, що визначальною є швидкість теплоносія на вході в щілину. Безпосередньо в область розрахункової сітки, яка відповідає щілині вводиться додатковий момент, який визначається за залежністю (3.6).

Для визначення розподілу коефіцієнта тепловіддачі від вигородки до теплоносія (що є граничною умовою для моделі АкЗ) з боку активної зони на основі узагальнюючої теорії подібності конвективного теплообміну активну зону з точки зору еквівалентності простій системі можна трактувати як кільцевий канал, з урахуванням напрямку теплового потоку із середньою в перерізі швидкістю теплоносія. Схематизація течії біля внутрішньої поверхні стінок показана на Рис. 2.8. Такий підхід до моделювання активної зони було застосовано та описано автором у [38].

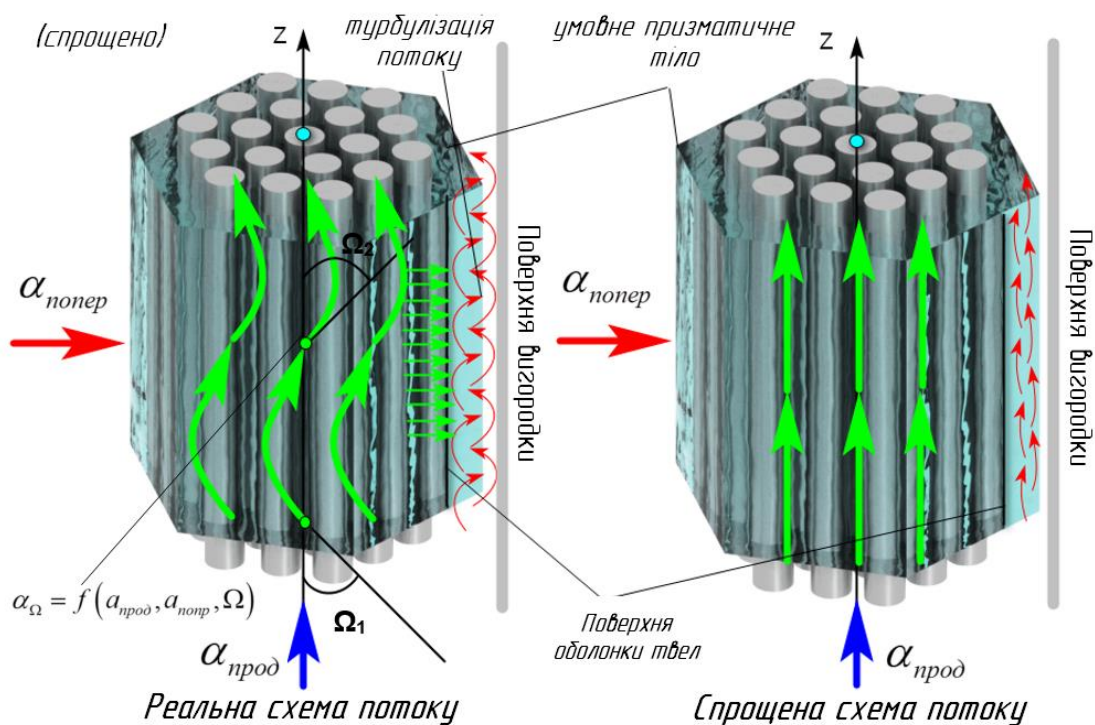


Рис. 2.8 – Принципова схема потоку теплоносія біля поверхні вигорідки з боку активної зони

Для оцінки коефіцієнту тепловіддачі від вигорідки до теплоносія використовується залежність (2.5) [53], яка імплементується як користувацька функція в розрахунковій моделі. Опорні температури – локальні величини.

$$Nu_{KK} = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} \left[1 - \frac{0.45}{Pr + 2.4} \right] \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.6} \quad (2.5)$$

Визначальні геометричні розміри прийняті рівними $d_2 = 3160$ мм; $d_1 = 3152$ мм, характерний розмір в числах подоби – $(d_2 - d_1)$.

Введення додаткового моменту опору в сітковій області обумовлено тим, що складно коригувати втрату тиску, безпосередньо, на границі щілини, оскільки останній залежить від вихрової в'язкості, змінювати значення якого зонально досить непросто.

Основною перевагою (2.6) над модифікацією вихрової в'язкості є те, що вдається досить просто враховувати варіант із збільшеною оціночною площею розкриття f_{gap}^{est} , ніж f_{gap}^{real} .

$$S_{gap} = K_{loss} \left[1 - \left(\frac{f_{gap}^{est}}{f_{gap}^{CFD}} \right)^2 \right] \frac{\rho}{2} |U| U_h \quad (2.6)$$

де f_{gap}^{CFD} та f_{gap}^{est} - визначаються як інтеграли функції висоти зазору вздовж довжини (периметру), який побудований на ребрах внутрішньої поверхні вигородки. У випадку CFD моделі ця величина є сталою і рівною 4 мм.

Всі основні гідродинамічні процеси однофазного середовища пов'язані з дисипацією енергії, а також інтенсивністю теплообміну, визначаються виключно в примежовому шарі. Отже, якість сітки багато в чому залежить від характеристик дискретизації примежового шару. Для каналів, а також поверхонь, на яких можна знехтувати крайовими ефектами, для оцінки дискретизації користуються напівемпіричними залежностями [46]. Докладніше процедуру оцінки густини дискретизації перших шарів сітки біля стінки описано у магістерській дисертації [34]. Орієнтовно прийняті значення y^+ знаходяться в межах від 50 до 100. В розрахунках застосовується SST модель турбулентності.

Оскільки дискретизація вихідних рівнянь для МСО передбачає консерватизм (дотримання законів збереження незалежно від характеристик сітки), це, в першу чергу, призводить до того, що балансові співвідношення між потоками тепла і маси будуть зберігатися. Отже, поза примежовим шаром згущення сітки у перпендикулярному потоку перерізі призводить лише до уточнення розподілу в цьому перерізі, практично не впливаючи на інтенсивність дисипації і теплообміну. Згідно з рекомендаціями документу [47], з урахуванням специфіки Vertex-Based solver для врахування потокових характеристик в обраному напрямку необхідно мати не менше 2-х елементів. Аналогічні вимоги справедливі і для задач

теплопровідності. У разі, коли в тілі, що моделюється, незалежно від агрегатного стану присутні просторово-залежні функції джерел маси або енергії, то забезпечення якості примежевого шару є необхідною, але не достатньою умовою незалежності результатів моделювання від густини дискретизації розрахункової геометрії. У таких випадках найбільш оптимально досліджувати чутливість моделі безпосереднім чисельним розрахунком на варіантних сітках [48]. На Рис. 2.9 показано загальний вигляд побудованих варіантних розрахункових сіток, характеристики яких наведені в Табл. 2.3.

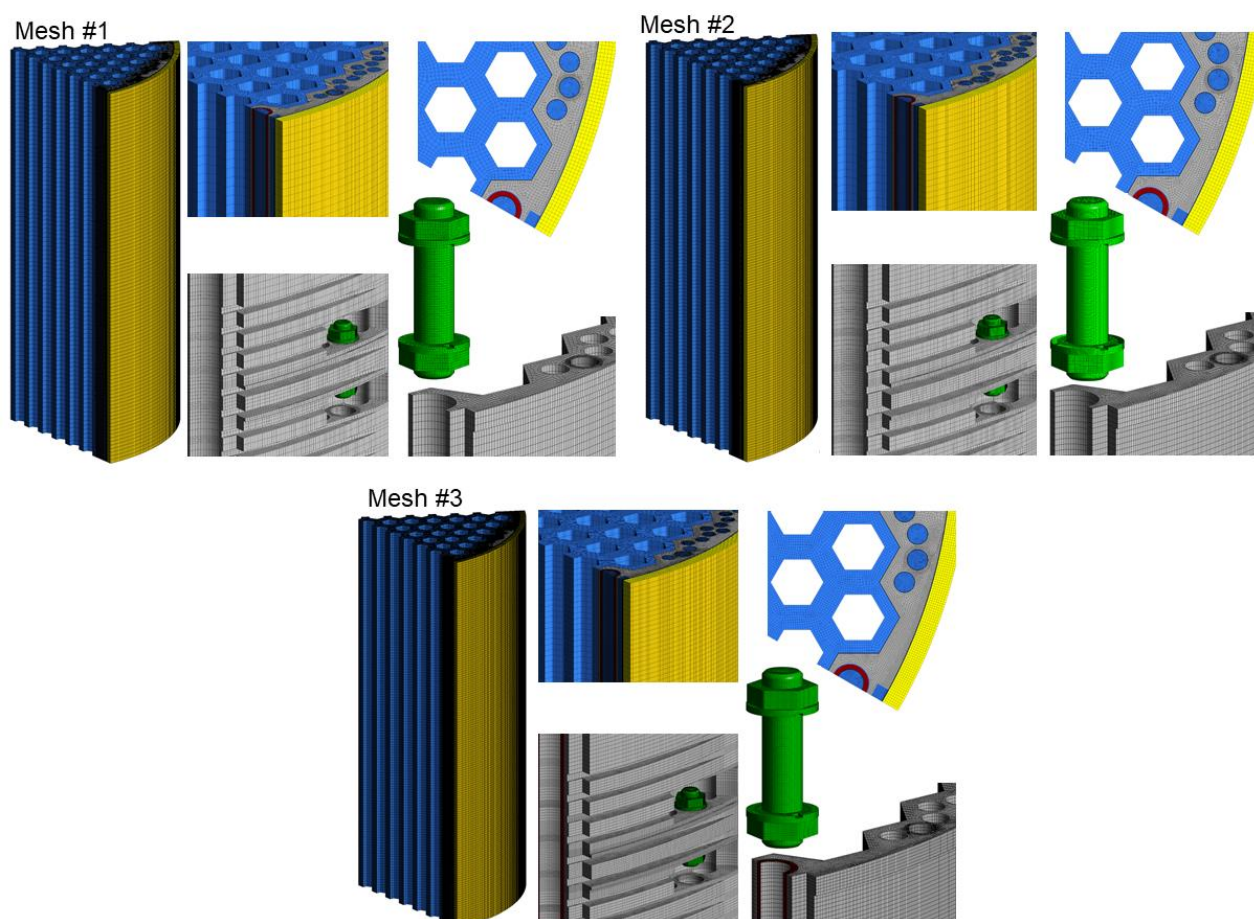


Рис. 2.9 – Загальний вигляд варіантної розрахункової сітки

Виходячи з результатів варіантних розрахунків в якості базової дискретизації обрана розрахункова сітка mesh#2.

Табл. 2.3 – Характеристики варіантної розрахункової сітки

Характеристика	Mesh#1	Mesh#2	Mesh#3
Nodes (N)	$5.11 \cdot 10^6$	$9.51 \cdot 10^6$	$18.2 \cdot 10^6$
Elements (E)	$4.71 \cdot 10^6$	$8.91 \cdot 10^6$	$17.9 \cdot 10^6$
OQ	0.95	0.95	0.95
SW	0,20	0.19	0.18
Вигородка N/E	$1.01 \cdot 10^6 / 8.06 \cdot 10^5$	$2.10 \cdot 10^6 / 1.73 \cdot 10^6$	$4.60 \cdot 10^6 / 3.90 \cdot 10^6$
Шпилька N/E	$2.88 \cdot 10^4 / 2.87 \cdot 10^4$	$7.51 \cdot 10^4 / 7.55 \cdot 10^4$	$7.51 \cdot 10^4 / 7.55 \cdot 10^4$
Шахта N/E	$8.96 \cdot 10^4 / 7.34 \cdot 10^4$	$1.59 \cdot 10^5 / 1.34 \cdot 10^5$	$3.35 \cdot 10^5 / 2.95 \cdot 10^5$
Різьб. тяга (PT) N/E	$4.91 \cdot 10^4 / 3.57 \cdot 10^4$	$8.99 \cdot 10^4 / 6.98 \cdot 10^4$	$1.77 \cdot 10^5 / 1.44 \cdot 10^5$

Теплофізичні властивості матеріалів ВКП представлено у Табл. 2.4, властивості води розраховувалися з використанням бібліотеки IAPWS IF-97. Реперні значення, які порівнювалися з результатами розрахунків на різних сітках, обрані для елементів, в яких необхідно визначити температурне поле. В якості такої характеристики обрано максимальну і середньооб'ємну температури вигородки, шпильок, шахти і різьбової тяги. Результати співставлення отриманих результатів представлено на Рис. 2.10.

Табл. 2.4 – Теплофізичні властивості матеріалів ВКП згідно [50]

Температура, °C	150	200	250	300	350
Теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$	505.5	516	526.5	537	547.5
Теплопровідність, $\frac{Вт}{м \cdot K}$	17.6	18	18.4	18.7	19.1
Густина, $\frac{кг}{м^3}$	7842	7821	7800	7778	-

2.1.2 Вибір представницької паливної кампанії для подальших розрахунків

З метою подальших розрахунків в рамках послідовного аналізу формозміни металу ВКП необхідним є формулювання даних з радіаційного енерговиділення. Відповідні дані з енерговиділень в металі ВКП є результатом окремого аналізу [45].

Для проведення подальших теплогідрравлічних розрахунків на основі відповідних даних про енерговиділення в елементах ВКП [45] визначається

представницька паливна кампанія. Для цього проведено серію із 27 розрахунків за допомогою розробленої розрахункової CFD моделі. Представницька паливна кампанія обирається за критерієм досягнення максимального значення температури вигородки, а також максимального значення середньооб'ємної величини температури.

При розрахунках значення перепаду тиску між гранованим поясом та верхнім буртом вигородки прийнято рівним 180 кПа з гідростатичною складовою включно. Температура на вході прийнята рівною 291 °С. Теплова потужність в АкЗ складає 104% від номінальної.

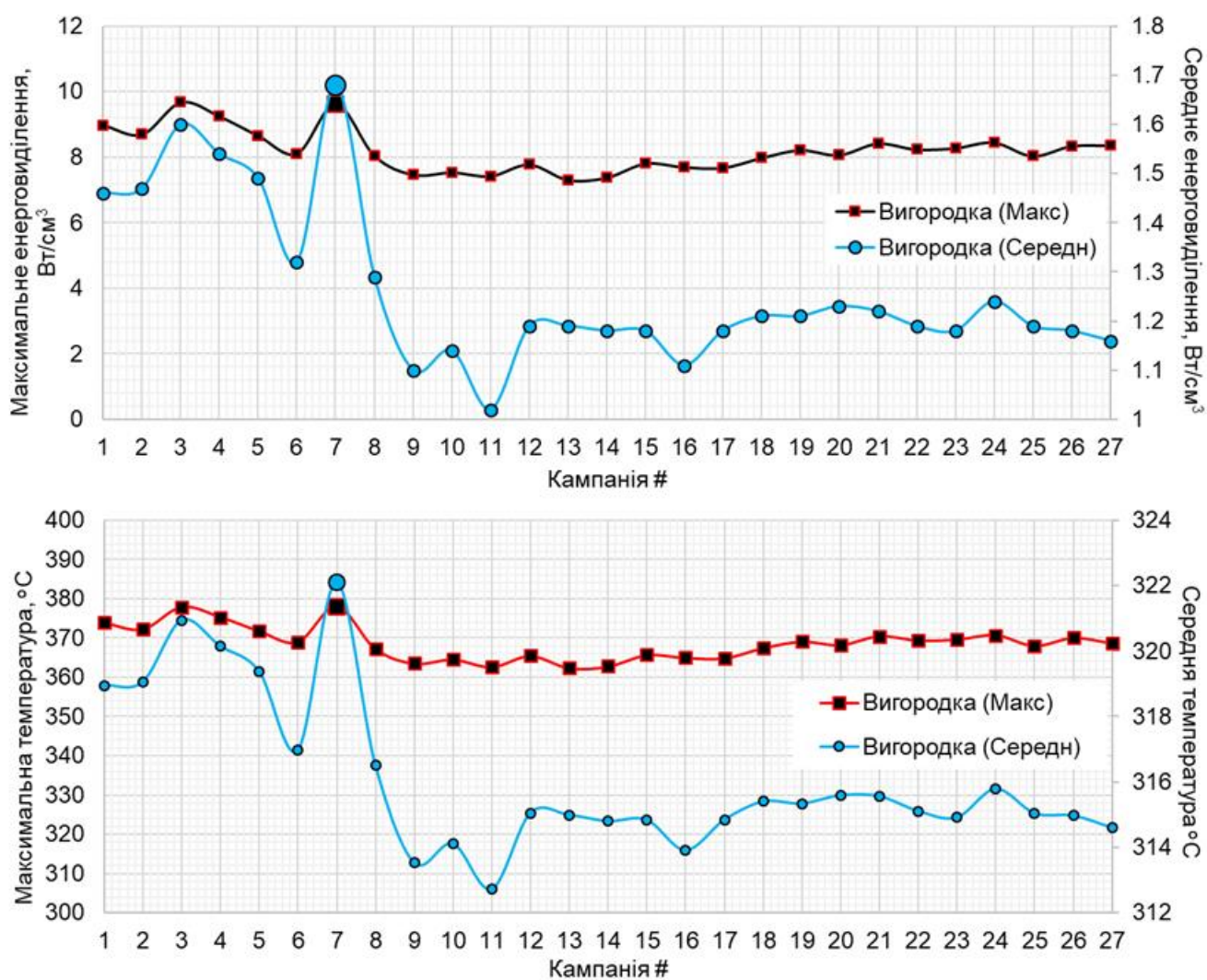


Рис. 2.10 – Результати аналізу паливних кампаній

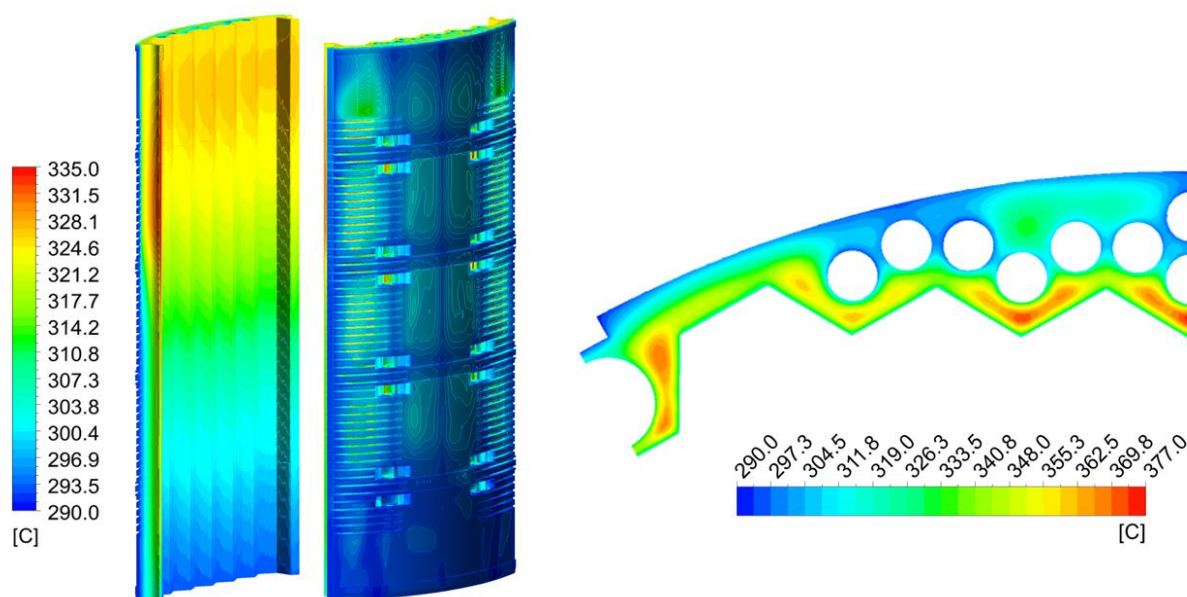


Рис. 2.11 – Розподіл температурного поля на поверхні вигородки та в найбільш теплонавантаженому перерізі

На основі результатів розрахунку, які наведено на Рис. 2.10. в якості представницької обрана Кампанія №7, в якій реалізується максимальна температура металу вигородки, а також її максимальне середньооб'ємне значення. Зазначимо також, що в обраній паливній кампанії реалізуються і максимальні температури в різьбовій тязі (~337/312 °C), ШВК (333/307 °C) та шпильках (321/307 °C). Розподіл температури на поверхні вигородки, а також в перерізі з максимальною температурою, отримані для п'яти кільцевої вигородки при розрахунку для обраної 7 кампанії представлені на Рис. 2.11.

2.1.3 Розрахунковий аналіз стану ВКП при різних конфігураціях контакту вигородки з ШВК

З метою обґрунтування теплогідравлічної надійності охолодження вигородки та її елементів пропонується послідовно розглянути різні імовірні конфігурації контакту, починаючи від нереалізованої (гіпотетичної) і закінчуючи конфігурацією, близькою до реальної. Реальне перекриття отримується після попередньої оцінки температурного поля вигородки на основі представницької кампанії. Для забезпечення більшої кількості можливих варіантів контакту і

більших поверхонь контакту аналіз проводиться для моделі з п'яти кільцевою вигородкою.

В якості основних гіпотетичних конфігурацій контактної задачі обрані наступні схеми перекриття (Рис. 2.12):

- 1) Повний контакт поверхні вигородки і шахти без можливості охолодження (фактично відкидається міжреберний простір), Конф.1.
- 2) Перекриття нижнього і верхнього бортів (фактично виключається підтік теплоносія через профілюючі пази в гранованому поясі, а також відтік теплоносія через верхній борт. Умовно припускається застійна зона), Конф.2.
- 3) Перекриття верхнього борта, Конф.3.
- 4) Перекриття нижнього борта, Конф.4.
- 5) Повне перекриття на рівні бортів 4-5 кільця, Конф.5.
- 6) Повне перекриття на рівні бортів 3-4 та 4-5 кілець, Конф.6.
- 7) Реальний контакт вигородки і шахти (Конф. 7), конфігурація якого отримується на основі аналізу на міцність.

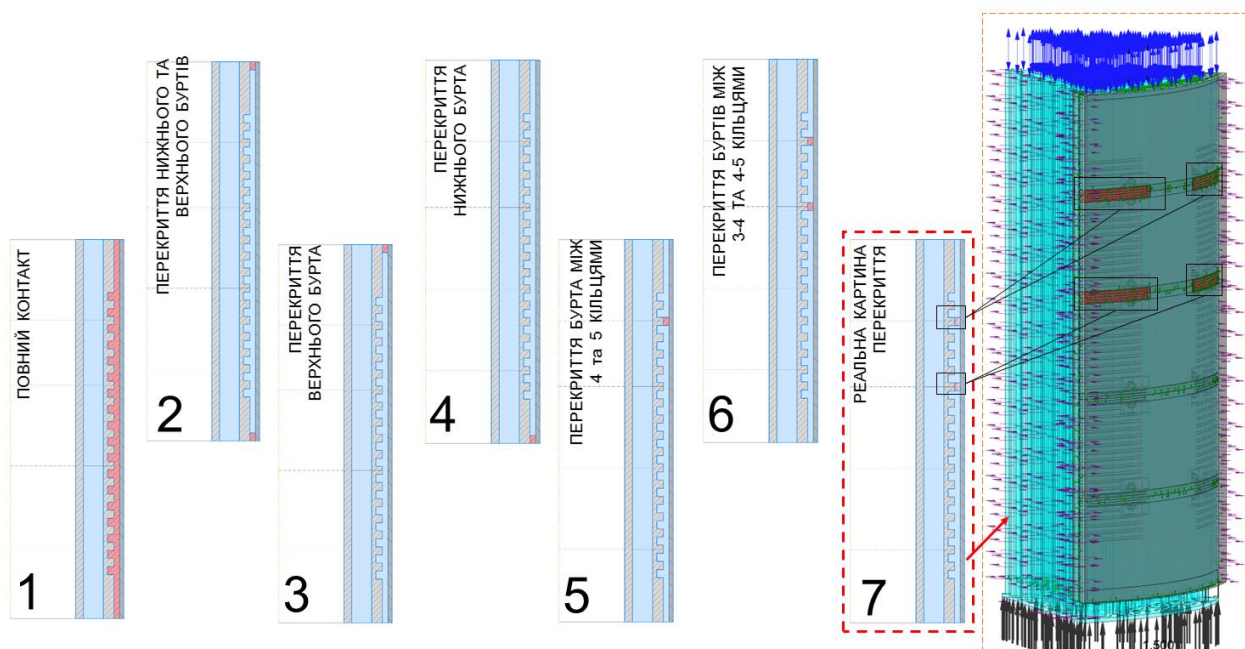


Рис. 2.12 – Розглянуті гіпотетичні конфігурації контакту вигородки та ШВК

Обрані конфігурації контакту є гіпотетичними, деякі з яких є найбільш імовірними (Конф. 5-7). Проте, розглядається саме такий набір варіантів контакту, який перекриває всі можливі випадки, а інші можливі конфігурації є проміжними щодо обраних.

Для кожної з конфігурацій контакту проведено розрахунковий аналіз. Всі розрахункові моделі базуються на принципах, описаних в п. 2.1.1 та відрізняються лише врахуванням різних зон контактного інтерфейсу.

В ДОДАТОК А у розгорнутому вигляді наведено отримані значення масових витрат в охолоджуючих каналах для різних аксіальних рівнів, що дозволяє відстежувати вплив наявності контакту на перерозподіл витрат охолоджуючого теплоносія.

Серія розрахунків, проведена для всіх гіпотетичних конфігурацій контакту, дає можливість аналізувати зміну умов охолодження металу вигородки. З цією метою досліджуваними параметрами порівняння при варіантних розрахунках прийняті середньооб'ємні і максимальні температури металу вигородки. Отримані значення температур для всіх конфігурацій контакту представлені на Рис. 2.13. Для наочності наводяться і результати, отримані на проєктній геометрії, і іменуються як конфігурація 0. В іншому, нумерація конфігурацій відповідає Рис. 2.12.

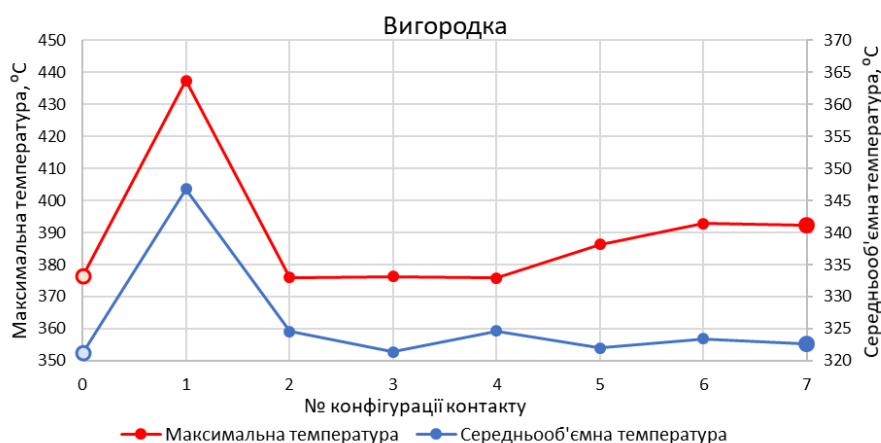


Рис. 2.13 – Середньооб'ємні та максимальні температури металу вигородки при різних конфігураціях її контакту з ШВК

Як видно з Рис. 2.13, найбільш істотне збільшення максимальної температури (T_{\max}) і середньооб'ємної температури (T_{ave}) відбувається в припущенні повного контакту зовнішньої поверхні вигородки з внутрішньою стінкою ШВК, що було передбачувано спочатку (безреберна геометрія вигородки). В цьому випадку T_{\max} досягає 437.4°C (на 60.7°C перевищує T_{\max} для 0 конф.), а T_{ave} – 346.76°C (більше T_{ave} для 0 конф. на 25.54°C). Слід зазначити, що дана конфігурація є практично нереалізованою і розглянута як гіпотетичний найбільш консервативний випадок.

В інших варіантах контакту результати свідчать про зменшення/підвищення T_{\max} щодо розрахунку на проєктній геометрії (конфігурації №0):

- зменшення на 0.7°C , 0.4°C та 0.8°C для конфігурацій №2, 3 та 4 відповідно (з перекриттям як нижнього і верхнього буртів разом, так і кожного з них окремо);
- збільшення на 9.5°C для конфігурації №5 – з перекриттям середнього бурта між 4 і 5 кільцями;
- збільшення на 16.1°C для конфігурації №6 – з перекриттям середніх буртів між 3-4 та 4-5 кільцями.
- збільшення на 15.51°C для конфігурації №7, яка відповідає найбільш реалістичній картині контакту.

Що стосується значень середньооб'ємної температури, видно відмінності між результатами для варіантів контакту №2, 3 і 4, при цьому більше зростання T_{ave} спостерігається при наявності перекриття, як тільки нижнього бурта (конф. №4 – і становить 3.38°C), так і в парі з верхнім (конф. №2 – і складає 3.32°C).

Мінімальне зростання T_{ave} спостерігається при перекритті верхнього бурта (конф. №3) і складає 0.16°C . Таке явище пояснюється перерозподілом витрат в камерах змішування міжшпилькового простору.

У найбільш імовірно реалізованих моделях контактної задачі - №5 з перекриттям бурта між 4 і 5 кільцями, №6 з перекриттям буртів між 3-4 і 4-5 кільцями, а також з реалістичною (оціненою) геометрією перекриття T_{ave} перевищує значення для конф. №0 на 0.77°C , 2.21°C і 1.37°C відповідно.

На Рис. 2.14 наведено температурні характеристики шахти внутрішньокорпусної та елементів вигородки (міжкільцеві шпильки та різьбова тяга). «Л» - означає ліва, «П» - права, опорний напрямок обирається протилежним радіус-вектору активної зони. «1-2» - означає шпилька, що з'єднує кільця №1 и №2.

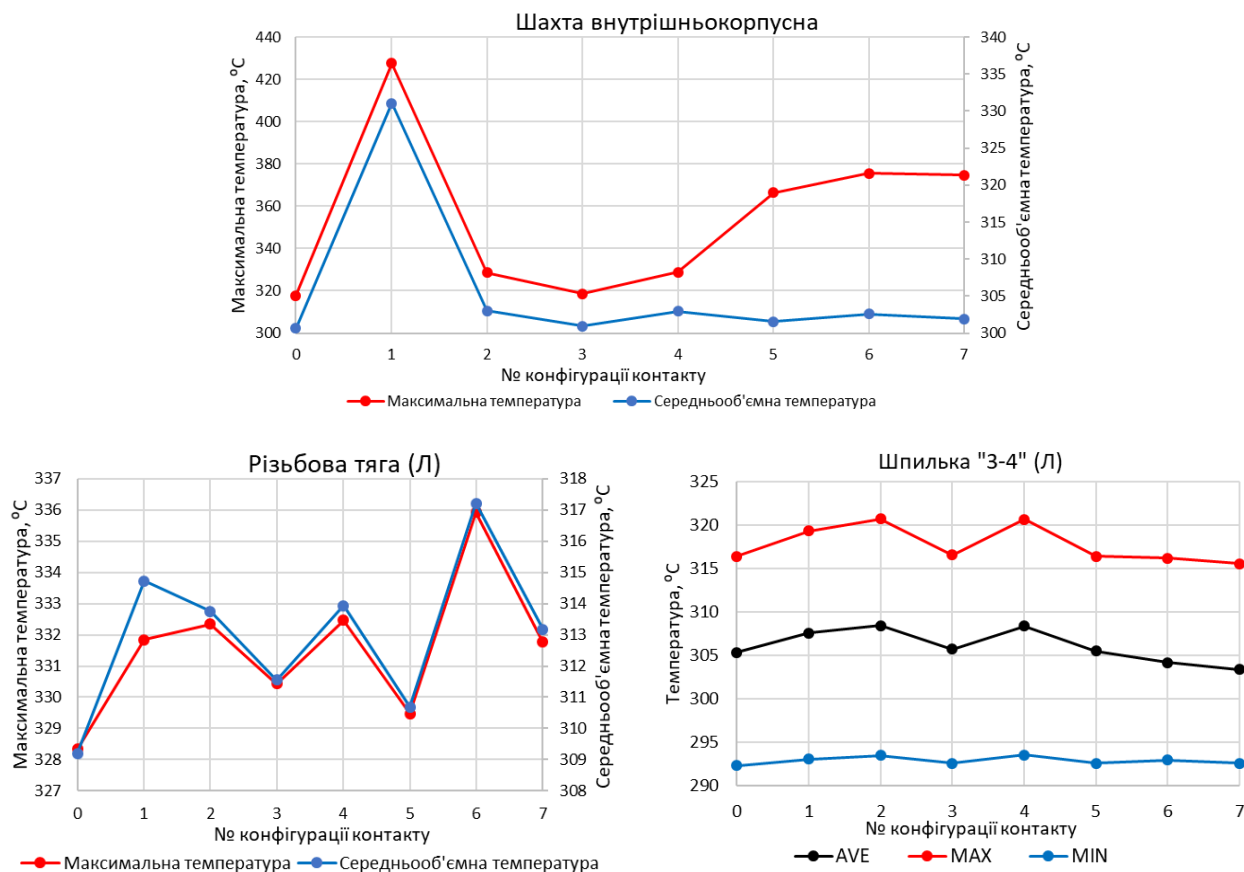


Рис. 2.14 – Середньооб'ємні та максимальні температури металу шахти, найбільш енергонавантаженої різьбової тяги і шпильки при різних конфігураціях контакту

На Рис. 2.15 також наведено оцінені (результуючі) поля температур в максимально теплонавантажених перерізах вигородки для кожної з розглянутих контактних конфігурацій. На Рис. 2.16 наведено розподіл температурного поля на зовнішніх поверхнях характерних елементів ВКП розрахункової моделі. Додаткові зображення полів температури в перерізах та на поверхні з'єднувальних шпильок винесено в ДОДАТОК Б.

З отриманих результатів видно наявне зміщення перерізу з максимальною температурою в аксіальному напрямку. Таке явище також пояснюється

перерозподілом витрат в камерах змішування біля зон міжкільцевих шпильок і, відповідно, відмінними умовами охолодження металу кільць вигородки.

Зважаючи на наведені на Рис. 2.16 та у ДОДАТОК Б поля температури на зовнішніх поверхнях елементів ВКП у всіх аналізованих варіантах контакту температура поверхні конструкційних елементів (що контактує з теплоносієм) нижче температури насичення $\sim 348^{\circ}\text{C}$ (навіть у випадку нереалістичних конфігурацій, таких як №1).

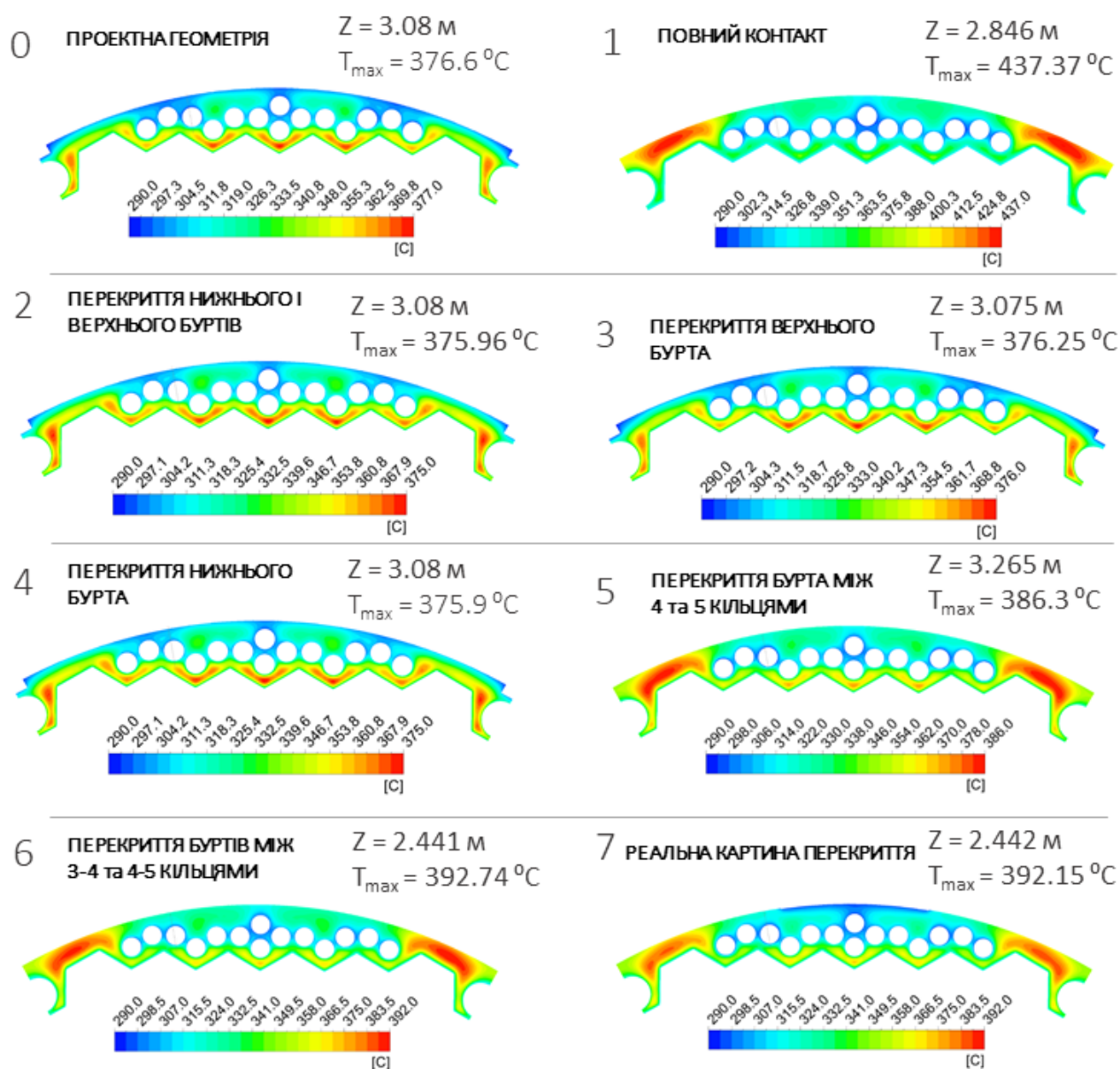


Рис. 2.15 – Температурне поле в найбільш теплонавантажених перерізах вигородки (конфігурації №0 – 7)

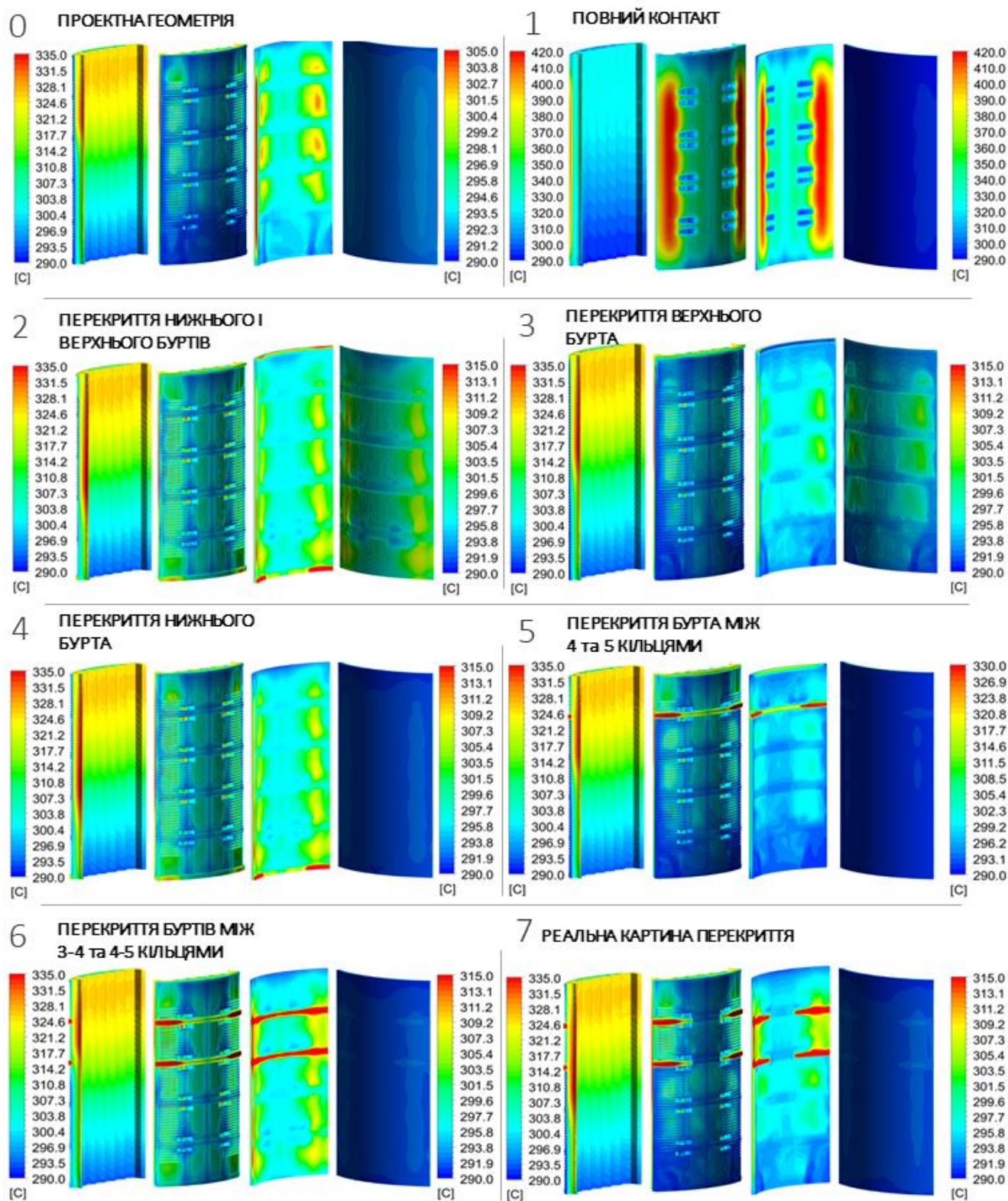


Рис. 2.16 – Температурне поле на зовнішній поверхні вигородки та ШВК, отримане для різних конфігурацій контакту

На основі отриманих температурних полів в елементах ВКП при різних конфігураціях контакту проаналізовано їх вплив на цільові функції розрахунків на розпухання: еквівалентні напруження, об'ємні деформації розпухання, еквівалентні деформації повзучості. Даний аналіз проведено у співпраці зі спеціалістами з оцінки міцності обладнання РУ. Основні підходи проведення міцнісного аналізу описано у спільних публікаціях [29-32]. Порівняння результуючих полів еквівалентних напружень, об'ємних деформацій розпухання та еквівалентних деформацій повзучості винесено у ДОДАТОК В. Основні висновки даного аналізу наступні:

- оцінені еквівалентні напруження для 0 (проектної), 7 (реалістичної), 6 конфігурацій і, навіть, для варіанту з повним контактом практично не відрізняються;
- отримані значення об'ємного розпухання для 0 (проектної), 7 (реалістичної), 6 конфігурацій дуже близькі, а найбільші значення отримані для практично не реалізованого випадку повного контакту вигородки із ШВК;
- оцінені величини середньооб'ємної деформації повзучості так само не суттєво відрізняються для 0 (проектної), 7 (реалістичної), 6 конфігурацій і мають найбільше значення для практично не реалізованого випадку повного контакту вигородки із ШВК.

Отже, результати розрахунків показують, що наявність контакту частково впливає на кількісні і якісні характеристики температурного поля вигородки. Найбільший вплив з точки зору зміни енергонавантаженості вигородки чиниться при виникненні повного контакту вигородки із шахтою, що є практично не реалізованим. За отриманими розрахунковими полями температур для різних варіантів контакту проведено порівняльну оцінку радіаційного розпухання на основі двовірної моделі. Показано, що контакт призводить до незначних змін у цільових функціях радіаційної повзучості – об'ємному розпуханні та еквівалентних напруженнях. Наступним фактором впливу на зміну умов охолодження ВКП, який потребує дослідження, є розкриття кілець вигородки і поява радіальних перетоків.

2.2 Аналіз зміни умов охолодження ВКП при наявності радіальних перетоків між кільцями вигородки

Виникнення радіальних перетоків теплоносія з активної зони через розкриття кілець вигородки, спричинене їх розпуханням, викликає необхідність аналізу зміни умов охолодження ВКП. У даному підрозділі запропоновано відповідну процедуру розрахункового аналізу, що містить наступні складові:

1. Розрахунок стаціонарного температурного поля вигородки для проєктної геометрії (див. п. 2.1.2).
2. Аналіз радіаційного розпухання кілець вигородки на основі результуючих температурних полів з 1 кроку. Отримання величин зазорів між кільцями вигородки (Рис. 2.17).
3. Оцінка інтенсивності радіального перетоку між кільцями вигородки, що проводиться двома підходами – аналітично, та з використанням розробленої у п. 2.1.1 моделі охолодження вигородки, що враховує можливість врахування наявності радіальних перетоків.
4. Аналіз температурного поля вигородки з урахуванням змінених умов охолодження металу вигородки за рахунок моделювання радіального байпасу теплоносія через отримані на 2-му кроці величини міжкільцевих зазорів.

Для аналізу зміни умов охолодження ВКП використовуються результати оцінки величини розкриття кілець вигородки після 60-ти років експлуатації (Рис. 2.17), проведені спеціалістами з оцінки міцності ТОВ «ІПП-Центр» в рамках спільних робіт [33].

Аналітичну оцінку інтенсивності байпасу з активної зони виконано задаючись перепадом тиску по висоті вигородки зі сторони активної зони (Рис. 2.5) і кільцевого каналу. В першому наближенні припускається, що теплоносій байпасує лише до кільцевого каналу. Інтенсивність байпасу визначається трьома складовими втрати тиску: «втрата на вході», «тертя в щілині» з еквівалентним круглим перерізом, а також втрата на виході. Кожна з функцій коефіцієнта гідравлічної втрати визначається згідно з [52]. При цьому розширення при

потраплянні до кільцевого каналу фактично є необмеженим в поперечному напрямку потоку, що призводить до того, що КГО при «розширенні» прямує до 1.

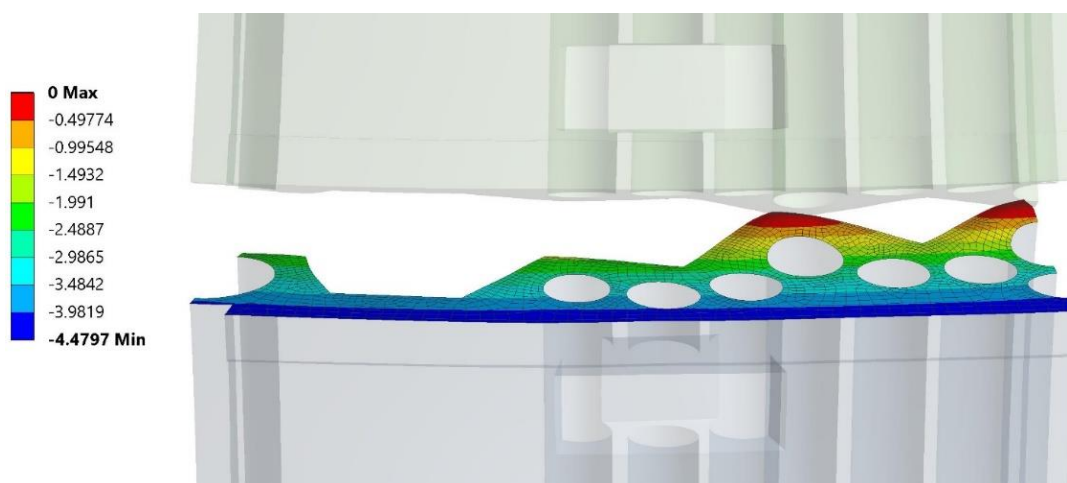


Рис. 2.17 – Величини розкриття контактів між кільцями вигородки, отримані для області з'єднання середнього і верхнього кілець на 60-й кампанії

Щодо геометрії розкриття, консервативно прийнято що для всіх місць з'єднання кілець вона відповідає максимальному розкриттю, отриманому для відповідної кампанії.

На Рис. 2.18 приведені результати оцінки інтенсивності радіального байпасу теплоносія, оцінені згідно описаного аналітичного підходу, де верхня і нижня межа оцінки відповідають верхній і нижній межі висоти отриманого розкриття для поточної кампанії.

Результати аналітичної оцінки порівняні з консервативним значенням максимально можливого перетоку, оціненого із застосуванням розробленої CFD моделі (за умови завдання максимального розкриття, отриманого для 60-ї кампанії для кожної пари кілець 5-кільцевої моделі охолодження вигородки. Опис теплогідравлічної моделі наведено в п. 2.1.1). Даний підхід дозволяє оцінити верхню межу інтенсивності можливого радіального перетоку, а використання CFD-моделювання дозволяє врахувати складну схему перемішування теплоносія і перепрофілювання витрат за умови розкриття.

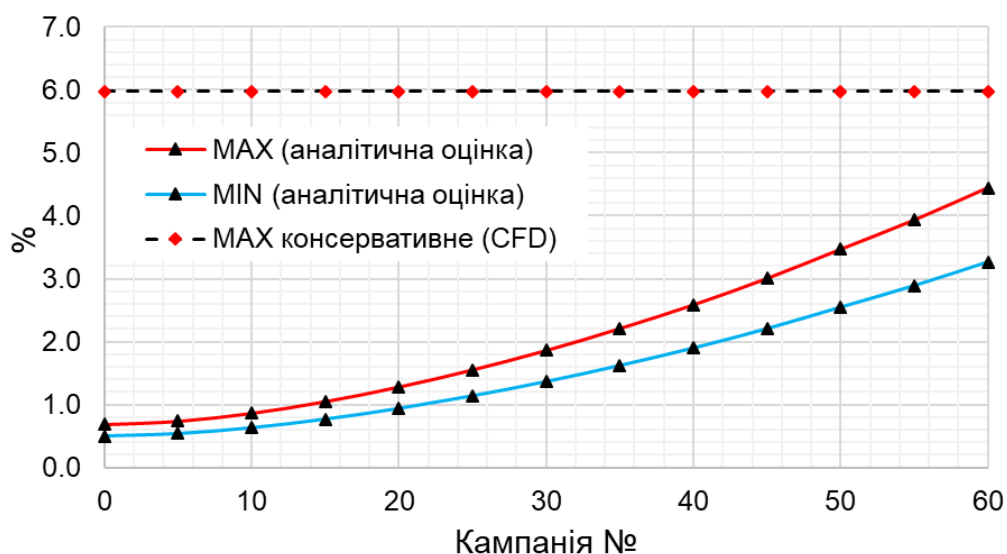


Рис. 2.18 – Оцінена інтенсивність сумарного радіального перетоку теплоносія з активної зони в байпас вигородки (відсоток відносно сумарної витрати в АкЗ)

З використанням універсальної (з точки зору граничних умов) моделі охолодження вигородки проводиться аналіз температурного поля елементів ВКП за умови наявності розкриття.

На Рис. 2.19 наведено порівняльний аналіз температурних полів в перерізах вигородки, що відповідають місцям контакту кілець (у разі розрахунку для проєктної геометрії), та верхнім і нижнім торцям кілець вигородки у разі врахування наявності міжкільцевих зазорів, отриманих при розрахунках радіаційного розпухання. У Табл. 2.5 наведено розгорнуті дані щодо перерозподілу масових витрат в охолоджуючих каналах для розрахунку за наявності радіальних байпасів.

З наведеного аналізу видно, що внаслідок появи радіальних перетоків:

- Положення найбільш теплонавантаженого перерізу зміщується вгору.
- Максимальна температура металу вигородки зменшується на 3.95°C .
- Значення середньооб'ємної температури вигородки зростає на 2.1°C ,

що пояснюється збільшенням температури охолоджуючого теплоносія за рахунок потрапляння байпасуючого теплоносія з АкЗ із більшою температурою.

Також з Рис. 2.19 видно, що за рахунок наявності радіального байпасу торці кілець вигородки значно охолоджуються відносно відповідних температурних полів в місцях контакту кілець для проєктної геометрії, що може впливати на подальшу динаміку їх розкриття, а саме, зменшувати її швидкість.

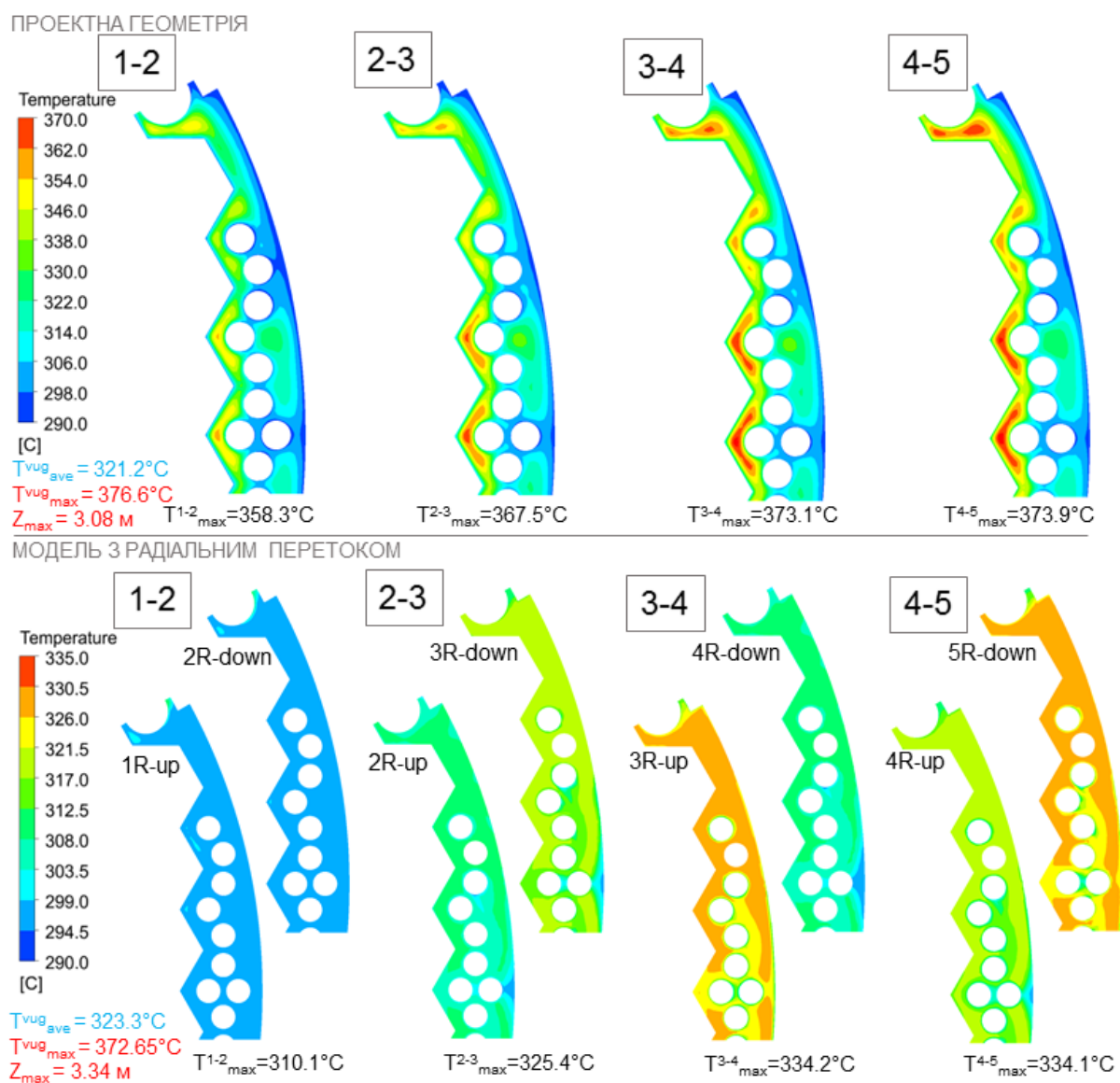


Рис. 2.19 – Порівняльний аналіз результуючих температурних полів в перерізах з'єднання/торців кілець вигородки для розрахунків на проєктній геометрії та з урахуванням розкриття кілець

2.3 Висновки до Розділу 2

Другий розділ присвячено дослідженню зміни умов охолодження вигородки при деградації її геометрії, а саме її контакті із шахтою внутрішньокорпусною та розкритті кілець вигородки і, як наслідок, появи не передбачених проектом радіальних перетоків теплоносія з активної зони реактору.

Виконаний аналіз відповідає підходу поступової оцінки. З метою проведення зазначеного аналізу розроблено розрахункову тривимірну CFD-модель охолодження вигородки, яка являється універсальною з точки зору можливості її конфігурування та задання граничних умов. Детальний опис моделі наведено в п. 2.1.1. Використовуючи розроблену модель в рамках послідовного підходу проведено серію розрахунків для різних кампаній експлуатації енергоблоку АЕС, використовуючи відповідні дані з радіаційних енерговиділень. На базі отриманих результатів за критерієм досягнення максимальних значень середньооб'ємної і максимальної температур в металі вигородки, що визначаються чутливістю моделей розпухання, обрано представницьку кампанію для подальшого аналізу деградації геометрії. Відповідно, отримано розрахункове температурне поле для проектної геометрії ВКП. Для подальшого аналізу впливу зміни геометрії за рахунок появи контакту вигородки з ШВК та появи радіальних перетоків обрано модель з п'яти кільцевою вигородкою, так як в ній можуть бути досягнуті більші площі контакту і площі розкриття.

З метою дослідження зміни умов охолодження вигородки за наявності її контакту із шахтою запропоновано підхід із розглядом різних можливих конфігурацій контакту. В рамках аналізу розглянуто 8 варіантів контакту, серед яких:

- перший – проектна геометрія (референтний розрахунок, «0 конфігурація»);
- 6 наступних – прогнозовані (від цілком гіпотетичного повного контакту «1 конфігурація» до більш реалізованих варіантів перекриття кільцевого зазору за рахунок контакту нижнього/верхнього буртів і їх комбінацій, а також на

рівні буртів, що відповідають найбільш енергонавантаженим перерізам вигородки);

– восьмий – реалістичний на основі попередньої оцінки на міцність для представницької кампанії («7 конфігурація»).

Запропонований підхід дозволив якомога повно проаналізувати всі імовірні стани ВКП при наявності контакту.

Для кожного з варіантів аналізувалися зміни цільових параметрів, а саме максимальних та середньооб'ємних значень температур основних конструкційних елементів ВКП (вигородки, шахти, шпильок та різьбових тяг). Отримані результати свідчать про те, що контакт вигородки і шахти частково впливає на якісні та кількісні характеристики температурного поля вигородки (збільшення максимальної температури вигородки на $\sim 15^{\circ}\text{C}$ для найбільш реалістичних варіантів контакту), при максимальному (для відповідних реалістичних конфігурацій контакту) відхиленні середньооб'ємної температури від проєктного стану (геометрії), що не перевищує $2,21^{\circ}\text{C}$. Розрахункові значення температур для різних варіантів контакту використані для порівняльної оцінки радіаційного розпухання на основі двомірної моделі. Показано, що контакт призводить до незначних змін у цільових функціях радіаційної повзучості – об'ємному розпуханні та еквівалентних напруженнях.

Наступним фактором впливу на зміну умов охолодження ВКП, який було досліджено є розкриття кілець вигородки і поява радіальних перетоків. Оцінка інтенсивності радіальних перетоків виконана двома підходами – аналітично, та із використанням розробленої CFD-моделі, що дозволяє врахування наявності розкриття кілець. Величини розкриття приймаються з отриманих результатів оцінки міцності. Консервативно розглядається п'яти кільцева модель та вважається, що отримані розкриття реалізуються між всіма парами кілець вигородки, при чому для аналітичної оцінки беруться мінімальні і максимальні межі оцінених величин розкриття по кампаніях, а CFD-моделювання виконано на основі максимального розкриття, оціненого для 60-ї кампанії. Таким чином отримано можливу максимальну межу величини інтенсивності байпасу з активної

зони до кільцевого каналу і каналів охолодження вигородки, яка оцінена в 6% відносно загальної витрати через активну зону.

З метою дослідження впливу наявності отриманої величини радіального перетоку проаналізовано температурні поля в перерізах вигородки, що відповідають місцям контакту кілець (у разі розрахунку для проєктної геометрії), та верхнім і нижнім торцями кілець вигородки у разі врахування наявності міжкільцевих зазорів, отриманих при розрахунках радіаційного розпухання.

Отримані результати наступні:

- Положення найбільш теплонавантаженого перерізу зміщується вгору.
- Максимальна температура металу вигородки зменшується на 3.95°C .
- Значення середньооб'ємної температури вигородки зростає на 2.1°C , що пояснюється збільшенням температури охолоджуючого теплоносія за рахунок потрапляння байпасуючого теплоносія з АкЗ із більшою температурою.

- За рахунок наявності радіального байпасу торці кілець вигородки значно охолоджуються відносно відповідних температурних полів в місцях контакту кілець для проєктної геометрії.

Отримані результати свідчать про наявну зміну умов охолодження металу вигородки, що викликана, в першу чергу, виникненням радіальних перетоків, та може мати значний вплив на реальну динаміку розкриття і деградації геометрії вигородки в цілому за рахунок появи зворотного зв'язку типу «розкриття – локальна інтенсифікація охолодження – зменшення інтенсивності подальшого розкриття». Аналіз впливу даних зворотних зв'язків на стан елементів ВКП потребує використання зв'язаного підходу з урахуванням взаємного впливу трьох фізик – нейтронно-фізичному, теплогідравлічному розрахунках та розрахунку міцності. Такий аналіз потребує покрокового зв'язаного розрахунку для всіх кампаній енергоблоку, виконання якого за допомогою розроблених і застосовуваних підходів є надто ресурсномістким, а значить вимагає розробки нових підходів до вирішення даної задачі.

3. ОПИС РАДІАЦІЙНОГО МОДУЛЮ МУЛЬТИФІЗИЧНОГО КОДУ АНАЛІЗУ ДЕГРАДАЦІЇ ГЕОМЕТРІЇ ВИГОРОДКИ ВВЕР-1000

Поява радіального перетоку теплоносія з АкЗ на периферію поліпшує умови охолодження вигородки між кільцями (див. п. 2.2), особливо в області максимальних радіаційних навантажень. Це призводить до зміни як амплітудних і середньооб'ємних значень, так і, власне, поля температури, що є одним із визначальних факторів при оцінці міжкільцевого розкриття. Із-за зміни геометрії вигородки локально змінюються й умови опромінення металу не тільки вигородки але й міжкільцевих шпильок та внутрішньокорпусної шахти. Це породжує додаткові нелінійності задачі, що аналізується. Таким чином, в контексті реалістичної оцінки, робочою стає концепція мультифізичного зв'язку, який коротко можна охарактеризувати так: «розігрів – розкриття – інтенсифікація охолодження та зміна локальних радіаційних умов – закриття».

В даному розділі наведено опис нейтронного модулю, який є складовою зв'язаного мультифізичного аналізу. Даний модуль застосовується для оцінки миттєвого та накопиченого радіаційного стану внутрішньокорпусних пристроїв і дозволяє оптимальним чином враховувати особливості експлуатації енергоблоку ВВЕР-1000. При розробці звернено увагу на багаторічний досвід виконання аналогічних робіт спеціалістами ÚJV Řež, a. s. [45], ІЯД НАНУ [56] та ЦПАЗ ХФТІ [57]. Основним завданням є побудова логічного зв'язку між концептуальними складовими модулю, які можна розділити в залежності від використання на:

- інженерний аналіз паливного завантаження (фактично ініціалізація);
- модель транспорту нейтронів та гамма-квантів для оцінки локальних характеристик радіаційних полів, а також процедура для оцінки накопичених величин з урахуванням умов охолодження (основний розрахунковий модуль);
- формування параметричних функцій впливу радіального перетоку на радіаційні поля в елементах ВКП;

3.1 Інженерний аналіз паливного завантаження енергоблоку ВВЕР-1000

В першу чергу організовується ініціалізація вхідних даних для транспортної частини модулю на основі експлуатаційної інформації для конкретного енергоблоку АЕС, яка формується інструментарієм відділу ядерної безпеки (ВЯБ) конкретного майданчику (наприклад, БИПР/ПЕРМАК-А). Концептуально підготовку вхідних даних моделі транспорту нейтронів та гамма-квантів, а також розрахунок енерговиділення, флюенсу та пошкоджуваності можна представити у вигляді наступних послідовних кроків:

- Формування бази даних для сортів палива залежно від температури та глибини вигорання палива (ізотопний склад, середнє значення виходу нейтронів ділення, спектр ділення, середнє значення енергії виходу на одне ділення).
- На основі картограм паливного завантаження для кожного умовного сектора розраховується теплова та нейтронна потужність (застосовуючи експлуатаційні дані), а також оцінюється часовий профіль витоків нейтронів із активної зони.
- Залежно від специфікації опорних величин формуються вхідні дані в локальній системі координат моделі транспорту на основі експлуатаційних даних для обраних часових проміжків.

Оскільки в якості вхідних параметрів для моделі транспорту нейтронів застосовуються експлуатаційні дані для сектору, а також зважаючи на те, що розрахункова модель двовимірна, була створена спеціальна параметрична процедура аналізу паливної кампанії. Основна суть застосування такої процедури – аналіз представницьких моментів паливної кампанії, а також вибір референтного сектору. Багатопараметричність процедури обумовлена в першу чергу тим, що модель транспорту двовимірна і наперед складно визначити таку комбінацію вхідних даних, яка б не була надмірно консервативною для подальших теплогідравлічних розрахунків та розрахунків на міцність. Тому був розроблений алгоритм аналізу паливної кампанії на основі інженерної оцінки. Принципова схема розрахунку зображена на Рис. 3.1

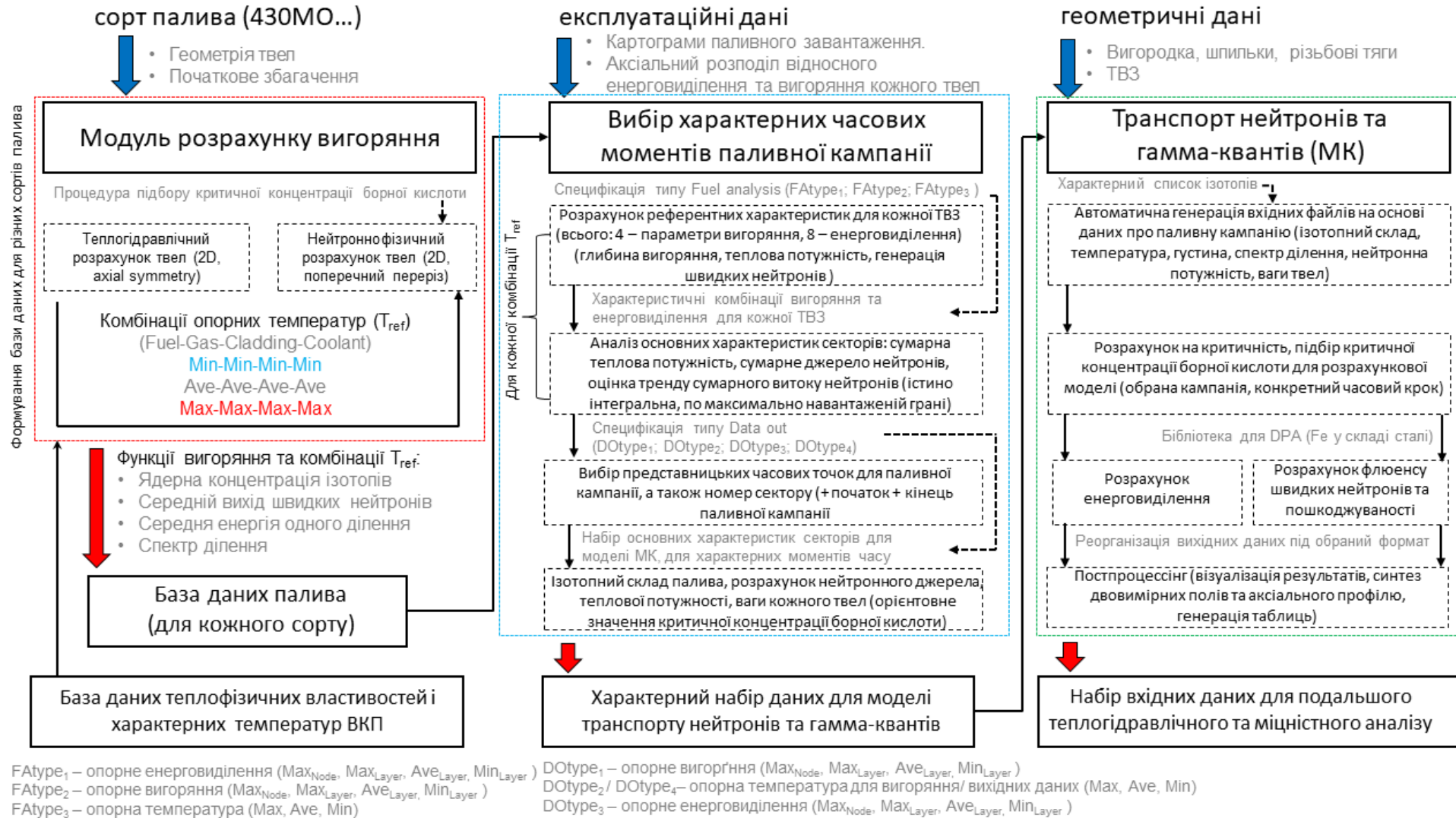


Рис. 3.1 – Принципова схема розрахунку енерговиділення, флюенсу та пошкоджуваності

В першу чергу формується база даних сортів палива, яке використовувалося в певний проміжок експлуатації (наприклад з моменту введення в експлуатацію по сьогоднішній день). Для цього розроблена спеціальна підпрограма, яка дозволяє отримати погоджене температурне поле в твел (2D, r-z), яке є вхідним параметром для нейтронно-фізичної моделі твел на базі коду WIMS5b [55] із можливістю автоматичного підбору критичної концентрації борної кислоти. Даний блок виконується лише один раз, або за необхідності доповнення бази даних сортів палива.

Концепція аналізу паливних кампаній наступна. Для кожної паливної кампанії обираються характерні часові кроки (додатково додаються початок та кінець паливної кампанії), а для кожного кроку – характерний сектор (див. Рис. 3.2). Така концепція аналізу дає можливість сформувати консервативний набір в масштабах усього періоду експлуатації енергоблоку (максимально навантажений часовий крок – максимальна навантажений сектор). В якості критеріїв вибору характерних часових кроків та сектору використовуються наступні величини: інтегральна потужність сектору ($Power_i$), інтегральний витік нейтронів ($efFlux_i^{ave}$), інтегральний витік нейтронів по максимальна навантаженій грані ($efFlux_i^{max}$). Оскільки інженерними методами важко оцінити інтегральний витік нейтронів (невідомі вклади непериферійних твелів та ТВЗ), то будується часовий тренд фактично безрозмірної величини.

Теплова потужність сектора розраховується залежно від значення конфігуратора $FAtype_1$:

$$Power_i = \frac{Q_{heat}}{N_{FA} \cdot N_P \cdot N_l} \cdot \sum_j^{N_i^{sec}} \left(\begin{array}{l} FAtype_1 = "MaxNode", N_P \cdot N_l \cdot \max(k_k^{node}) \\ FAtype_1 = "Max", N_P \cdot N_l \cdot \max(k_k^l) \\ FAtype_1 = "Ave", N_P \cdot N_l \cdot mean(k_k^l) \\ FAtype_1 = "Min", N_P \cdot N_l \cdot \min(k_k^l) \end{array} \right) \quad (3.1)$$

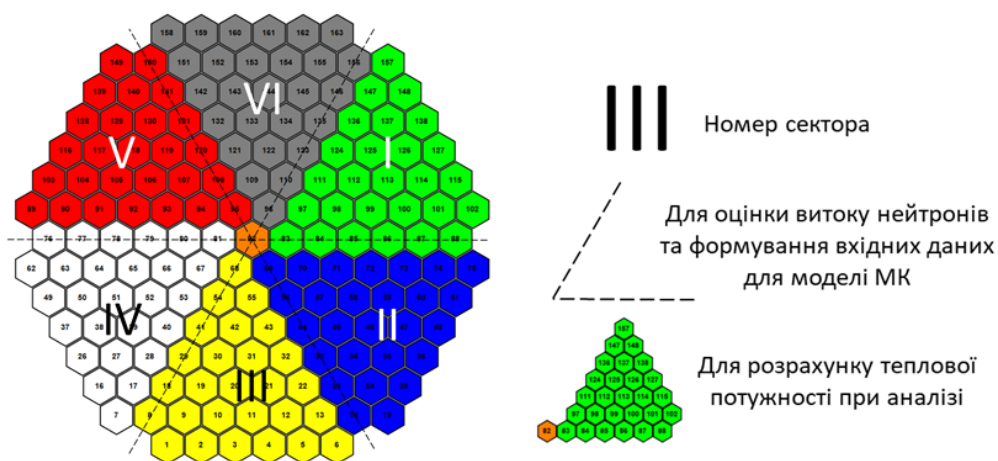


Рис. 3.2 – Нумерація секторів для аналізу паливних кампаній

Для розрахунку витоку нейтронів необхідно оперувати опорною глибиною вигорання (для ТВЗ), яка визначається на основі значень конфігуратора $FAtype_2$:

$$B_j = \begin{cases} FAtype_2 = "MaxNode", \max(B_{j,k,l}) \\ FAtype_2 = "Max", \max(B_{j,k}^l) \\ FAtype_2 = "Ave", \text{mean}(B_{j,k}^l) \\ FAtype_2 = "Min", \min(B_{j,k}^l) \end{cases} \quad (3.2)$$

Оцінка витоку нейтронів для обраної периферійної ТВЗ:

$$efFlux_j = Power_j^{FA} \frac{[v_f(T_{ref}, B_j) - 1]}{2\pi R_p N_p \cdot E_f(T_{ref}, B_j)} F(Per_j, \dots) \quad (3.3)$$

Опорна температура T_{ref} для функцій параметрів від глибини вигорання обирається згідно зі значенням конфігуратора $FAtype_3$. Слід зазначити, що в залежності (3.3) присутні досить грубі припущення. По-перше залежність (3.3) оцінює сумарний витік нейтронів через усереднену густину потоку з поверхні твел та ефективну площу витоку у припущенні, що одиниця нейтронів іде на підтримку критичної ланцюгової реакції, а все інше покидає паливо (без врахування

поглинання нейтронів паливом та продуктами ділення, а також теплоносієм). Функція $F(Per_j, \dots)$ характеризує ефективний периметр, який фактично враховує «скільки середніх» твелів приймають участь у витоці через грань обраної ТВЗ. Функція $F(Per_j, \dots)$ дійсно залежить від геометричного периметру ТВЗ Per_j , проте насправді враховує вплив й інших, непериферійних твелів. Інженерними методами оцінити значення цієї функції практично неможливо. Основне припущення, яке дозволяє перейти від аналізу абсолютних величин до відносних, це те, що функція $F(Per_j, \dots)$ в межах однієї ТВЗ слабо змінюється для середньої густини потоку нейтронів під час усієї кампанії. Таким чином, можна оцінити тренд у часі сумарної втрати нейтронів (безрозмірної величини) через обраний сектор:

$$efFlux_i^{ave} = \frac{\sum_j^{N_i} efFlux_j}{\max_{i,time} \left[\sum_j^{N_i} efFlux_j \right]} \quad (3.4a)$$

$$efFlux_i^{max} = \frac{N_i \cdot \max_j [efFlux_j]}{\max_{i,time} \left[\sum_j^{N_i} efFlux_j \right]} \quad (3.4b)$$

Не дивлячись на досить грубу оцінку, вдається в першому наближенні обирати референтні моменти паливної кампанії, причому для деяких із них, часових точок - дві, оскільки аналізується як середній витік, так і витік по максимальній грані.

Слід зазначити, що всі вище представлені величини розраховуються для всіх часових кроків обраної для аналізу паливної кампанії, а також для всіх трьох значень конфігуратора $FAtype_3$ (характеризує опорну температуру T_{ref} розрахунку вигорання).

Як видно з залежностей (3.1)-(3.4a) оцінка може здійснюватися для різних комбінацій $FAtype_1 - FAtype_2$. Оскільки для транспорту нейтронів застосовується двовимірна модель, необхідно розуміти, що є обґрунтованими з точки зору

консерватизму вхідними даними. Так, наприклад, потрібно розуміти як інтерпретувати глибину вигоряння (яку величину обирати) та відносну потужність для кожного твелу у випадку застосування двовимірної моделі (формування ваги елементарного джерела нейтронів).

На основі отриманих референтних часових кроків, а також даних відносно характерного сектору, формується набір вхідних величин для транспортної моделі. Формування вхідних даних відбувається згідно із значеннями конфігураторів DType₁ – DType₄.

Сумарна потужність нейтронів ділення оцінюється для сектору (Рис. 3.2, сектор для моделі МК) як:

$$Source = \frac{k_Q^{er} \cdot Q_{heat}}{N_{FA} \cdot N_p \cdot N_l} \cdot \sum_i^{N_s} \frac{\nu_f(T_{ref}, B_i)}{E_f(T_{ref}, B_i)} \left[\begin{array}{l} DType_3 = "MaxNode", N_p \cdot N_l \cdot \max(k_k) \cdot \\ DType_3 = "Max", N_L \cdot \sum_j^{N_p} \max(k_k) \\ DType_3 = "Ave", \sum_j^{N_p} \sum_k^{N_l} k_o \cdot N_L \sum_j^{N_p} mean(k_k) \\ DType_3 = "Min", N_p \cdot N_l \cdot \min(k_k) \end{array} \right] \quad (3.5)$$

Характеристична глибина вигоряння B_i розраховується аналогічно (3.2) використовуючи значення конфігуратора DType₁. Розрахунок вагових коефіцієнтів для кожного твел у моделі транспорту нейтронів та гамма квантів здійснюється на основі експлуатаційних даних. Опорна глибина вигоряння для кожного твелу обирається на основі значення ідентифікатора DType₁. Для функцій концентрації ізотопів, середнього виходу нейтронів ділення і енергії одного ділення опорна температура обирається за конфігуратором DType₂ (аналог FAtype₃ при аналізі характерних часових проміжків для паливної кампанії).

$$w_{i,j} = \frac{\sum_k^{N_L} \left(k_k \frac{\nu_f(T_{ref}, B)}{E_f(T_{ref}, B)} \right)_k}{\sum_i^{N_s} \sum_j^{N_p} \sum_k^{N_l} \left(k_k \frac{\nu_f(T_{ref}, B)}{E_f(T_{ref}, B)} \right)_{i,j,k}} \quad (3.6)$$

Для кожного моменту паливної кампанії генеруються аксіальні профілі енерговиділення, для того, щоб була можливість синтезувати тривимірні поля для подальших розрахунків.

На Рис. 3.3 представлено результати аналізу характерної паливної кампанії для енергоблоку ВВЕР-1000. Вхідні експлуатаційні дані сформовані у вигляді вхідних файлів за допомогою пакету КАСКАД. За допомогою БИПР [64, 66] для кожної ТВЗ (30 призматичних об'ємів в аксіальному напрямку). За допомогою програми ПЕРМАК [64] для кожної ТВЗ розраховується (відновлюється) потвельний розподіл вигорання $(B)_{i,j,k}$ та нерівномірності енерговиділення $(k_k)_{i,j,k}$.

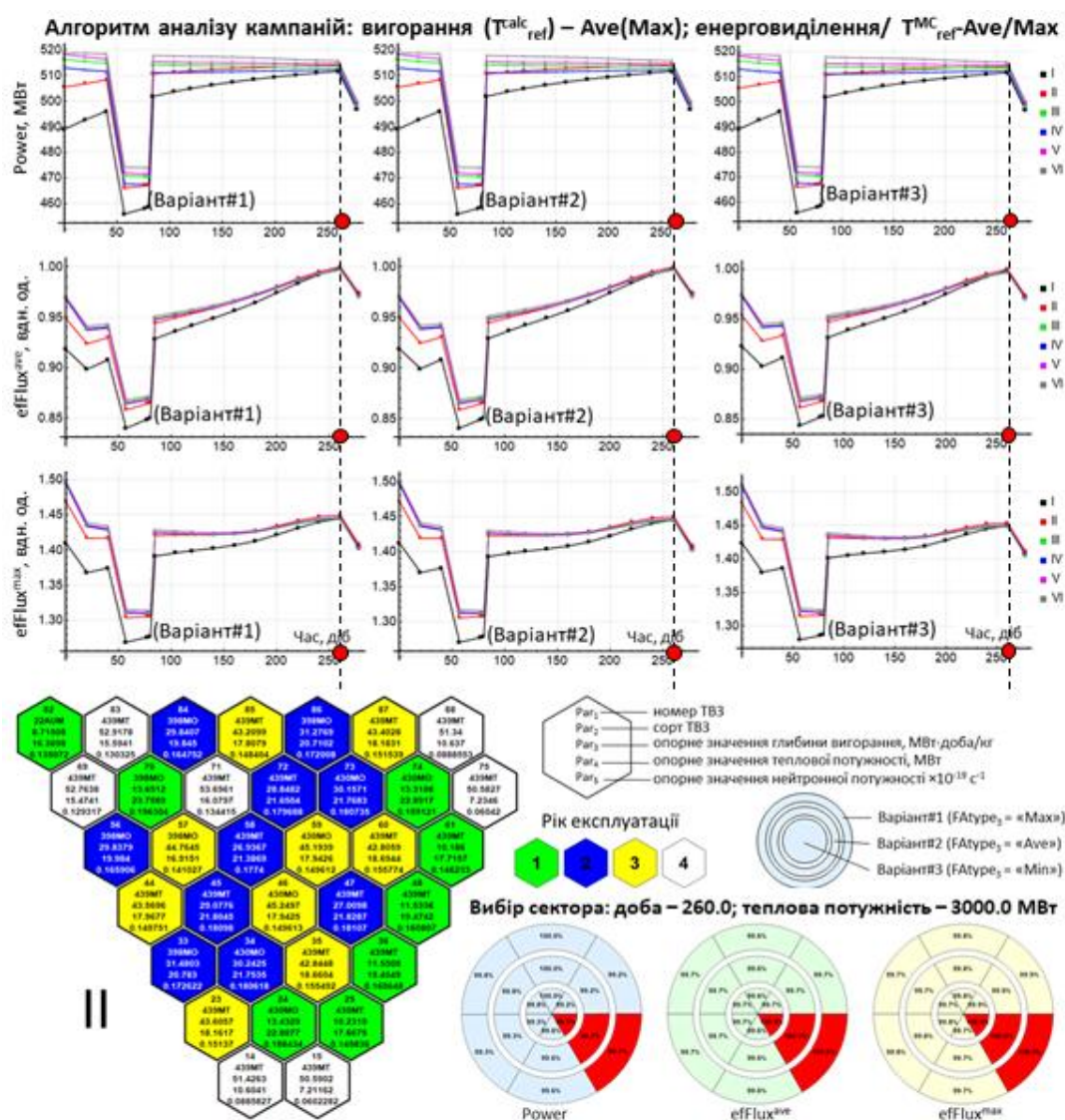


Рис. 3.3 – Результати інженерної оцінки характеристичної паливної кампанії енергоблоку ВВЕР-1000

3.2 Опис моделі транспорту нейтронів та гамма-квантів

Для розрахунку енерговиділення (q_v), флюенса і пошкоджуючої дози (D) в елементах ВКП була розроблена спрощена модель реактора ВВЕР-1000 для транспортного коду MCNPX. Розрахункова модель представляє собою 60-й сектор поперечного перерізу реактора, який включає такі елементи: активну зону на рівні паливного стовпа, вигородку, ШВК, різьбові тяги, шпильки, корпус реактора з наплавкою та теплоносій, а площини симетрії проходять крізь центри 2-х послідовних отворів різьбових тяг у вигородці. Загальний вигляд розрахункової області представлений на Рис. 3.4. Модель вигородки разом зі шпильками, охолоджувальними каналами та різьбовою тягою повторює переріз біля місця з'єднання двох кілець вигородки. Геометрія активної зони реактора побудована за допомогою повторюваної структури правильних шестигранних призматичних елементів [58], що моделюють елементарну чарунку ТВЗ із омиваючим її теплоносієм. Відстань між протилежними гранями такого елемента рівна кроку розташування ТВЗ в трикутній решітці. Кожна ТВЗ також моделюється за допомогою таких структур із відстанню між протилежними гранями, що відповідає кроку розташування твел і кластерів. Кожний такий елемент моделює елементарну чарунку таких видів:

- Твел та теплоносій, що його омиває;
- Направляючу трубку із теплоносієм;

В розрахунковій моделі передбачена можливість конфігурування активної зони (АкЗ) різними ТВЗ з урахуванням їх особливостей.

Граничні умови моделі представлені у вигляді дзеркального відбиття на границі симетрії, верхній та нижній площинах, перпендикулярних аксіальній осі, а також вакуумних на зовнішній циліндричній поверхні корпусу реактору. Теплофізичні і нейтронно-фізичні властивості, а також матеріальний склад елементів моделі однорідні в аксіальному напрямку. Джерело частинок також рівномірно розподілене в аксіальному напрямку, а потужність джерела

розраховується із урахуванням фактичної висоти моделі. Таким чином, дана модель представляє двовимірну адаптацію тривимірної постановки нейтронної задачі (r - θ модель). Такий підхід обумовлений тим, що вдається оптимально застосовувати розрахункові ресурси для отримання статистично збіжних результатів. Фактично застосовується концепція двовимірного розрахунку максимально навантаженого поперечного перерізу.

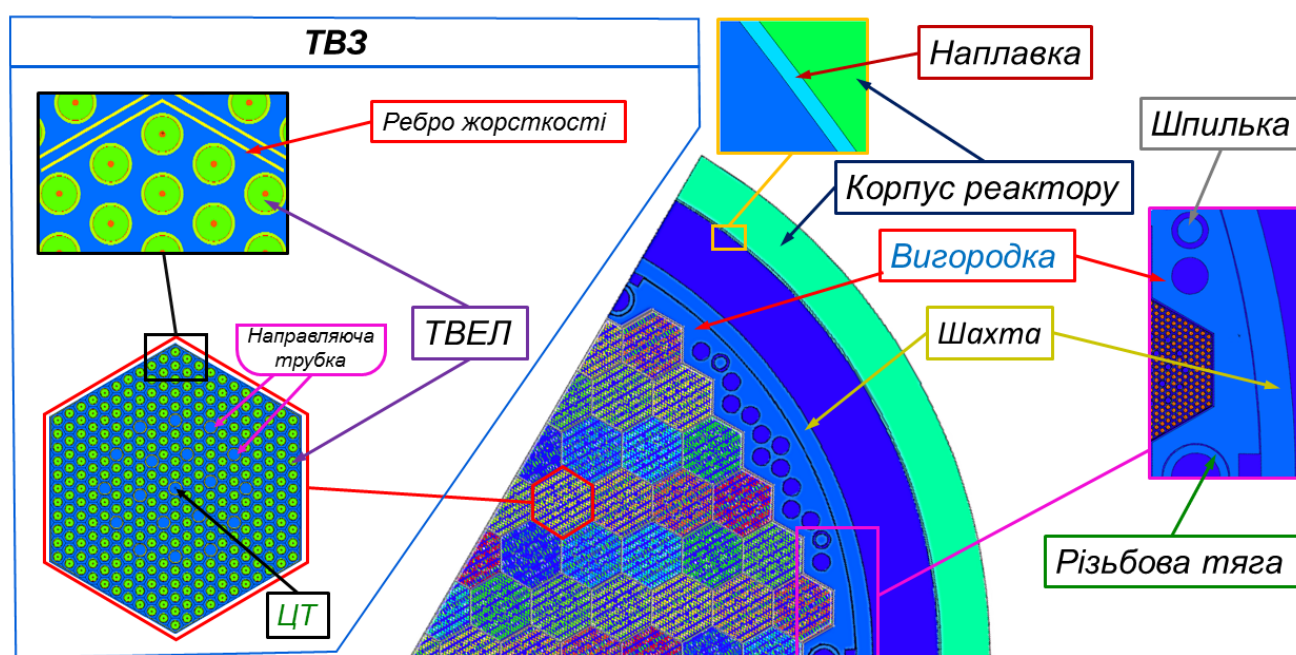


Рис. 3.4 – Загальний вигляд розрахункової моделі транспорту нейтронів та гамма квантів MCNPX

При моделюванні транспорту частинок важливим є врахування усіх особливостей їх взаємодії, які відбуваються в паливних матеріалах, що діляться, та інших конструкційних елементах РУ. Якщо розглядати паливо, то найбільш розповсюдженим процесом є народження частинок внаслідок реакції ділення. При цьому в даному процесі яскраво вираженими є 3 аспекти, які потрібно враховувати при моделюванні джерела частинок кодом MCNPX, а саме спектри швидких нейтронів ділення, миттєвих гамма-квантів і гамма-квантів, що запізнюються. Інші види нейтронних і фотонних реакцій, які відбуваються на ядрах атомів палива та конструкційних елементів і безпосередньо впливають на транспорт частинок, а

отже на формування полів енерговиділення, швидкостей набору флюенса та пошкоджуючої дози. Тому для коректного моделювання транспорту нейтронів та гамма-квантів в моделі важливу роль відіграє відтворення транспортним кодом нерівномірності поля макроперерізів взаємодії елементів АкЗ. Таким чином, відповідно до ядерного складу та стаціонарної конфігурації джерела частинок моделі для одного часового перерізу кампанії, імітується одне покоління ділення в АкЗ. Нейтронне поле в вигородці і ШВК формується за рахунок їх витоку із АкЗ через внутрішню поверхню вигородки, а також внаслідок багаторазового розсіювання нейтронів на ядрах металу вигородки.

Поле енерговиділення відповідно формується внаслідок витоку гамма-квантів із АкЗ та їх взаємодії з металом вигородки і ШВК завдяки 3 процесам: фотоефекту, комптон-ефекту і народження електрон-позитронних пар. Тому від коректності задання джерела частинок і ізотопного складу палива залежить коректність отримуваних результатів полів енерговиділення, а також швидкості набору флюенса і пошкоджуючої дози. Для врахування вищеперерахованих процесів в моделі прийнята наступна концепція згідно пунктів:

- Основне джерело - стаціонарне джерело нейтронів, яке представляє собою швидкі нейтрони ділення, поле яких формується по-твельно, відповідно до інженерного аналізу (п. 3.1) паливних кампаній з урахуванням середнього спектру ділення нейтронів по всій моделі АкЗ та нерівномірності середнього виходу нейтронів і енергії ділення.

- При поглинанні нейтрона в паливному матеріалі моделі він інтерпретується як реакція ділення без народження швидких нейтронів, але з народженням миттєвих гамма-квантів. Таким чином враховується процес народження миттєвих гамма-квантів в процесі ділення.

- Гамма-кванти, що запізнюються, враховуються шляхом додавання до нейтронного джерела фотонного джерела із спектром згідно із [59] та з урахуванням середнього їх виходу на одне ділення.

Серед ізотопів, які напруцьовуються при вигорянні палива, можна виділити наступні, що є найбільш впливовими в процесі переносу частинок: ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U ,

^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{149}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Sm , ^{131}Xe , ^{135}Xe , ^{16}O . Дані ізотопи напрацьовуються в найбільших, порівняно з іншими ізотопами, концентраціях, а тому основна частина реакцій відбувається саме на цих ядрах і інші ізотопи вклад яких є несуттєвим враховувати недоцільно. Таким чином в моделі враховуються основні особливості нейтронного та фотонного полів в АкЗ реактора. Матеріальний склад конструкційних елементів ТВЗ заданий відповідно до [60-61].

Початковий вибір способу детектування величин у відповідних областях вигородки та ШВК проводився посилаючись на досвід виконання аналогічних робіт спеціалістами ÚJV Řež [45], а. s., ІЯД НАНУ [56] та ЦПАЗ ХФТІ [57]. Розглядалися варіанти отримання величин:

- за допомогою розбиття геометричної області повторювальною структурою;
- вбудованими алгоритмами отримання величин в точках (точкові детектори);
- в об'ємах, у яких один із геометричних параметрів достатньо малий для того, щоб вважати їх точками;
- за допомогою структурної сітки, що складається із елементарних детекторних об'ємів (сітковий детектор, аналог розрахункових сіток в подальших аналізах теплогідравліки та міцності).

Спочатку розглядався варіант із розбиттям розрахункової області вигородки та ШВК за допомогою повторювальних структур на прямокутно-призматичні елементи із однаковими теплофізичними та нейтронно-фізичними властивостями відповідно до того, як було реалізовано в роботах по розрахунку енерговиділень за допомогою коду MCNPX спеціалістами ЦПАЗ ХФТІ [57, 62]. Незважаючи на те, що при такому способі задання детекторної області час розрахунку найменший в порівнянні із іншими способами детектування, проте даний спосіб найбільш складний в технічній реалізації, що також значно ускладнює проведення аналізу чутливості максимуму величини до дискретизації розрахункової області. Спосіб отримання величин в точках за допомогою вбудованих математичних методів [63] точковими детекторами, як було реалізовано в роботах по розрахунку умов

опромінення ВКП, неприйнятний по причині найбільшого розрахункового часу порівняно із іншими методами, що не є раціональним. Метод отримання результатів в об'ємах, у яких один із геометричних параметрів є достатньо малим для того щоб вважати їх точками, є прийнятним з точки зору раціональності розрахункового часу. Проте, порівнюючи цей метод із методом сіткових детекторів, можна зазначити наступне. Виходячи із попередніх тестів отримання величини в точці за допомогою сіткового детектору із базовим розбиттям по радіусу і азимуту відповідно 31×262 та за допомогою циліндричного об'єму по висоті моделі з достатньо малим радіусом, щоб вважати його точкою, результати практично не відрізняються (Табл. 3.1), але, при зменшенні радіусу циліндричного об'єму, значно зростає статистична похибка, яка компенсується шляхом збільшення кількості змодельованих історій транспорту частинок і, як наслідок, збільшення розрахункового часу.

Табл. 3.1 – Результати попередніх тестів отримання величини в точці за допомогою сіткового детектору та циліндричного об'єму

Циліндричний об'єм	Радіус, см	Відносна швидкість набору флюенса	Статистична похибка, %	Координати в моделі MCNPX		К-ть історій
				X	Y	
Циліндричний об'єм	1.5	1.01	0.67	152.2	0.00	10^7
	1.0	1.00	0.79			
	0.5	0.99	1.05			
	0.1	0.99	2.09			
	0.01	1.00	5.87			
Детекторна сітка		1.00	1.09			

Методи детектування в точках доцільно використовувати для уточнення значень локальних величин, але для отримання полів вони не є раціональними в силу їх значних затрат по розрахунковим ресурсам і необхідності застосування

додатково алгоритмів відновлення полів при пост-обробці результатів. Тому в моделі прийнята концепція отримання полів величин за допомогою сіткових детекторів, а результати в точках отримуються за допомогою процедури адаптації результатів описаної в п 3.3.

Загалом в MCNPX представлені 3 види структурованих детекторних сіток, що дозволяють отримувати результати в 3-х системах координат: прямокутна декартова, циліндрична, сферична. Серед них тільки декартова і циліндрична детекторні сітки підходять для двовимірної моделі. Проте, так як вигородка і ШВК – тіла циліндричної форми, то найбільш раціональним з точки зору «ефективних» вузлів є отримання результатів за допомогою циліндричного сіткового детектору в r - θ геометрії, що забезпечує перекриття всієї детекторної області з мінімальною кількістю елементів, які знаходяться за її межею. Отримуванні величини в кожному елементарному об'ємі сіткового циліндричного детектору є середньо-об'ємними без прив'язки до геометрії модельованої області. Це означає, що, у випадку попадання елементарного об'єму на границю розділу двох середовищ, значення величини в ньому формується з урахуванням парціальних об'ємів цих середовищ, а тому вона може бути дещо заниженою або завищеною відносно значення на границі, якщо підходити до неї від одного із середовищ. Із зменшенням розміру елементарного об'єму сіткового детектору і зменшенням об'ємної фракції одного із середовищ на границі їх розділу значення отримуваної величини асимптотично прямує до значення на границі (сіткова збіжність результатів). Проте, при збільшенні дискретизації детекторної області, зростає витрата розрахункових ресурсів та статистична похибка, що негативно позначається на часі та статистичній збіжності розрахунку. Припускаючи, що максимумами розрахункових величин знаходяться на границі розділу «вигородка – активна зона», важливим є питання дискретизації в даній області. Тому, для оцінки їх чутливості до щільності дискретизації детекторної сітки, було проведено серію тестових розрахунків енерговиділення із комбінаціями розбиття сітки на 30, 100, 300, 400, 500 елементів по радіусу та 262, 524, 750, 1000 елементів по азимуту. Тестові розрахунки проводилися із змодельованою кількістю історій транспорту частинок рівною 10

млн. Результати розрахунку із відносною статистичною похибкою та відносним часом розрахунку представлені на Рис. 3.5.

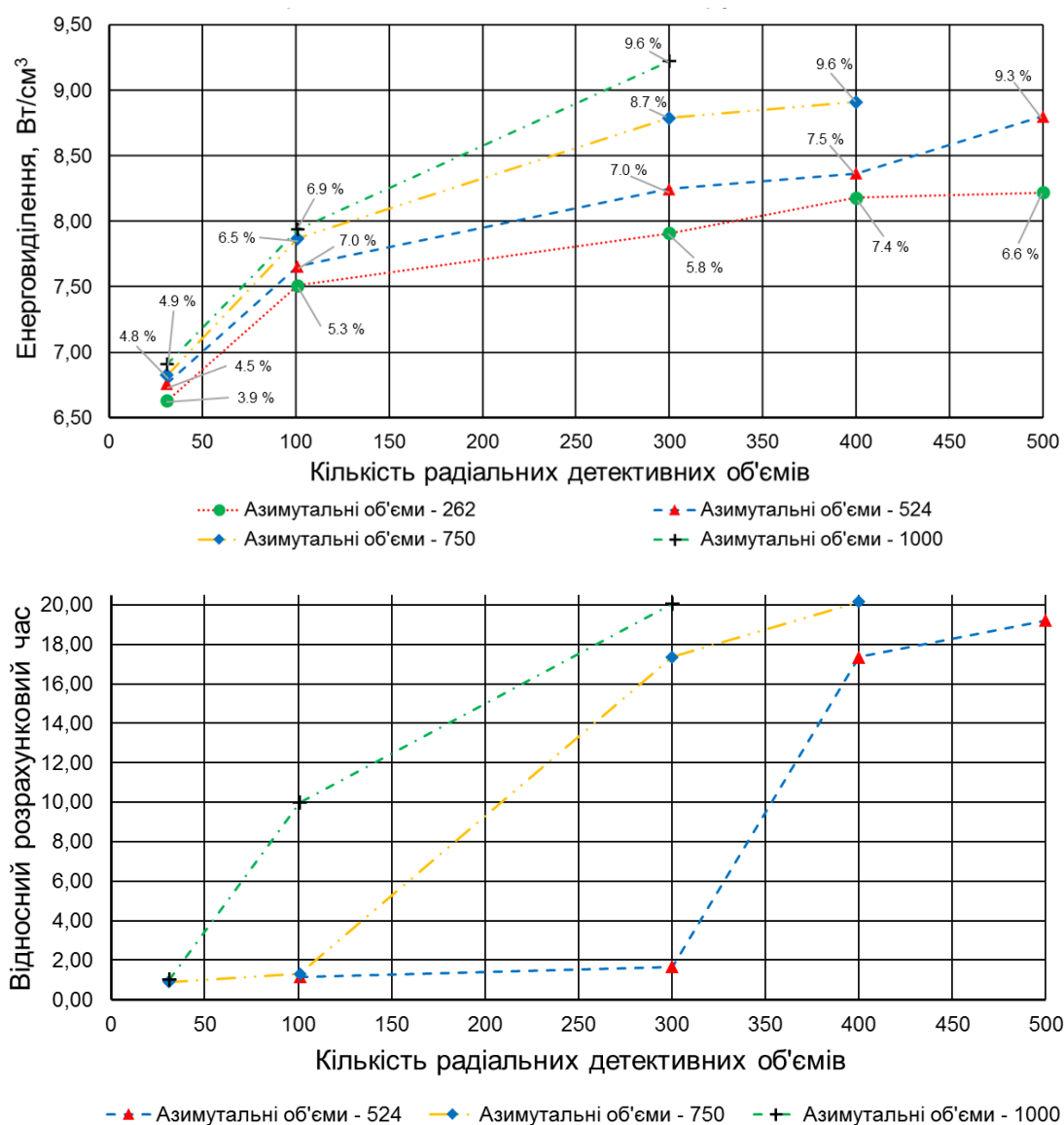


Рис. 3.5 – Результати тестових розрахунків енерговиділення на чутливість максимуму величини до густини дискретизації детекторної сітки

Референтною тривалістю розрахунку є час розрахунку при вибраній фінальній детекторній сітці. В межах статистичного відхилення величина слабо чутлива до азимутальної дискретизації і більш чутлива до радіальної. Із зменшенням радіального розміру сіткового елементу, зростає статистична похибка, що дещо ускладнює кількісний аналіз результатів. Проте якісно величина починає

коливатися навколо середнього значення починаючи із кількості елементів по радіусу рівною 300 із відхиленням в межах 10%, що свідчить про асимптотичне наближення величини до значення на границі розділу середовищ. Тому далі зменшувати радіальний розмір елементу не є раціональним, як з точки зору точності розрахунку, так і часу розрахунку. Проте не всі області розрахункової моделі потребують більшої густини дискретизації. Такими областями є граничні області вигородки із активною зоною, де спостерігається максимум величини енерговиділення. З точки зору точності розрахунку і витрати розрахункових ресурсів раціонально ущільнити детекторну сітку тільки біля зони поділу «активна зона – вигородка», а в інших зонах застосовувати менш щільну сітку. Тому, виходячи із результатів затраченого часу (Рис. 3.5), для приграничної області була вибрана детекторна сітка із азимутальною кількістю елементів рівною 524 та 50 радіальними елементами до граничного радіуса 155 см, що еквівалентно детекторній сітці 300x524 для всієї детекторної області, а починаючи із радіуса 155 см і до зовнішнього радіуса ШВК застосовується сітка із еквівалентним розбиттям 100x262.

Таким чином, для розрахунку полів енерговиділення, швидкостей набору флюенса і пошкодженої дози, створена комбінована сітка, яка дозволяє зменшити статистичну похибку у внутрішніх областях ШВК і вигородки, та із достатньою точністю наблизитись до значень величин на границі розділу середовищ «вигородка – активна зона» (максимуму) референтних підобластей детекторної області. Фрагмент такої комбінованої сітки представлений на Рис. 3.6.

Результати величин, отримані за допомогою методу Монте-Карло, є усередненими по всій кількості змодельованих подій, що мають ймовірнісний характер. Усереднений результат буде наближатися до реального із розміром вибірки величини прямоючим до нескінченості. При цьому парціальний вклад кожної величини в загальний результат прямує до нуля. Тому, одним із основних факторів, що впливають на точність результатів розрахунку методом Монте-Карло, є загальна кількість змодельованих історій транспорту частинок (аналіз статистичної збіжності).

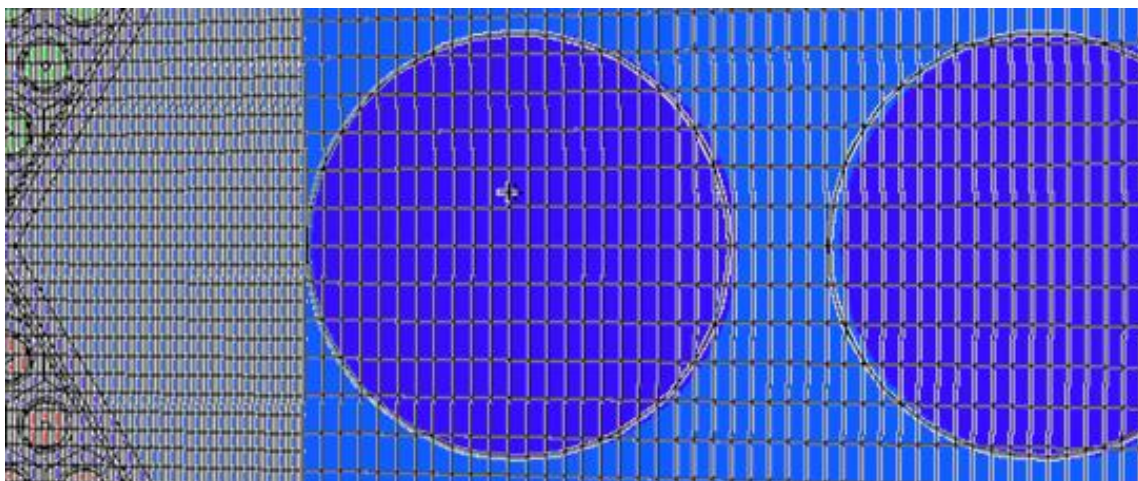


Рис. 3.6 – Фрагмент комбінованої детекторної сітки

Вибірка формується шляхом моделювання історій транспорту частинок і для забезпечення достатньої точності розрахунку необхідно відповідно забезпечити і достатню вибірку. Але, із зростанням кількості змодельованих історій транспорту частинок, прямопропорційно зростає і витрата обчислювальних ресурсів. Тому, для досягнення компромісу між точністю розрахунку і витраченими часовими ресурсами, було проведено серію тестових розрахунків для кількості історій $10 \cdot 10^6$, $50 \cdot 10^6$ та $100 \cdot 10^6$ відповідно. Результати розрахунків величин енерговиділення, швидкостей набору флюенса і пошкоджуваної дози представленні на Рис. 3.7.

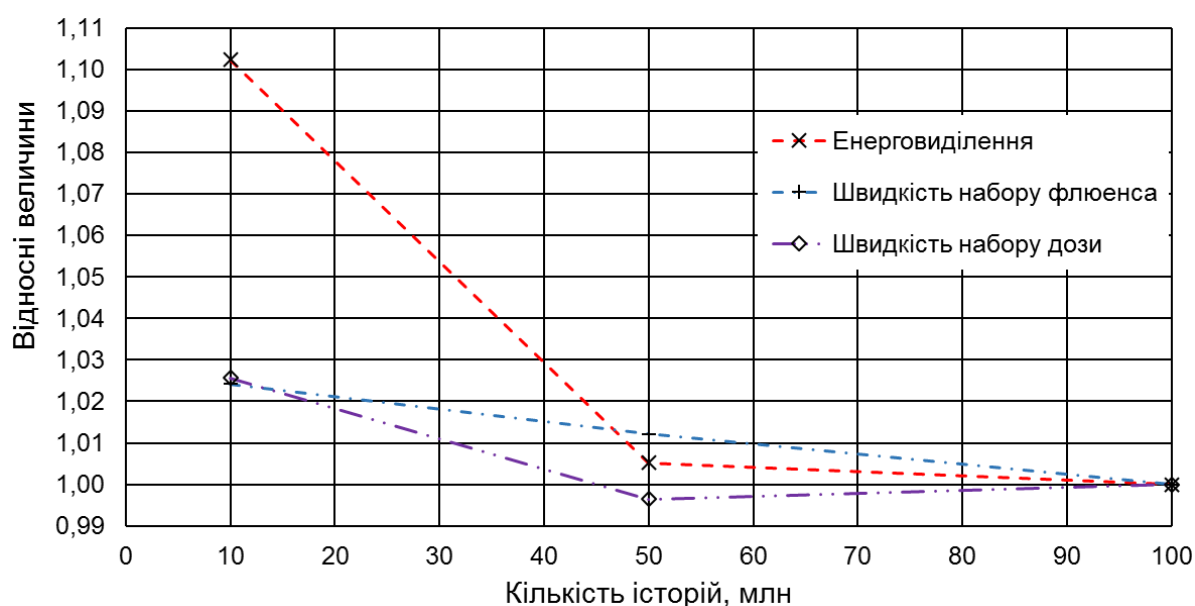


Рис. 3.7 – Результати тестових розрахунків на статистичну збіжність

Відносне відхилення величин не перевищує 1.5 % починаючи із $50 \cdot 10^6$ історій, що говорить про те, що розраховані величини асимптотичного приближаються до певного значення із зростанням кількості історій. При цьому статистична похибка зменшується внаслідок зростання загальної вибірки в кожному детекторному об'ємі.

Величини енерговиділень і швидкості набору флюенса в MCNPX отримуються за допомогою вбудованих інструментів самого коду (Tally) з використанням бібліотек оцінених ядерних даних ENDF/B-VII в ACE-форматі. В силу складності механізму утворення радіаційних дефектів в решітках металів вони враховуються шляхом модифікації спектральної функції нейтронного потоку області реєстрації перерізами зміщення на атом. Відповідно, якщо відомий спектр в області реєстрації, то швидкість накопичення пошкоджуваної дози в одиницях ЗНА (зміщень на атом) даної області можна визначити за наступною формулою:

$$\frac{dF}{dt} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \Phi(E) dE \quad (3.7a)$$

$$\frac{dD}{dt} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \sigma_d(E) \Phi(E) dE, \quad (3.7b)$$

де $\sigma(E)$ – переріз зміщення на атом, ЗНА·барн; $\Phi(E)$ – спектральна функція потоку нейтронів, н/(см²·с); E_{\min}, E_{\max} – відповідно мінімальна і максимальна енергія спектру нейтронів в реєстраційній області.

У розрахунках пошкоджуваної дози енергії нейтронів для знаходження ЗНА брались по всьому спектру. Значення перерізів зміщення на атом $\sigma(E)$ для заліза в сталі задавалися згідно міжнародній бібліотеці по реакторній дозиметрії IRDF-2002 (International Reactor Dosimetry File) [64].

Зовнішня поверхня вигородки не є гладкою циліндричною, так як на ній присутнє оребрення для інтенсифікації теплообміну, яке впливає також і на нейтронне і фотонне поля в області зазору між вигородкою і ШБК, що в свою чергу

відображається на полях енерговиділення, швидкостей набору флюенса і пошкодженої дози. У процесі виготовлення та експлуатації реактора величина зазору між периферійними ТВЗ і внутрішньою граненою поверхнею вигородки змінюється, що також впливає на картину нейтронного і фотонного полів. Всі вище перелічені фактори не можуть бути одночасно враховані у двовимірній моделі в силу відсутності аксіального напрямку. Тому із всіх варіантів вибору перерізу вигородки та зазору важливо обрати такий, що із запасом перекриває всі неточності розрахунку. Із цією метою було проведено серію розрахунків 4-х наступних варіантів геометрії, комбінації яких разом із результатами розрахунків представлено в Табл. 3.2.

Табл. 3.2 – Результати тестових розрахунків оцінки впливу величини зазору та референтного перерізу вигородки

№	Зазор між вигородкою і периферійною ТВЗ, мм	Переріз із ребром	Відносне енерговиділення		Відносна швидкість набору флюенса		Відносна швидкість набору пошкоджуючої дози	
			Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave
1	4	+	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0	+	0.86	1.01	1.05	1.10	1.11	1.12
3	4	-	1.00	0.99	1.00	0.98	1.00	0.96
4	0	-	0.86	1.00	1.05	1.07	1.11	1.09
Max – максимальне значення по вигородці і ШВК Ave – середнє значення по вигородці і ШВК + – переріз вигородки на рівні ребра на зовнішньої поверхні - – переріз вигородки на рівні кільцевої проточки на зовнішній поверхні								

Виходячи із результатів тестових розрахунків найбільший вплив на референтні значення має величина зазору між периферійними ТВЗ та внутрішньою гранованою поверхнею вигородки. На противагу – референтний переріз вигородки практично не впливає на поля величин в ній, а впливає тільки на поля у ШВК. Тому, при виборі найбільш консервативного варіанту особливу увагу потрібно приділяти

варіантам зі змінним зазором. Найбільш консервативним по величинам швидкостей набору флюенса і пошкоджуваної дози прогнозовано є варіант із відсутнім зазором між ТВЗ та вигородкою, а по величині енерговиділення – із максимальним зазором. Проте, такий варіант не розглядається, оскільки він є фактором подальшої експлуатації, і закладати його наявність в якості консерватизму некоректно. Враховуючи те, що з точки зору середніх значень варіант, який враховує ребро більш навантажений (з точки зору швидкості набору флюенсу та дози), то геометрична конфігурація із наявними ребрами охолодження дає більш консервативну оцінку, принаймні для ШВК.

3.3 Процедура адаптації результатів для подальшого аналізу

Детальний розрахунок енерговиділення, швидкості набору флюенсу та пошкоджуваності відбувається у двовимірному наближенні. Таким чином, постає питання щодо подальшої застосовності отриманих результатів у тривимірних моделях теплогідравліки та міцності.

В загальному випадку, кожен з параметрів можна представити узагальнюючою функцією (3.8), яка за своєю суттю є синтезом двовимірних даних $\Psi_{MK}(r, \Theta)$ отриманих МК моделлю, та аксіального профілю $f_{експ}(z)$, який формується на основі експлуатаційних даних.

$$\Psi(r, \Theta, z) = A \cdot \Psi_{MK}(r, \Theta) \cdot f_{експ}(z) \quad (3.8)$$

Коефіцієнт A може трактуватися як коефіцієнт запасу, або ж амплітудне значення у випадку перенормування функції $\Psi_{MK}(r, \Theta)$.

Питання вибору аксіального профілю більш складне. По-перше, згідно з експлуатаційними даними, аксіальний профіль відомий лише для висоти активної зони. По-друге, аксіальний профіль енерговиділення в активній зоні, строго кажучи, не зберігається в металі ВКП і, ймовірно, змінюється в радіальному

напрямку для кожного з параметрів (енерговиділення, швидкість набору флюенсу та дози). До того ж, можливо є певна відмінність в профілях теплової і нейтронної потужності. Як вже зазначалося раніше, на другому кроці (відповідно до схеми, зображеної на Рис. 3.1), де відбувається аналіз паливної кампанії, формуються аксіальні профілі. Додатково розраховується «представницький» профіль, який за своєю суттю відображає $f_{ref}(z)$ характер накопичення в аксіальному напрямку за весь час паливної кампанії. На Рис. 3.8 представлено порівняння профілів енерговиділення та нейтронного джерела. Як видно, принаймні у першому наближенні, можна прийняти, що профілі енерговиділення та нейтронної потужності однакові.

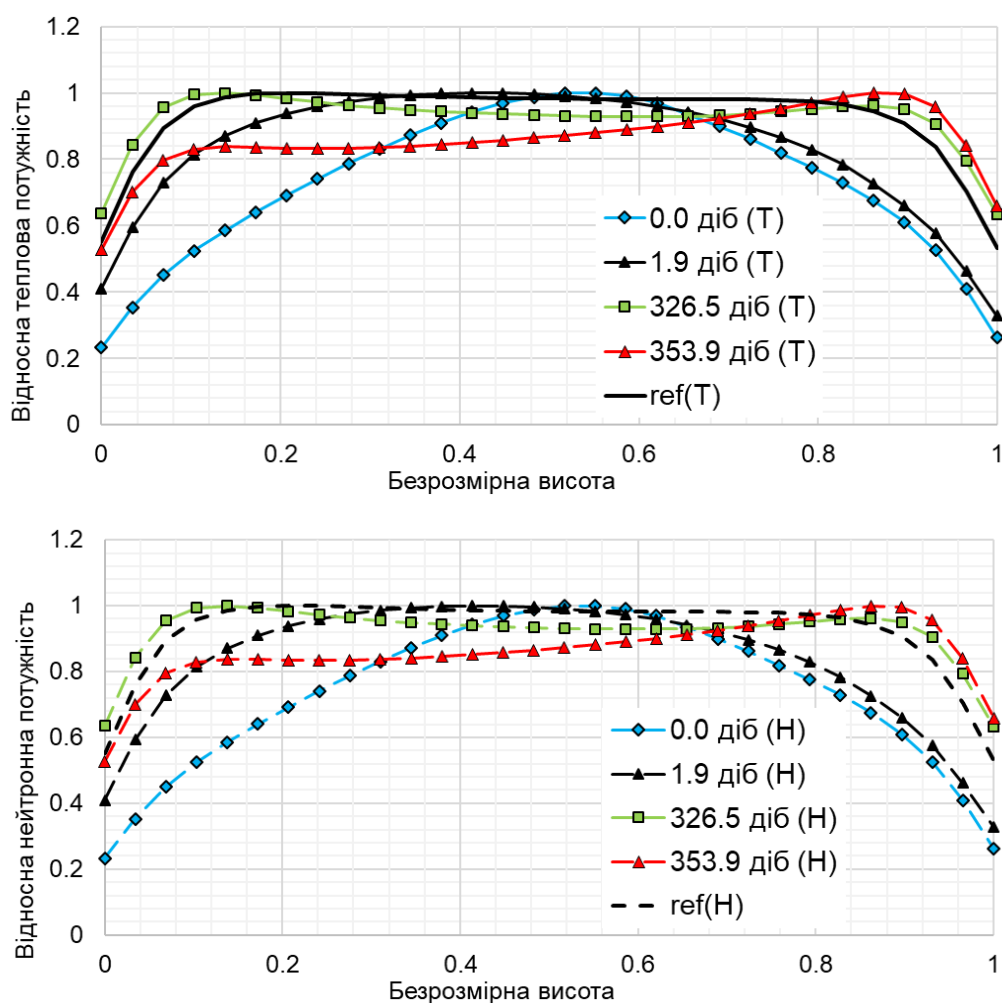


Рис. 3.8 – Аксіальний розподіл теплової та нейтронної потужності референтного сектору

Оскільки існують певні невизначеності (наприклад крайові ефекти), то для визначення профілю $f(z)$ були прийняті наступні припущення:

- Профіль зберігається в радіальному напрямку (для вигородки, різьбової тяги та ШВК).
- Ефекти відбиття на торцях активної зони не враховуються у зміні форми аксіального профілю
- Для того, щоб була можливість оцінити $\Psi(r, \Theta, z)$ по всій висоті вигородки та різьбової тяги, а також врахувати наявність крайових ефектів, консервативно екстраполяція профілю відбувається таким чином, щоб на нижньому торці гранованого поясу (-135 мм від нижнього торця вигородки), та на висоті +135 мм від верхнього торця вигородки, значення профілю були рівними 0.0.
- Для кожного часового зрізу використовується індивідуальний профіль (якщо в подальшому аналізується конкретний часовий зріз), який формується згідно з експлуатаційними даними. Для оцінки накопичувальних величин використовується профіль $f_{ref}(z)$.

Відносно останнього пункту є декілька основних причин. Питання відносно представницького часового зрізу для радіаційного енерговиділення може бути проаналізовано на етапі теплогідрравлічного аналізу охолодження вигородки та її елементів. Справа в тому, що позиція максимуму функції радіаційного енерговиділення в загальному випадку змінна в часі величина. Так, наприклад, для 30-ї кампанії прогнозний максимум енерговиділення відповідає 326.5 добам (згідно з попередньою оцінкою). В той самий час, як видно з аксіального профілю (Рис. 3.8), максимум знаходиться в нижній частині активної зони, де температура теплоносія нижча, ніж у верхній, а отже, і температура металу також очікувано буде нижчою (як максимальна, так і середньооб'ємна). Саме тому, вид аксіального профілю має важливе значення для подальшого аналізу. До того ж, згідно з аналізом обраних паливних кампаній, енергоблок працює зі зміною потужності, тобто змінюється і швидкість набору флюенсу, а отже, і дози. Тому кращою оцінкою сумарного опромінення за паливну кампанію буде інтеграл в часі від

характеристичної кривої (витік нейтронів, див. наприклад Рис. 3.3), що фактично є площею під цією кривою. У загальному залежність, за якою розраховувалася накопичувальна величина, можна представити співвідношенням (3.9).

$$F_{\Sigma}(r, \Theta, z) = A \cdot \left(\frac{dF(r, \Theta)}{dt} \right)_{MK}^{ref} \cdot f_{ref}(z) \cdot \int_{0.0}^T \Pi_{ref}(t) dt \quad (3.9a)$$

$$D_{\Sigma}(r, \Theta, z) = A \cdot \left(\frac{dD(r, \Theta)}{dt} \right)_{MK}^{ref} \cdot f_{ref}(z) \cdot \int_{0.0}^T \Pi_{ref}(t) dt \quad (3.9б)$$

Співвідношення прийнятого аксіального профілю $f(z)$ з геометричною висотою вигордки, її елементів, а також ШВК схематично представлено на Рис. 3.9.

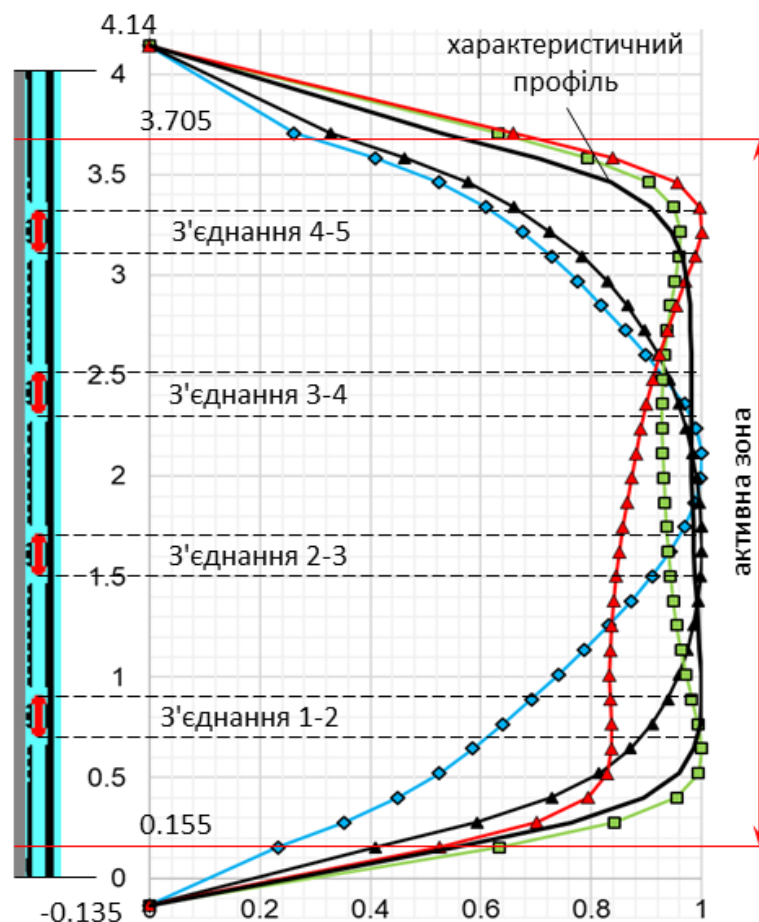


Рис. 3.9 – Схематичне співвідношення прийнятого аксіального профілю з геометрією елементів ВКП

Функції $\Psi_{MK}(r, \Theta) = \left(\frac{dF(r, \Theta)}{dt} \right)_{MK}^{ref}$ та $\Psi_{MK}(r, \Theta) = \left(\frac{dD(r, \Theta)}{dt} \right)_{MK}^{ref}$, це, відповідно,

швидкості набору флюенсу та дози, які вважаються представницькими для кампанії, що аналізується. $\Pi_{ref}(t)$ - це референтний профіль зміни витоку у часі, який формується наступним чином. За результатами попереднього аналізу кампанії, для флюенсу (з точки зору максимуму) представницькою є часова точка, яка обирається за параметром $efFlux_i^{max}$. Оскільки для кожної часової точки обирається індивідуальний сектор, який в загальному різний для всіх проміжків часу, то $\Pi_{ref}(t)$ доцільно обрати як максимальну величину $efFlux_i^{max}$ для даного часового кроку. Проте, попередній аналіз показав, що умовна площа під кривою теплової потужності секторів $\sim 0.5-4.0\%$, більша, ніж під іншими кривими. Тому, консервативно обирається максимальне значення серед трьох інтегралів по часу:

$$\int_{0.0}^T \Pi_{ref}(t) dt = \max \left(\int_{0.0}^T \max [Power_i(t)] dt, \int_{0.0}^T \max [efFlux_i^{ave}(t)] dt, \int_{0.0}^T \max [efFlux_i^{max}(t)] dt \right) \quad (3.10)$$

Для коректного застосування (3.10), значення $Power_i, efFlux_i^{ave}, efFlux_i^{max}$ для кожного сектора перенормовуються на амплітудне значення, яке рівне одиниці. На Рис. 3.10 представлена схематизація розрахунку накопичувальних величин (флюенс, доза).

Таким чином, розрахункову підпрограму транспорту нейтронів можна використовувати безпосередньо для мультифізичного аналізу конкретної часової точки паливної кампанії, або ж узагальнюючи конкретну паливну кампанію. За розрахунковими затратами перший спосіб є найменш оптимальним, проте в деяких випадках є необхідним при аналізі.

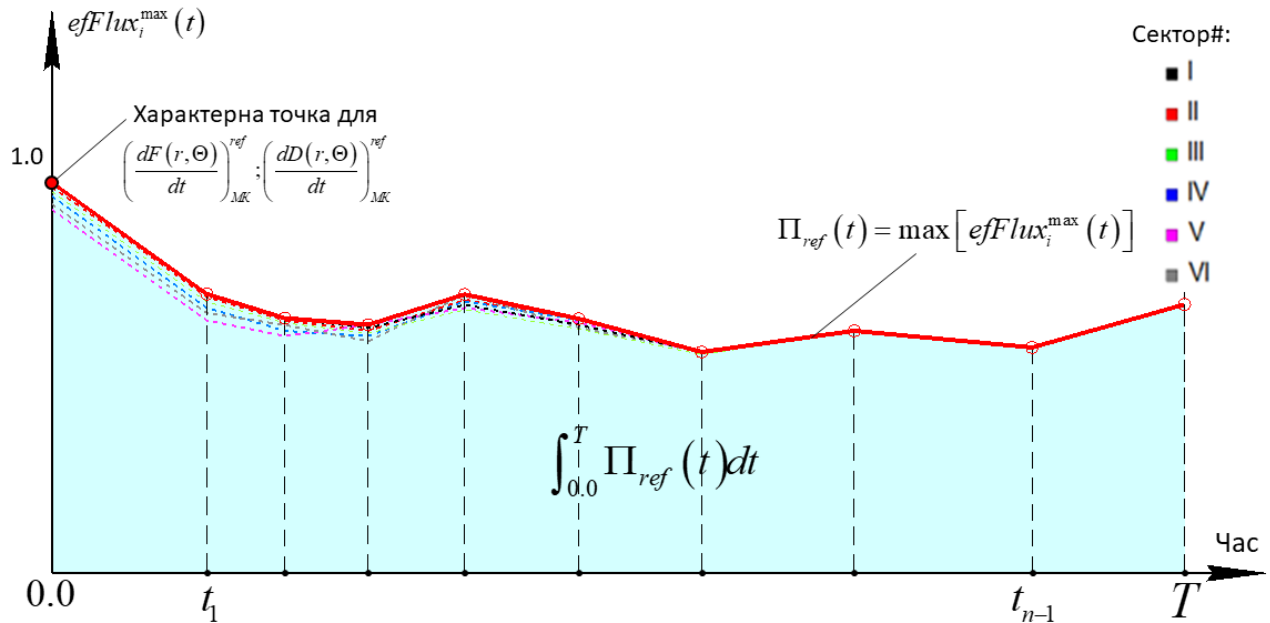


Рис. 3.10 – Схематизація розрахунку сумарного опромінення для обраної паливної кампанії на прикладі величини $efFlux_i^{max}$

3.4 Аналіз взаємозв'язку амплітудних значень з параметрами паливної кампанії

У загальному випадку енерговиділення, швидкість набору флюенсу та дози є нелінійними величинами від інтегральних умов зі сторони активної зони. Тим не менш, при подальшому аналізі (наприклад, для умов охолодження елементів ВКП при перехідних процесах зі спрацюванням аварійного захисту) досить зручно користуватися коефіцієнтом, який би масштабував результати залежно, наприклад, від теплової потужності реактора. До того ж, це дасть можливість обґрунтувати використання досить простої оцінки накопичувальних величин (Рис. 3.10). Згідно з інженерним аналізом паливних кампаній, проведеного в п. 3.1, до обраних характерних часових точок обов'язково додаються початковий та кінцевий моменти кампанії. Іноді референтні часові точки співпадають з початковою/кінцевими, проте, принаймні одна точка відповідатиме зменшеній тепловій потужності.

На Рис. 3.11 представлені залежності амплітудних та середніх значень полів опромінення від інтегральних характеристик активної зони (теплова потужність) та сектору ($Power_i, efFlux_i^{ave}, efFlux_i^{max}$).

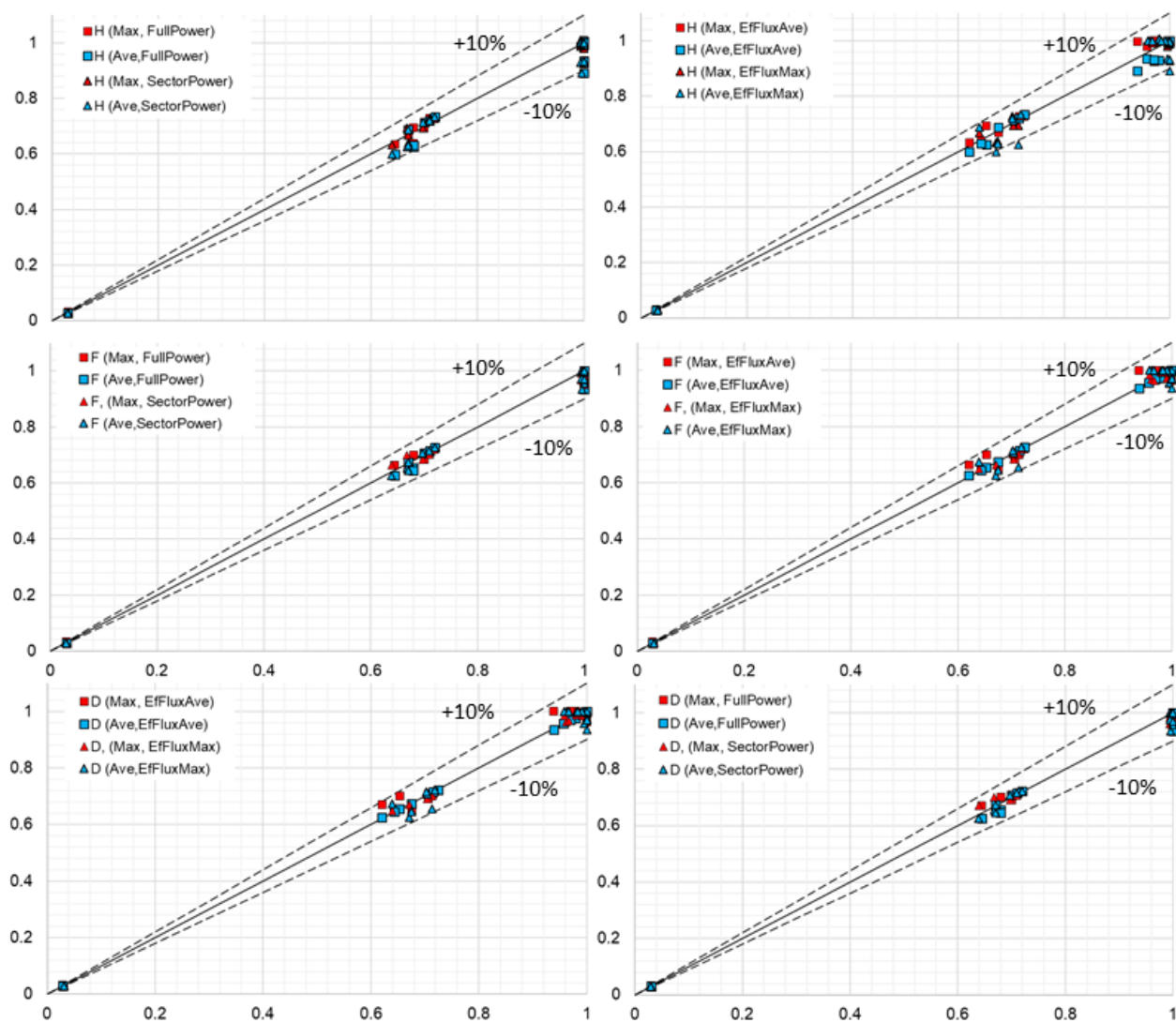


Рис. 3.11 – Залежність амплітудних та середніх значень полів опромінення від інтегральних характеристик АкЗ (Н – енерговиділення, F – швидкість набору флюенсу, D – швидкість набору дози)

Із приведених результатів видно, що відхилення нормованих значень від лінії типу ($y=x$) не перевищує $\pm 10\%$. Тобто, в межах похибки, яка не перевищує 10% , можна використовувати залежності (3.8)-(3.9), з використанням коефіцієнту $A=1 \div 1,1$. На Рис. 3.12 представлені перевіірочні результати для паливної кампанії,

з яких видно, що відхилення не перевищує 7.8%. В якості опорних полів були прийняті значення для 1.91 діб кампанії (3000МВт), а масштабувалися початок кампанії (90 МВт) , та кінець кампанії (2130 МВт).

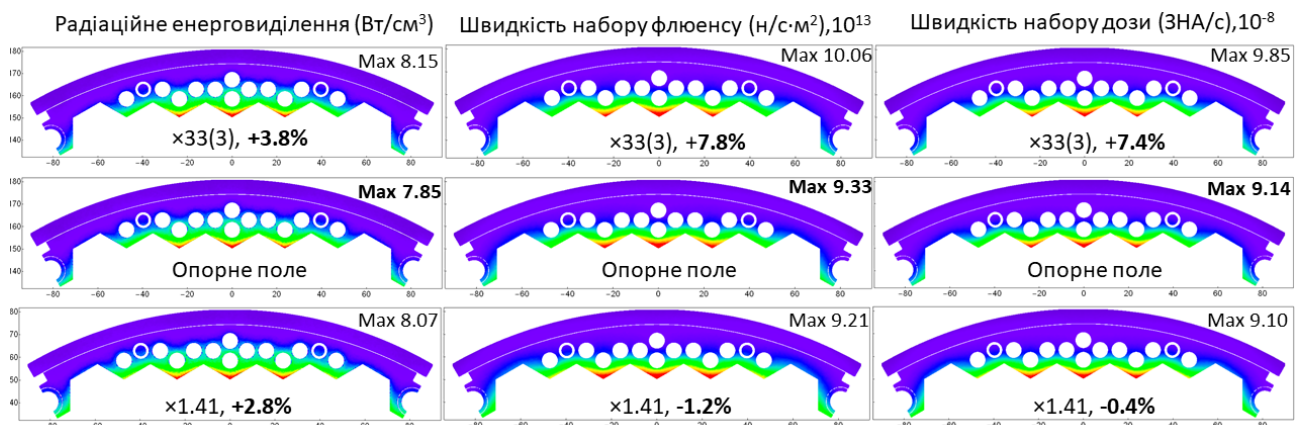


Рис. 3.12 – Залежність амплітудних та середніх значень полів опромінення від інтегральних характеристик АкЗ

На основі отриманих полів можна зробити ґрунтовні висновки відносно того, що застосовувати профіль теплової потужності для референтних полів доцільно, а очікувана похибка не перевищуватиме 10%.

3.5 Концепція параметричних функцій

Під час зміни геометрії вигордки у місцях радіального перетоку відбувається зміна властивостей сповільнення радіаційного випромінювання, яке покидає межі АкЗ. Це призводить до того, що збільшується частина високоенергетичного випромінювання, яке взаємодіє з міжкільцевою шпилькою та ШВК, а також з різьбовою тягою. Для врахування даного впливу в розрахунковій моделі транспорту нейтронів та гамма-квантів передбачена можливість задавати індивідуальні властивості матеріального складу та температури для елементарної геометричної ділянки. Для спрощення аналізу приймається, що крайові ефекти на торцях кілець вигордки не враховуються. Таке наближення дає можливість

оцінювати поля випромінення також у двовимірному наближенні і, фактично, застосовувати екземпляри однієї розрахункової моделі при паралельних розрахунках. В цілому, розрахунки з урахуванням нерівномірності матеріального складу є значно складнішими (з точки зору часу розрахунків, особливо, коли йде мова про ітеративне наближення при мультифізичному аналізі). Тому був побудований альтернативний спосіб, який дозволяє отримати параметричну функцію, яка за своєю суттю відповідає фактору зниження/підвищення енерговиділення – Ω і визначається як відношення характеристики радіаційного поля при розкритті до незбуреного значення. Для однозначності та простоти формування фактору Ω обирається один із способів визначення: по максимальному значенню, або по середньому у відповідному поперечному перерізі.

Фактор зміни радіаційного поля Ω залежить від температури теплоносія та металу вигородки, а також від матеріального складу, що визначається геометрією розкриття. Температури визначаються в теплогідравлічному модулі (опис наведено в п.4.2 Розділу 4), а геометрія розкриття, відповідно, у модулі розрахунків на міцність, який в загальному також може бути параметричним. Отже вдається однозначно встановити взаємозв'язок параметричної функції Ω з іншими модулями мультифізичного розрахунку.

Параметричні розрахунки за допомогою транспортної моделі проводилися в межах зміни матеріального складу (масова доля заліза) від 0.0 до 1.0, що відповідає повному розкриттю (0.0), або ж відсутності зміни геометрії (1.0). В першому наближенні в місці розкриття відбувалася гомогенізація металу та теплоносія задля відсутності необхідності введення додаткової змінної, яка б характеризувала нерівномірність розкриття у поперечному перерізі. По температурі функція рівномірно табулювалася в межах 280-480 °C по металу та 280-340 °C по теплоносію. Результати фактору зміни радіаційного енерговиділення для кожного з конструкційних елементів ВКП наведені на Рис. 3.13. (в якості температури наведена температура гомогенізованого матеріалу).

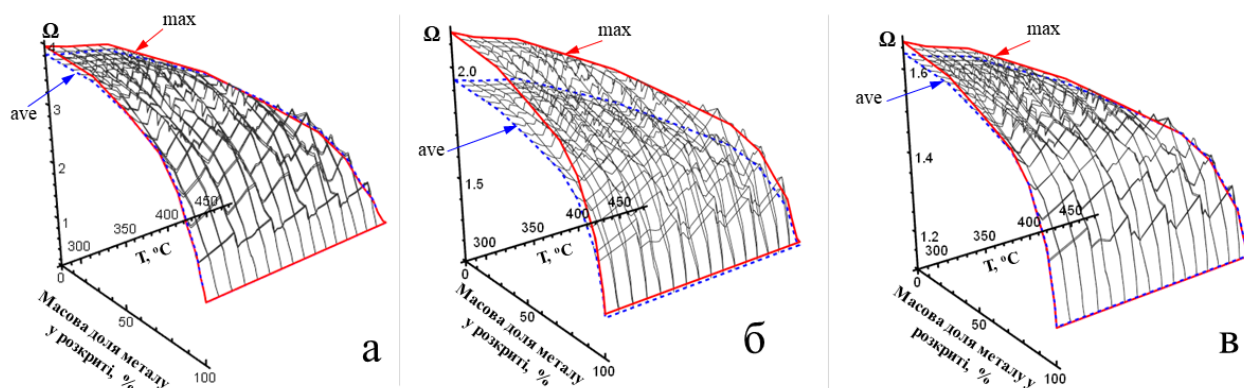


Рис. 3.13 – Параметричні функції фактору зміни енерговиділення (а – шахта, б – з'єднувальні шпильки, в – різбові тяги)

Сформована параметрична функція дозволяє суттєво оптимізувати розрахункові затрати при спряженому аналізі впливу явища деградації геометрії на умови охолодження ВКП.

3.6 Висновки до Розділу 3

У даному Розділі представлено опис ключових складових частин нейтронно-фізичного модулю, який є частиною мультифізичного коду для аналізу впливу деградації геометрії вигородки на зміну умов її охолодження. Розроблений модуль складається з трьох основних частин до яких відносяться: інженерний аналіз паливних завантажень, безпосередньо модель транспорту нейтронів та гамма-квантів і параметричний аналіз. Розроблена досить гнучка система налаштувань, яка дозволяє конфігурувати модуль залежно від типу аналізу, що дає можливість проводити консервативні та реалістичні оцінки з урахуванням можливих радіальних перетоків теплоносія за межі активної зони.

Інженерний аналіз базується на оцінці безрозмірного профілю витоку нейтронів із АкЗ за період опорної паливної кампанії з подальшим вибором опорного сектору для референтної часової точки. Результатом роботи підпрограми аналізу паливного завантаження являється необхідний набір даних, який дозволяє

сформувати характеристики джерела випромінення для транспортної частини модулю. Фактично таким чином відбувається ініціалізація.

Транспортна модель випромінювання базується на Монте-Карло коді MCNPX, та побудована в двовимірній постановці $(r-\Theta)$ з урахуванням необхідності задання нерівномірності температури та матеріального складу. Така модель дає можливість оцінювати амплітудні значення полів випромінення, а також за допомогою підпрограми пост-обробки синтезувати тривимірні $(r-\Theta-z)$ миттєві та накопичені характеристики випромінення, які передаються в теплогідравлічний модуль та модуль розрахунків на міцність.

З метою економії розрахункових ресурсів, що є вкрай важливим при аналізі зв'язаних процесів, передбачена підпрограма генерації набору даних для оцінки впливу деградації геометрії вигородки на функціонали випромінення в металі вигородки. Для цього оцінені фактори зміни енерговиділення в основних елементах ВКП, які залежать від локальної температури теплоносія та металу (зв'язок з теплогідравлічним модулем), а також від співвідношення метал–вода (модуль розрахунків на міцність). Такий підхід дозволяє раціональним чином організовувати зв'язані розрахунки при деградації геометрії для обґрунтування впливу її деградації на зміну умов охолодження ВКП. Основні результати, отримані в даному Розділі опубліковано в роботі [68].

4. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ ПРОЦЕДУРИ СПРЯЖЕНОГО АНАЛІЗУ СТАНУ ВИГОРОДКИ

Аналіз зміни умов охолодження металу вигородки та елементів ВКП внаслідок процесів деградації їх геометрії, виконаний в Розділі 2, показав очевидну наявність зворотнього зв'язку типу «розкриття кілець вигородки – поява радіальних перетоків – локальна зміна умов охолодження металу вигородки – зміна інтенсивності розкриття». Врахування даного зворотнього зв'язку є вкрай важливим з точки зору прогнозування зміни зазорів між кільцями вигородки та внутрішньою поверхнею ШВК, а також з точки зору уточнення оцінки умов охолодження металу вигородки. Обидва ці питання є визначальними при обґрунтуванні перепризначення строку експлуатації енергоблоків вітчизняних АЕС. Проте, застосовувані в Розділі 2 моделі є вкрай важкими з точки зору організації спряжених розрахунків, а, отже, вичерпали себе. По суті, аналіз наявності описаних зворотніх зв'язків є мультифізичною задачею, яка включає взаємозв'язок трьох фізичних модулів – нейтронно-фізичного, теплогідравлічного та міцнісного. В загальному, організація їх спряження та обміну даними може бути представлена у вигляді схеми Рис. 4.1.

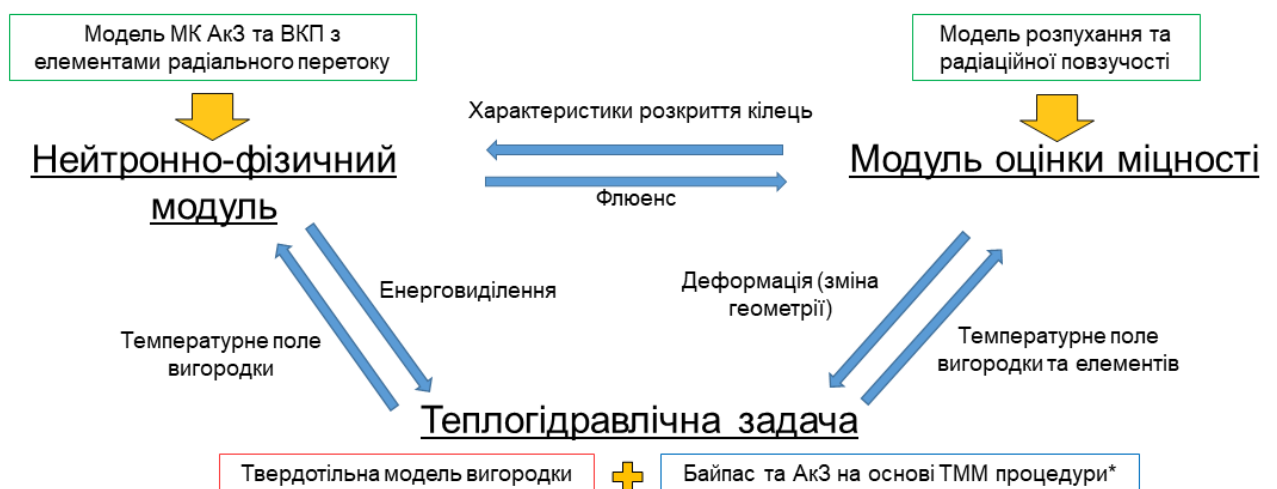


Рис. 4.1 – Концепція спряженого аналізу

Для уточнення отриманих в Розділі 2 результатів по наявним розкриттям кілець, виникненню перетоків та зміні умов охолодження вигородки та елементів ВКП, необхідним є не тільки організація спряження, але й спрощення застосовуваних моделей з точки зору необхідного розрахункового часу.

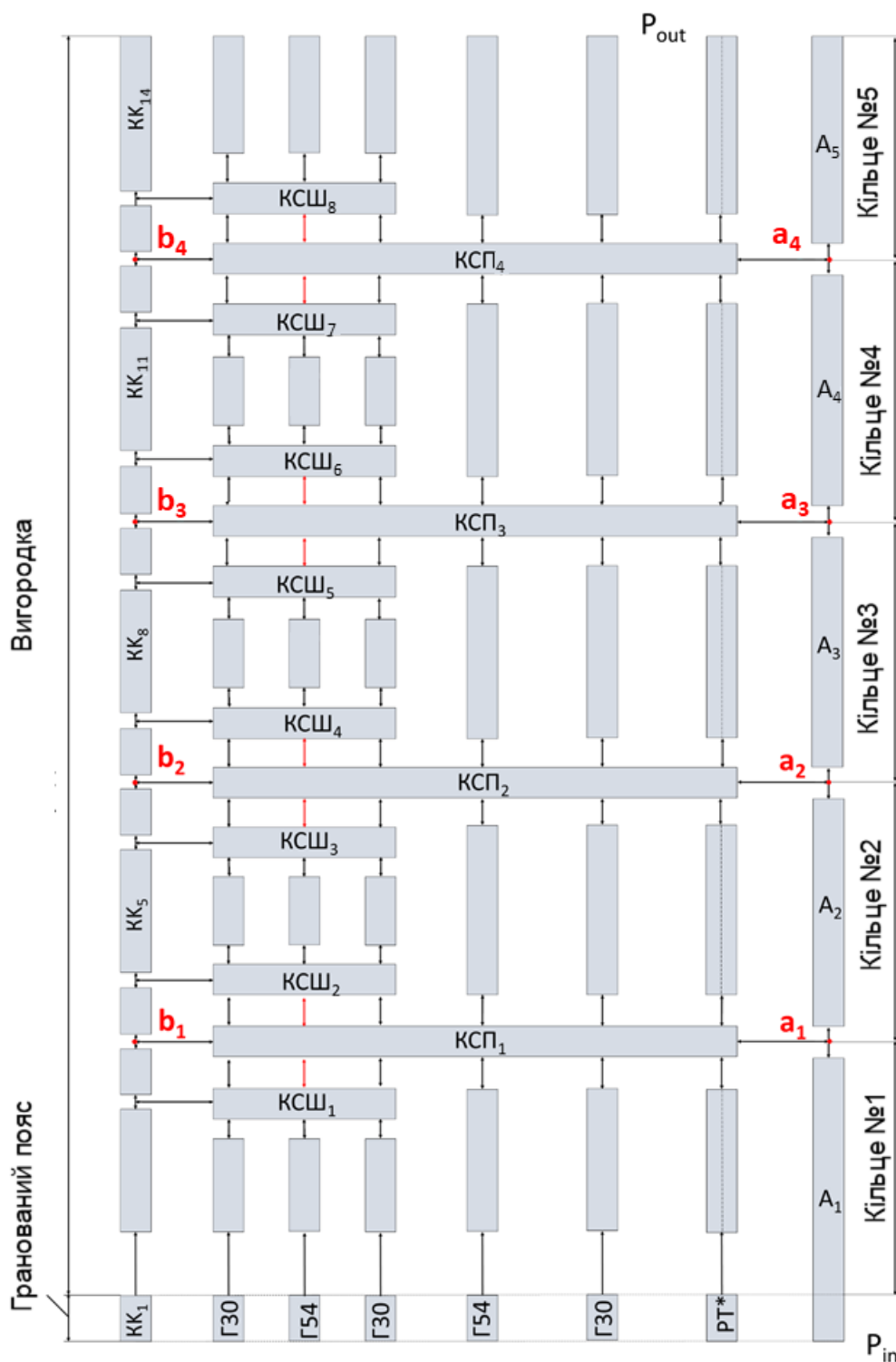
З метою спрощення блоку теплогідрравлічного аналізу загальної процедури спряження (Рис. 4.1), запропоновано розділити його на окремі під-моделі:

- Одновимірна модель байпасу теплоносія, яка базується на використанні чисельних схем Transfer Matrix Method (TMM) з можливістю урахування появи перетоків між кільцями з витратою, що визначається отриманою з міцнісної оцінки деформацією геометрії. Опис одновимірної під-моделі байпасу наведено в п. 4.1.
- Твердотільна модель елементів внутрішньокорпусних пристроїв, що відповідає за моделювання температурного поля вигородки та елементів ВКП. Опис наведено в п. 4.2.
- Уточнена CFD модель активної зони, з наявними інтерфейсами спряження по витратах в радіальні розкриття, опис якої наведено в п. 4.3.

4.1 Одновимірна теплогідрравлічна модель байпасу

Найбільш навантаженою частиною теплогідрравлічної моделі є безпосередньо проточна частина байпасу теплоносія, яку в загальному випадку можна представити в одновимірному вигляді, як це зображено на Рис. 4.2. Таке представлення використано для раціоналізації врахування особливостей перерозподілу потоку при деградації геометрії вигородки, а саме для застосування концепції спряження одновимірного теплогідрравлічного розрахункового аналізу байпасу із твердотільною моделлю елементів ВКП.

Для моделювання байпасу теплоносія пропонується використання чисельного методу передаточних матриць (Transfer Matrix Method – TMM) [72]. Такий підхід дозволяє значно зменшити необхідні розрахункові та часові ресурси для зв'язаного аналізу деградації геометрії вигородки.



Г30/Г54 – групи охолоджуючих каналів із 30/54 отворів
 РТ – різьбова тяга (* з урахуванням розділу потоку)
 Аі – теплоносій зі сторони АкЗ на рівні і-го кільця

ККі – кільцевий канал

КСШі – камери змішування біля міжкільцевих шпильок

КСПі – камера змішування, викликаного розкриттям

Рис. 4.2 – Схематизація байпасу теплоносія в охолоджуючих каналах ВКП з урахуванням можливості появи радіальних перетоків

Розрахункова процедура базується на системі диференціальних рівнянь (3.1), яка сформована з урахуванням наступних особливостей:

- Можливе врахування зміни площі поперечного перерізу каналів в часі.
- Стисливістю середовища нехтуємо.
- Зміна теплофізичних властивостей від температури та тиску не суттєва в межах часового кроку інтегрування.
- Теплопровідність в аксіальному напрямку значно нижча ніж конвективна складова.
- Внутрішня енергія потоку може бути представлена через температуру як $c_p T - \frac{p}{\rho}$.

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\rho w f) = 0 \\ \frac{\partial(\rho w f)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w^2 f) = -f \frac{\partial p}{\partial x} - \xi \rho w |w| P_h \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\rho \left(c_p T - \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} \right) f \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho w \left(c_p T - \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} \right) f \right] = -\frac{\partial}{\partial x}(f p w) - \phi(T, T_{wall}) + \xi \rho w^2 |w| P_h \end{cases} \quad (4.1a)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_c \quad (4.1b)$$

де, $\phi(T, T_{wall})$ - функція теплообміну між внутрішньою поверхнею каналу та потоком теплоносія, яка може бути представлена як $\phi(T, T_{wall}) = P_t \cdot HTC \cdot (T_{wall} - T)$. P_h, P_t - гідравлічний та тепловий периметри відповідно. Температурне поле в металі ВКП розраховується за допомогою твердотільної моделі, описаної в п. 4.2.

За своєю суттю система нелінійних диференціальних рівнянь (4.1a) описує перенос усереднених по радіусу характерних параметрів (маси, імпульсу, повної енергії) неізотермічного однофазного середовища і може бути отримана безпосередньо із системи рівнянь Нав'є-Стокса. Сама структура таких рівнянь є основою системних кодів типу RELAP [69], детальний опис, а також

альтернативний спосіб одержання системи рівнянь одновимірної постановки неізотермічної течії однофазного середовища можна знайти в [70, 71].

Коефіцієнти гідравлічного опору ξ та тепловіддачі HTC являються складними функціями координати, а також середніх характеристик потоку, що додатково ускладнює постановку.

Розв'язок системи (4.1a) базується на спряженому гібридному підході, в якому рівняння теплопровідності вирішується за допомогою моделювання твердотільних моделей в тривимірній постановці (див. п. 4.2), а рівняння переносу неізотермічної течії (4.1a), вирішуються за допомогою оригінальної числової процедури, основні принципи якої детально описані в [72]. Нестационарні члени (4.1a) апроксимуються неявним чином у вигляді скінченної різниці першого порядку точності:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \tau} \approx \frac{\Pi - \Pi_{last}}{\Delta \tau} \quad (4.2)$$

де Π - один із характерних параметрів (температура, тиск, тощо), $\Delta \tau$ - часовий крок інтегрування. Такий підхід дозволяє звести задачу до неоднорідної стаціонарної на поточному часовому кроці.

За спряження згідно з концепцією «1D-3D» відповідає функція $\phi(T, T_{wall})$ - передача теплоти від внутрішньої стінки каналу до потоку теплоносія. Ця функція залежить від умовних координат охолоджуючих каналів. Детальніше інтерфейс спряження описано в п. 4.2.

Система диференціальних рівнянь (4.1a) є нелінійною неоднорідною системою, в якій вільні члени в рівняннях руху та енергії є складними функціями параметрів усередненого потоку. Отримати аналітичний розв'язок якої, навіть для відносно простих ГУ, на сьогоднішній день не представляється можливим.

Ефективним розв'язком в контексті елементарної теплогідравлічної ланки (труба, трійник, коліно) слід вважати такий, вид якого не залежить від заданих ГУ (з точки зору їх позиції). Тобто, універсальність визначається тим, що в

незалежності від комбінацій фізично обґрунтованих ГУ, стратегія отримання розв'язку не змінюється. Це дозволяє однозначно функціонально зв'язати стан на початку елементарної ланки (наприклад, труби) з її кінцем, що може бути представлено у вигляді матричної тотожності. Матрицю зв'язку можна інтерпретувати як перенос параметрів на початку в параметри на кінці (для поточкових величин це твердження має фізичний зміст). Описана властивість є вкрай важливою як під час організації системних розрахунків, так і для спряжень типу «система – деталізований одиничний об'єкт».

Нехай величинами, які характеризують неізотермічний потік теплоносія, вважатимуться масова витрата (G), температура (T) та абсолютний статичний тиск (p). Попередньо необхідно переписати ті терми (4.1а), які вміщують швидкість, яку потрібно виразити через масову витрату G , а також врахувати дискретизації похідної за часом (4.2). Зазначимо, що похідні за часом в силовому та енергетичному рівнянні розкладалися на елементарні складові (похідні відносно температури та тиску).

Згідно з [72] основні параметри потоку представляються як сума «базової» та «коригуючої» величини (4.3).

$$\begin{cases} G = G_{\bar{o}} + G_{\kappa} \\ p = p_{\bar{o}} + p_{\kappa} \\ T = T_{\bar{o}} + T_{\kappa} \end{cases} \quad (4.3)$$

Якщо підставити (4.3) в (4.1а) з урахуванням правил лінеаризації [72], в яких відкидаються члени вищого за перший порядок при розкладі у ряд Тейлора, то можна отримати в граничному випадку $G_{\kappa} \rightarrow 0; p_{\kappa} \rightarrow 0; T_{\kappa} \rightarrow 0$ еквівалентну систему, яка в коефіцієнтній формі відносно «коригуючих» величин може бути представлена як (4.4а). Кожен із коефіцієнтів $B_{G_{\kappa}}; B_{p_{\kappa}}; A_{T_{\kappa}}; C_{p_{\kappa}}; C_{G_{\kappa}}; C_{T_{\kappa}}$ є складною функцією «базових» величин, а також аксіальної координати (4.4б)- (4.4е).

$$\begin{cases} \frac{\partial G_{\kappa}}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial p_{\kappa}}{\partial x} = B_{G_{\kappa}} G_{\kappa} + B_{\kappa} \\ \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial x} + A_{\kappa} T_{\kappa} = C_{p_{\kappa}} p_{\kappa} + C_{G_{\kappa}} G_{\kappa} + C_{\kappa} \end{cases} \quad (4.4a)$$

$$B_{G_{\kappa}} = \frac{2G_{\bar{o}}}{\rho f} \frac{\partial f}{\partial x} - \xi \frac{\pi D G_{\bar{o}}}{4\rho_0 f^3} - \frac{1}{f \Delta \tau} \quad (4.4б)$$

$$B_{\kappa} = \frac{G_{\bar{o}}^2}{\rho f^3} \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial p_{\bar{o}}}{\partial x} - \xi \frac{\pi D G_{\bar{o}}^2}{8\rho f^3} - \frac{G_{\bar{o}}}{f \Delta \tau} + \frac{G_{last}}{f \Delta \tau} \quad (4.4в)$$

$$A_{\kappa} = \pi D \frac{HTC}{G_{\bar{o}} c_p} + \frac{\rho f}{G_{\bar{o}} \Delta \tau} \quad (4.4г)$$

$$C_{p_{\kappa}} = \frac{f}{G_{\bar{o}} c_p \Delta \tau} \quad (4.4г)$$

$$C_{G_{\kappa}} = \frac{3G_{\bar{o}}}{\rho^2 f^3 c_p} \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{1}{G_{\bar{o}}} \frac{\partial T_{\bar{o}}}{\partial x} - \xi \frac{\pi D G_{\bar{o}}}{8\rho^2 f^3 c_p} - \frac{2}{c_p \rho f \Delta \tau} + \frac{G_{last}}{G_{\bar{o}} c_p \rho f \Delta \tau} \quad (4.4д)$$

$$\begin{aligned} C_{\kappa} = & \frac{G_{\bar{o}}^2}{\rho^2 f^3 c_p} \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial T_{\bar{o}}}{\partial x} - \xi \frac{\pi D G_{\bar{o}}^2}{8\rho^2 f^3 c_p} - \frac{HTC(T_{\bar{o}} - T_w) \pi D}{G_{\bar{o}} c_p} - \frac{\rho f (T_{\bar{o}} - T_{last})}{G_{\bar{o}} \Delta \tau} + \\ & + \frac{f}{G_{\bar{o}} c_p} \frac{(p_{\bar{o}} - p_{last})}{\Delta \tau} - \frac{1}{c_p \rho} \frac{G_{\bar{o}} - G_{last}}{\Delta \tau} \end{aligned} \quad (4.4е)$$

Якщо вважати, що розподіл «базових» величин уздовж осьової лінії каналу відомий, то (4.4а) являється лінійною системою неоднорідних диференціальних зі змінними коефіцієнтами відносно «коригуючих» величин. Отримана система рівнянь значно простіша ніж (4.1), проте отримати аналітичний розв'язок якої для всієї ділянки залишається складністю.

Для розуміння того, що характеризує система (4.4а), розглянемо вільні члени B_{κ} та C_{κ} , які в точності відповідають вхідним рівнянням системи (4.1) (з урахуванням перетворень). Фактично вільні члени (4.4а) характеризують нев'язку вхідної системи (4.1) при поточних розподілах «базової» величини. Зважаючи на (4.3), «коригуюча» величина характеризує наскільки поточний розв'язок у вигляді «базових» величин відрізняється від точного рішення. Детально принцип побудови

рішення розв'язку рівнянь одновимірної теплогідравліки описано в [72]. Таким чином, стає зрозумілим, що (4.4a) характеризує розподіл різниці між точним та наближеним розв'язком. Наблизити «базовий» розв'язок до точного наперед задану величину відхилення (критерій конвергенції) можливо шляхом ітераційного уточнення базової величини.

Для того, щоб уточнювати базові величини, необхідно, насамперед, отримати розподіл $G_\kappa; p_\kappa; T_\kappa$, тобто якимось чином отримати розв'язок (4.4a). Для цього довжину умовного каналу L розіб'ємо довільним чином (загальний випадок) на елементарні ділянки довжиною δL_i . В межах кожної ділянки вважатимемо постійними коефіцієнти (4.4б) – (4.4е), які визначаються референтними значеннями базових величин та координати $\{G_\kappa^{ref}; p_\kappa^{ref}; T_\kappa^{ref}; x_\kappa^{ref}\}$, що геометрично розташовані в межах елементарної ділянки. Тоді, для δL_i (4.4) є системою звичайних неоднорідних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами, яка може досить просто бути проінтегрована. Нехай координата початку ділянки δL_i буде x_i , а кінця, відповідно, x_{i+1} , тоді послідовно інтегруючи кожне рівняння (4.4a) в межах $x_{i+1}; x_i$, з урахуванням того, що $G_\kappa(x_i) = G_{\kappa,i}^{in}; p_\kappa(x_i) = p_{\kappa,i}^{in}; T_\kappa(x_i) = T_{\kappa,i}^{in}$, а також $G_\kappa(x_{i+1}) = G_{\kappa,i}^{out}; p_\kappa(x_{i+1}) = p_{\kappa,i}^{out}; T_\kappa(x_{i+1}) = T_{\kappa,i}^{out}$ загальний розв'язок (для: $x \in \{x_{i+1}; x_i\}$) можна представити у вигляді:

$$G_\kappa(x) = G_{\kappa,i}^{in} \quad (4.5a)$$

$$p_\kappa(x) = G_{\kappa,i}^{in} B_{G_\kappa}(x - x_i) + p_{\kappa,i}^{in} + B_\kappa(x - x_i) \quad (4.5б)$$

$$\begin{aligned} T_\kappa(x) = & G_{\kappa,i}^{in} \left(\frac{B_{G_\kappa} C_{p_\kappa}}{A_\kappa} [x - x_i e^{-A_\kappa(x-x_i)}] + \frac{A_\kappa C_{G_\kappa} - A_\kappa B_{G_\kappa} C_{p_\kappa} x_i - C_{p_\kappa} B_{G_\kappa}}{A_\kappa^2} [1 - e^{-A_\kappa(x-x_i)}] \right) + \\ & + p_{\kappa,i}^{in} \frac{C_{p_\kappa}}{A_\kappa} [1 - e^{-A_\kappa(x-x_i)}] + T_{\kappa,i}^{in} e^{-A_\kappa(x-x_i)} + \\ & + \frac{B_\kappa C_{p_\kappa}}{A_\kappa} [x - x_i e^{-A_\kappa(x-x_i)}] + \frac{A_\kappa C_\kappa - A_\kappa B_\kappa C_{p_\kappa} x_i - C_{p_\kappa} B_\kappa}{A_\kappa^2} [1 - e^{-A_\kappa(x-x_i)}] \end{aligned} \quad (4.5в)$$

Фактично (4.5) при $x = x_{i+1}$ є матрицею зв'язку параметрів на початку та кінці елементарної ділянки розбиття, що важливо для організації системних розрахунків.

Для того, щоб отримати розподіл «коригуючої» величини для всієї ділянки труби, необхідно знати три значення $G_{\kappa}^{in}; p_{\kappa}^{in}; T_{\kappa}^{in}$ на початку або в кінці труби $G_{\kappa}^{out}; p_{\kappa}^{out}; T_{\kappa}^{out}$, які фактично є граничними умовами. В загальному випадку комбінація ГУ може бути такою, що трійка значень розподілена по обидва боки трубопроводу (наприклад, масова витрата та тиск задані на початку трубопроводу, а температура в кінці). Для цього формується просте співвідношення, яке дозволяє отримати всі 6 значень «коригуючої» величини на границях потоку (у сенсі входу та виходу).

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \tilde{A}_{13} & \tilde{B}_{11} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \tilde{A}_{23} & \tilde{B}_{21} \\ \tilde{A}_{31} & \tilde{A}_{32} & \tilde{A}_{33} & \tilde{B}_{31} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} A_{11}^i & A_{12}^i & A_{13}^i & B_{11}^i \\ A_{21}^i & A_{22}^i & A_{23}^i & B_{21}^i \\ A_{31}^i & A_{32}^i & A_{33}^i & B_{31}^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6a)$$

$$\begin{pmatrix} G_{\kappa,i}^{out} \\ p_{\kappa,i}^{out} \\ T_{\kappa,i}^{out} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \tilde{A}_{13} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \tilde{A}_{23} \\ \tilde{A}_{31} & \tilde{A}_{32} & \tilde{A}_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} G_{\kappa,i}^{in} \\ p_{\kappa,i}^{in} \\ T_{\kappa,i}^{in} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{B}_{11} \\ \tilde{B}_{21} \\ \tilde{B}_{31} \end{pmatrix} \quad (4.6b)$$

У (4.6a) формується матриця зв'язку початку та кінця каналу, на основі коефіцієнтів локальних матриць $[A(x_i^{ref})]$ та $[B(x_i^{ref})]$, коефіцієнти яких визначаються згідно з (4.5) при $x = x_{i+1}$. Фактично, (4.6b) є системою лінійних алгебраїчних рівнянь відносно значень «коригуючих» величин на границях розрахункової ділянки (труби), три з яких – відомі величини. На основі (4.6b) формується трійка чисел $G_{\kappa}^{in}; p_{\kappa}^{in}; T_{\kappa}^{in}$, яка є відправною точкою для відновлення розподілу шляхом прогонки [72, 73] на основі матричного співвідношення (4.7).

$$\begin{pmatrix} G_{\kappa,i}^{out} \\ p_{\kappa,i}^{out} \\ T_{\kappa,i}^{out} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A(x_i^{ref}) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} G_{\kappa,i}^{in} \\ p_{\kappa,i}^{in} \\ T_{\kappa,i}^{in} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B(x_i^{ref}) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Після того, як отримано розподіл $G_{\kappa}; p_{\kappa}; T_{\kappa}$, уточнюється «базова» величина, що є складовою числової процедури розв'язку (4.1), яку в загальному можна розділити на чотири складові (на поточному часовому кроці).

Крок №1 – «підготовка». На даному етапі визначаються основні функціональні залежності (теплофізичні властивості, геометричні характеристики, граничні умови) від простору і часу. Дискретизується розрахункова область (система каналів) і задаються початкові розподіли «базових» величин $G_{\bar{o}}; p_{\bar{o}}; T_{\bar{o}}$, а також розраховуються похідні $\frac{\partial G_{\bar{o}}}{\partial x}; \frac{\partial p_{\bar{o}}}{\partial x}; \frac{\partial T_{\bar{o}}}{\partial x}$. Задаються налаштування розрахункової процедури $\Delta\Pi_i^{\max}; N_{sign}^{\Delta\Pi_i^{\max}}; \lambda_{up}^{\Pi_i^d}, \lambda_{down}^{\Pi_i^d}$ ($\Delta\Pi_i^{\max}$ – дозволена максимальна амплітуда «коригуючої» величини на одній ітерації; $N_{sign}^{\Delta\Pi_i^{\max}}$ – дозволена кількість знакозбережень амплітуди «коригуючої» величини, $\lambda_{up}^{\Pi_i^d}, \lambda_{down}^{\Pi_i^d}$ – коефіцієнти нижньої та верхньої релаксації).

Крок №2 – «формулювання локальних матриць зв'язку». На основі розв'язку (4.5) для елементарної геометричної ділянки, обчислюються коефіцієнти локальної передавальної матриці $\begin{bmatrix} A(x_i^{ref}) \end{bmatrix}$, а також вільного члена у вигляді вектора $\begin{bmatrix} B(x_i^{ref}) \end{bmatrix}$. Для відновлення розподілу «коригувальних» величин шляхом прогонки (4.7) формуємо матрицю зв'язку початку і кінця ділянки інтегрування. Це дозволяє отримати зв'язок ГУ на початку і кінці каналу, що дає можливість формувати будь-яку комбінацію ГУ.

Крок №3 – «відновлення поля «коригувальних» величин». Визначаємо значення на границі розрахункової області шляхом вирішення (4.6б). Далі відновлюємо розподіл за допомогою прогонки (4.7) і перевіряємо відповідність значень вектора в кінці ділянки інтегрування.

Крок №4 – «динамічне уточнення «базової» величини». При уточненні наближеного рішення $G_\theta; p_\theta; T_\theta$ часто трапляється так, що «коригуюча» величина переповнює значення параметра вже дуже близького до точного рішення. Таке буває, наприклад, через те, що значення температури в кожній точці вже як завгодно мало відрізняється від «точного» рішення, а значення тиску не зійшлися. Подібна ситуація призводить до коливань збіжності розв'язку, які затухають дуже слабо, або, в особливо складних задачах, призведе до розбалансу рішення. З метою запобігання цій ситуації на «кроці №1» задаються допустимі амплітуди «коригуючих» величини $\Delta\Pi_i^{\max}$. Для демпфування осциляції розв'язку вводиться керуючий параметр $N_{sign}^{\Delta\Pi_i^{\max}}$, який визначає дозволена кількість ітерацій зі збереженням знаку амплітуди «коригуючої» величини $(\Pi_i^k)_{\max}$, яка визначена на «кроці №3». На кожній ітерації відслідковується поточна кількість кроків N_{itr}^{sc} збереження знаку амплітуди. Якщо знак амплітуди «коригуючої» величини не змінюється більше $N_{sign}^{\Delta\Pi_i^{\max}}$ кроків ітерації, то допустиме відхилення $\Delta\Pi_i^{\max}$ множиться на верхній релаксаційний коефіцієнт $\lambda_{up}^{\Pi_i^d} \geq 1$. При цьому не допускається, щоб значення величини обмеження $(\Delta\Pi_i^{\max})_{new}$ перевищило значення задане на «кроці №1». Якщо під час ітерацій знак «корегуючої» величини змінився, то $\Delta\Pi_i^{\max}$ множиться на $0 < \lambda_{down}^{\Pi_i^d} \leq 1$, тим самим збільшуючи обмеження. Таким чином на кожному кроці здійснюється перенормування розподілу кожної коригуючої величини на амплітуду, яка визначається за допомогою (4.8).

$$(\Delta\Pi_i^{\max})_j^{ef} = \begin{cases} N_{itr}^{sc} > N_{sign}^{\Delta\Pi_i^{\max}}, \forall \lambda_{up}^{\Pi_i^d} (\Delta\Pi_i^{\max})_{j-1}^{ef} < \Delta\Pi_i^{\max}, \lambda_{up}^{\Pi_i^d} (\Delta\Pi_i^{\max})_{j-1}^{ef} \\ N_{itr}^{sc} = 1, \lambda_{down}^{\Pi_i^d} (\Delta\Pi_i^{\max})_{j-1}^{ef} \\ 1 < N_{itr}^{sc} \leq N_{sign}^{\Delta\Pi_i^{\max}}, (\Delta\Pi_i^{\max})_{j-1}^{ef} \end{cases} \quad (4.8)$$

Тоді «базова» величина $G_{\bar{o}}; p_{\bar{o}}; T_{\bar{o}}$ на одному ітераційному кроці може бути відкоригована на величину $k_j^{dyn} \{G_{\kappa}; p_{\kappa}; T_{\kappa}\}$, де k_j^{dyn} - коефіцієнт корекції, який визначається як:

$$k_{\Pi_i^{\kappa}}^{dyn} = \max \left\{ \frac{\Pi_i^{\kappa}}{(\Delta \Pi_i^{\max})_j^{ef}} \right\} \Rightarrow k_i^{dyn} = \frac{1}{\max \{k_{\Pi_i^{\kappa}}^{dyn}\}}, \begin{cases} k_{i,real}^{dyn} < 1, k_{i,real}^{dyn} \\ k_{i,real}^{dyn} \geq 1, k_{i,real}^{dyn} = 1 \end{cases} \quad (4.9)$$

Подібний підхід для обмеження рішення був використаний в роботах [70, 71]. Аналогічно може здійснюватися корекція похідних «базової» величини по координаті, яка входить в (4.5в). Для цього достатньо взяти похідну на ділянці від (4.7) і скоригувати значення похідних «базової» величини.

Таким чином, наближений розв'язок (4.1) для елементарної ланки можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} G(x) \approx G(x)_{\bar{o}}^0 + \sum_{i=1}^N k_i^{dyn} G(x)_{\kappa}^i \\ p(x) \approx p(x)_{\bar{o}}^0 + \sum_{i=1}^N k_i^{dyn} p(x)_{\kappa}^i, \\ T(x) \approx T(x)_{\bar{o}}^0 + \sum_{i=1}^N k_i^{dyn} T(x)_{\kappa}^i \end{cases} \quad (4.10)$$

де N – кількість ітерацій до досягнення критеріїв збіжності, який в процедурі прийнятий єдиним для трьох параметрів і визначається значенням $\max \{k_{\Pi_i^{\kappa}}^{dyn}\}$, яке контексті даної роботи приймається рівним 10^{-3} для кожного часового кроку. Розподіли $\{G(x)_{\bar{o}}^0, p(x)_{\bar{o}}^0, T(x)_{\bar{o}}^0\}$ є розв'язком, що припускається перед ітеративним наближенням.

Наближений розв'язок (4.10) можна трактувати як миттєвий, оскільки він отримується для поточного часового кроку. Розподіли $\{G(x, 0)_{\bar{o}}^0, p(x, 0)_{\bar{o}}^0, T(x, 0)_{\bar{o}}^0\}$ на

першій ітерації формуються на основі початкових умов для проектної геометрії. На кожному наступному часовому кроці розподіли $\{G(x,t)_\sigma^0, p(x,t)_\sigma^0, T(x,t)_\sigma^0\}$ розраховуються за допомогою (4.10), тобто приймаються рівними розв'язку з минулого часового кроку, а саме $\{G(x,t)_\sigma^0, p(x,t)_\sigma^0, T(x,t)_\sigma^0\} = \{G_{last}, p_{last}, T_{last}\}$.

Система охолоджуючих каналів ВКП, зображена на Рис. 4.2, представляється набором елементарних каналів, з можливістю врахування поперечних зв'язків при розкритті, які визначаються отриманою за допомогою аналізу міцності площею розкриття між кільцями. У випадку розрахунку системи паралельних каналів замість (4.11б) формується спеціальна система лінійних рівнянь відносно всіх трійок чисел, які характеризують початки та кінці відповідних каналів, а також рівняння спряжень, що відповідають місцям їх з'єднання. Принципово структура такої СЛАР може бути представлена у вигляді (Рис. 4.3), яка і реалізована в розрахунковій процедурі.

Матриця зв'язку елементарної ланки (рівняння транспорту)

Матриця ГУ для кожної елементарної ланки (в контексті даної процедури)

Матриця спряження (рівність перепаду тиску)

Матриця спряження (сумарна витрата)

Рис. 4.3 – Матричний вигляд характеристичної системи СЛАР для системи охолоджуючих каналів ВКП

4.2 Опис твердотільної моделі елементів ВКП

Твердотільна модель загального блоку аналізу теплогідравлічних процесів представляє собою тривимірне моделювання температурного поля в елементах внутрішньокорпусних пристроїв, що базується на застосовуваній в Розділі 2 CFD-моделі охолодження вигородки. Проте, на відміну від описаної в Розділі 2 CFD-моделі, поточна модель містить лише розрахункові домени твердих тіл ВКП: вигородки, шахти внутрішньокорпусної, з'єднувальних шпильок та різьбових тяг. Тверде тіло вигородки в моделі представлено у вигляді набору кілець, між якими організовано контактні інтерфейси.

Поверхні кожного твердого тіла моделі розбиті на елементарні ділянки з точки зору відповідності елементарним каналам/зонам перемішування теплоносія в одновимірній моделі байпасу (Рис. 4.2) таким чином, щоб була можлива організація відповідних інтерфейсів спряження. З даною метою в моделях введено загальну індексацію поверхонь та зон перемішування, логіка побудови якої представлена на Рис. 4.4.

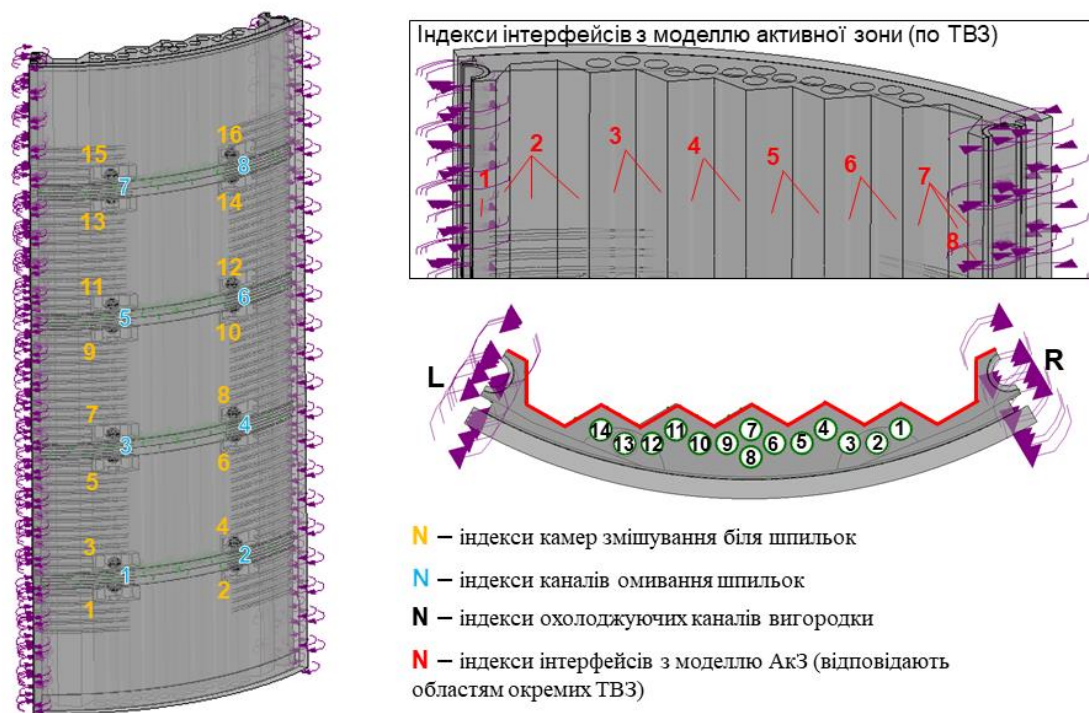


Рис. 4.4 – Індєксація поверхонь твердотїльної моделї для організації спряження

Для кожної з елементарних ділянок поверхонь застосовуються розраховані одновимірною моделлю граничні умови – комбінації температури та коефіцієнту тепловіддачі. В тому числі, модель передбачає можливість розкриття кілець і прикладання до торців вигородки відповідних граничних умов, отриманих з моделі байпасу (п. 4.1), що відповідають утвореним камерам перемішування КСПі (Рис. 4.2).

Дані з енерговиділень передаються з модулю аналізу транспорту нейтронів та гамма-квантів, описаного в Розділі 3, і застосовуються в кожному елементі моделі в якості внутрішніх джерел енергії. Загальна схема спряження твердотільної моделі елементів ВКП з модулем нейтронно-фізичного розрахунку представлена на Рис. 4.5.

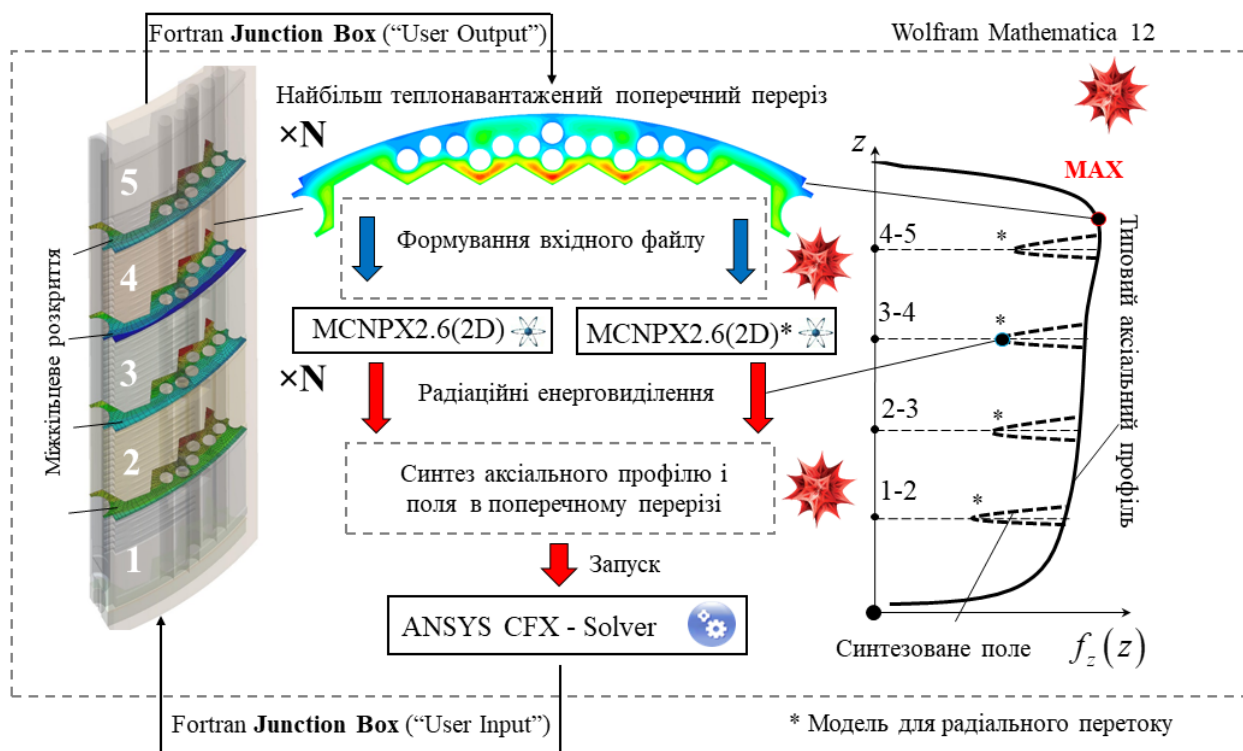


Рис. 4.5 – Організація спряження твердотільної моделі з блоком нейтронно-фізичного аналізу та даними про розкриття

В якості даних, що передають величини міжкільцевого розкриття, сформульовано параметричні функції, які залежать від температури теплоносія, величини накопиченої дози та температури металу вигородки (Рис. 4.6).

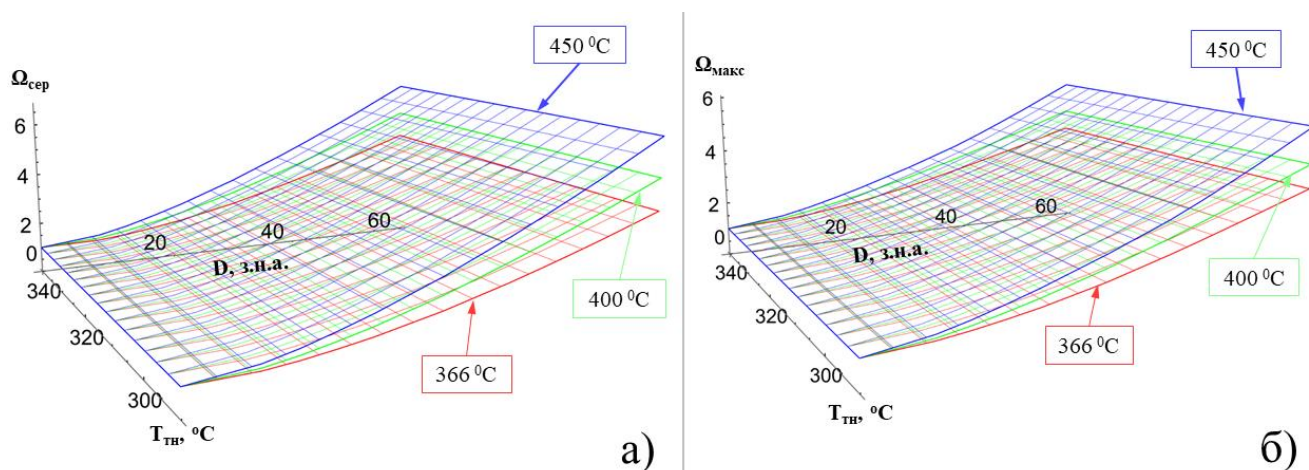


Рис. 4.6 – Параметричні функції величини розкриття по середньому (а) та максимальному (б) значенням

4.3 Модель активної зони

У той самий час важливим є аналіз зміни температури теплоносія в активній зоні, що може проявлятися у збільшенні підігріву теплоносія. З метою можливості локального відслідковування зміни умов тепловідведення в активній зоні, а також індивідуального задання характеристик до об'ємів, що відповідають окремим ТВЗ, застосовувана в Розділі 2 (див. п. 2.1.1) модель активної зони була допрацьована. Основні зміни полягають у застосування концепції «зонального» пористого тіла (у гідравлічному сенсі). У змінній розрахунковій моделі передбачається можливість доступу до сіткового об'єму, який відповідає конкретному номеру ТВЗ, що дає можливість задавати індивідуальні характеристики у вигляді теплових джерел та додаткових моментів в рівняннях руху. Загальний вигляд розрахункової моделі, а також граничних умов, які застосовуються при розрахунках, показано на Рис. 4.7.

На рівні з'єднання кілець вигородки в моделі передбачені поверхні, що відповідають радіальним витокам з АкЗ (інтерфейс зв'язку з процедурою ТММ для

байпасу – відповідає позначкам a_i на Рис. 4.2). Функція енерговиділення формується індивідуально для кожної ТВЗ на основі картограм паливного завантаження відповідної кампанії.

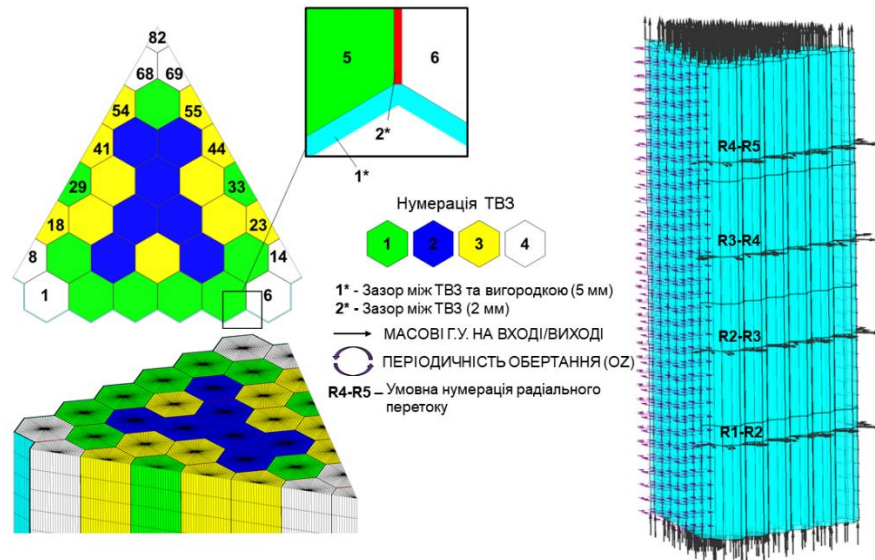


Рис. 4.7 – Загальний вигляд розрахункової моделі активної зони, допрацьованої в рамках організації спряження

Функція гідравлічного опору (див. залежність (2.2)) вбудовується у сіткові об'єми, які відповідають ТВЗ, де число Рейнольдса розраховується локально. Прийняте значення коефіцієнту пористості (по поперечному перерізу рівне 0.607 для всієї розрахункової моделі, висота якої 4.07 м).

4.4 Результати розрахунків на основі мультифізичної процедури спряження

У результаті проведеного мультифізичного аналізу процесів деградації геометрії вигородки внутрішньокорпусної, що дозволяє враховувати її поступову формозміну по кампаніях, отримано уточнені значення величин розкриття кілець, що враховують наявність зворотніх зв'язків типу «розкриття – локальна інтенсифікація охолодження металу вигородки – зміна інтенсивності розкриття».

На Рис. 4.8 наведені величини зазорів, отриманих в Розділі 2 в рамках послідовного аналізу, та порівняні з уточненими значеннями, що є результатом роботи спряженої процедури (Рис. 4.9) на момент 60-ї кампанії одного з енергоблоків АЕС.

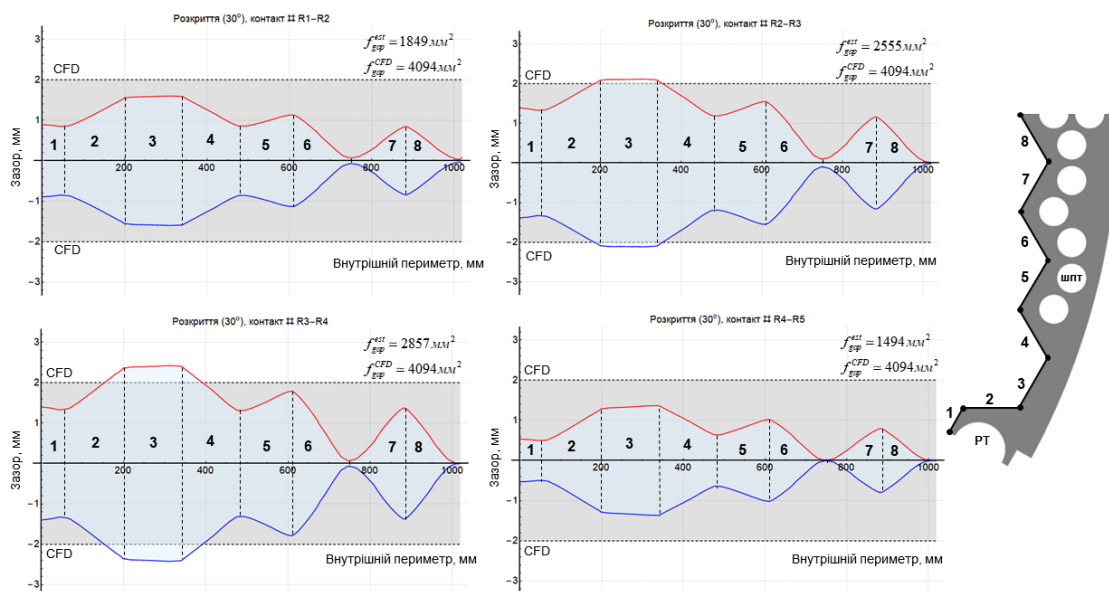


Рис. 4.8 – Величини зазорів між кільцями вигородки, отримані для 60-ї кампанії шляхом послідовного аналізу

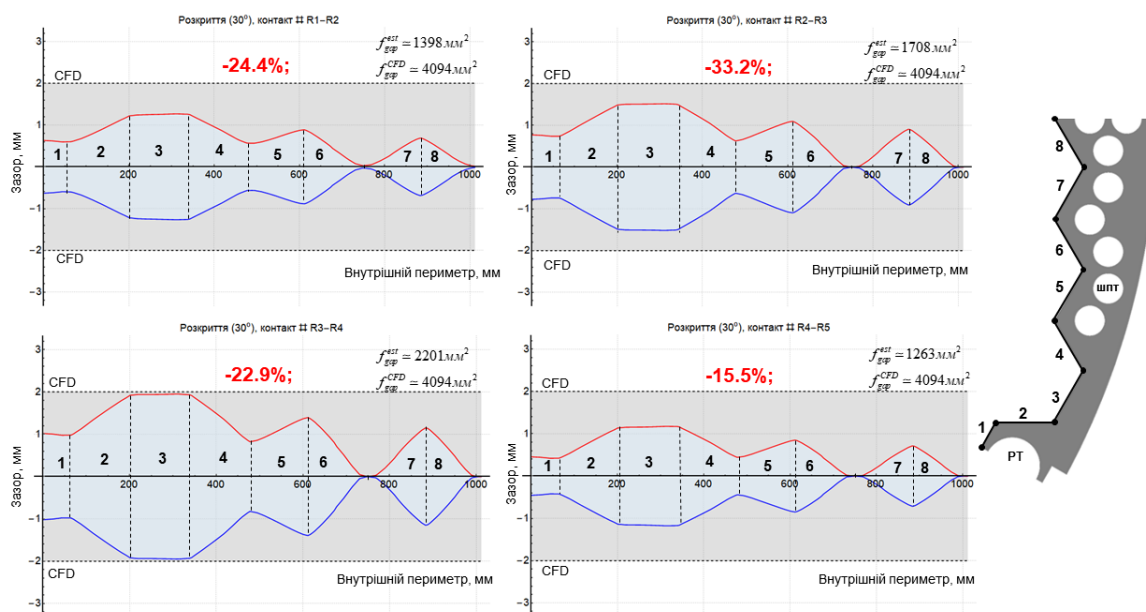


Рис. 4.9 – Величини зазорів між кільцями вигородки, отримані для 60-ї кампанії шляхом виконання спряженого мультифізичного аналізу

4.5 Висновки до Розділу 4

Четвертий розділ присвячено розробці комплексної зв'язаної мультифізичної процедури оцінки зміни умов охолодження елементів ВКП при деградації їх геометрії з урахуванням наявності зворотніх зв'язків типу «розкриття кілець вигородки – поява радіальних перетоків – локальна зміна умов охолодження металу вигородки – зміна інтенсивності розкриття». Запропоновано концепцію спряження блоків, що відповідають оцінкам трьох фізичних складових проблеми розпухання – нейтронно-фізичного модулю, теплогідравлічного аналізу та модулю оцінки міцності. В рамках розробки та реалізації концепції зроблено висновки щодо нераціональності використання розроблених у другому Розділі моделей аналізу умов охолодження елементів ВКП з точки зору їх ресурсоемності. Відповідно, запропоновано модифікацію модулю аналізу теплогідравлічних процесів та його розділення на три суб-моделі – одновимірну теплогідравлічну модель байпасу активної зони, твердотільну модель основних елементів ВКП, та модифіковану CFD-модель активної зони.

Розроблено одновимірну теплогідравлічну схему байпасу активної зони з урахуванням можливої появи розкриття кілець вигородки і, відповідно, радіальних поперечних перетоків. Модель реалізовано з використанням надійного та стабільного чисельного методу передаточних матриць (Transfer Matrix Method), що дозволяє суттєво оптимізувати найбільш навантажену частину теплогідравлічного модулю мультифізичної процедури – моделювання байпасуючого теплоносія. В основі одновимірної теплогідравлічної моделі лежить вирішення системи диференціальних рівнянь, що описують потік неізотермічної нестисливої рідини в однофазній постановці. Розв'язок системи ДР базується на спряженому гібридному підході, в якому рівняння теплопровідності вирішується за допомогою моделювання твердотільних моделей в тривимірній постановці (див. п. 4.2), а рівняння переносу неізотермічної течії вирішуються за допомогою оригінальної числової процедури. При вирішенні застосовуються ефективні методи представлення основних параметрів потоку – тиску, температури та масової

витрати, через «базову» та «коригуючу» величини, та лінеаризації відповідних ДР відносно «коригуючих» величин. Отримано розв'язок СЛДР відносно «коригуючих» величин для елементарної ланки (каналу), та побудовано загальну матрицю для характеристичної системи СЛАР, що описує систему охолоджуючих каналів.

Тривимірне моделювання теплопровідності в твердотільних елементах ВКП здійснено з використанням розроблених в другому Розділі відповідних моделей, що в поточному аналізі включають лише тверді тіла. Розроблено систему інтерфейсів спряження твердотільної моделі з одновимірною теплогидравлічною моделлю байпасу. Процедура спряження пов'язує описані моделі теплопровідності та байпасу, а також застосовує дані з радіаційних енерговиділень та площ розкриття кілець, що передаються із відповідних розрахункових модулів, або сформованих параметричних функцій.

З метою можливості локального відслідковування зміни умов тепловідведення в активній зоні, а також індивідуального задання характеристик до об'ємів, що відповідають окремим ТВЗ, доопрацьовано розроблену в другому Розділі модель активної зони. Також, в поточній моделі виділено зони, що дозволяють враховувати витік теплоносія з активної зони в байпас через оцінене в модулі оцінки міцності розкриття. Таким чином отримуються масові витрати в радіальних перетоках між кільцями, що слугують відповідними граничними умовами в одновимірній моделі.

Застосовуючи розроблену мультифізичну процедуру спряженого аналізу зміни умов охолодження ВКП проведено розрахунковий аналіз деградації геометрії вигородки з урахуванням зворотніх зв'язків, пов'язаних з локальним впливом наявності радіальних перетоків на умови охолодження вигородки. В результаті оцінки уточнено значення розкриття кілець на момент 60-ї кампанії, що були отримані в Розділі 2 в рамках виконання послідовного аналізу. Отримані величини зазорів між кільцями мають менші значення, які в середньому на 22% нижчі за результати консервативного аналізу (Розділ 2).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені результати дослідження зміни умов охолодження елементів внутрішньокорпусних пристроїв РУ типу ВВЕР-1000 внаслідок деградації їх геометрії при довготривалій експлуатації. В рамках роботи виконано наступне:

1. Проаналізовано ключові фактори, що визначають процеси деградації геометрії ВКП та визначено найбільш характерні зони деградації, що можуть впливати на надійність охолодження металу вигородки.

2. Виконано аналіз існуючої практики дослідження зміни геометрії вигородки наявними експериментальними засобами та, відповідно, досвіду моделювання радіаційних енерговиділень та температурного поля в металі ВКП.

3. Розроблено методологію вирішення контактної задачі, що складається з двох запропонованих підходів – послідовного аналізу міцнісних та теплогідравлічних процесів при деградації геометрії, та зв'язаного мультифізичного аналізу впливу взаємних зв'язків.

4. В рамках підходу з послідовного аналізу стану внутрішньокорпусних пристроїв при деградації їх геометрії розроблено універсальну (з точки зору можливості її конфігурування та задання граничних умов) теплогідравлічну модель охолодження ВКП, виконано оцінку локального стану охолодження металу вигородки та елементів ВКП при проєктній геометрії для обраної розрахунковим шляхом представницької кампанії одного з енергоблоків АЕС України.

5. З метою дослідження зміни умов охолодження вигородки при наявності її контакту із шахтою, запропоновано підхід із розглядом різних можливих конфігурацій контакту. В рамках аналізу розглянуто 8 варіантів контакту, серед яких – проєктна геометрія, шість прогнозованих станів (від цілком гіпотетичного повного контакту до більш реалізованих варіантів перекриття кільцевого зазору за рахунок контакту нижнього/верхнього буртів і їх комбінацій, а, також, на рівні буртів, що відповідають найбільш енергонавантаженим перерізам вигородки), восьмий – реалістичний на основі попередньої оцінки на міцність для

представницької кампанії. На основі розробленого підходу якомога повно проаналізовано всі імовірні стани ВКП при наявності контакту та з'ясовано його вплив на зміну температурного стану основних конструкційних елементів ВКП (вигородки, шахти, шпильок та різьбових тяг).

6. З'ясовано, що контакт вигородки і шахти частково впливає на якісні та кількісні характеристики температурного поля вигородки (збільшення максимальної температури вигородки на $\sim 15^{\circ}\text{C}$ для найбільш реалістичних варіантів контакту), при максимальному (для відповідних реалістичних конфігурацій контакту) відхиленні середньооб'ємної температури від проєктного стану (геометрії), що не перевищує $2,21^{\circ}\text{C}$.

7. Розрахункові значення температур для різних варіантів контакту використані для порівняльної оцінки радіаційного розпухання на основі двовірної моделі. Показано, що контакт призводить до незначних змін у цільових функціях радіаційної повзучості – об'ємному розпуханні та еквівалентних напруженнях.

8. Виконано оцінку інтенсивності радіальних перетоків через розкриття кілець вигородки, для чого застосовано підхід аналітичної оцінки зміни верхньої та нижньої межі можливого перетоку по кампаніях (на основі результатів оцінки міцності), а також оцінено консервативну верхню межу інтенсивності радіального перетоку з використанням розробленої CFD-моделі для 60-ї прогнозної кампанії. Консервативно розглядається п'ятикілцева модель та вважається, що отримані розкриття реалізуються між всіма парами кілець вигородки. Отримано можливу максимальну межу величини інтенсивності байпасу з активної зони до кільцевого каналу і каналів охолодження вигородки, яка оцінена в 6% відносно загальної витрати через активну зону.

9. З метою дослідження впливу наявності отриманої величини радіального перетоку проаналізовано температурні поля в перерізах вигородки, що відповідають місцям контакту кілець (у разі розрахунку для проєктної геометрії), та верхнім і нижнім торцями кілець вигородки у разі врахування наявності міжкілцевих зазорів, отриманих при розрахунках радіаційного розпухання. Отримані результати наступні: положення найбільш теплонавантаженого перерізу

зміщується вгору; максимальна температура металу вигородки зменшується на 3.95°C ; значення середньооб'ємної температури вигородки зростає на 2.1°C , що пояснюється збільшенням температури охолоджуючого теплоносія за рахунок потрапляння байпасуючого теплоносія з АкЗ із більшою температурою; за рахунок наявності радіального байпасу торці кілець вигородки значно охолоджуються відносно відповідних температурних полів в місцях контакту кілець для проєктної геометрії.

10. В результаті виконання аналізу в рамках послідовного підходу з'ясовано, що наявна зміна умов охолодження металу вигородки викликана, в першу чергу, виникненням радіальних перетоків, та може мати значний вплив на реальну динаміку розкриття і деградації геометрії вигородки в цілому за рахунок появи зворотного зв'язку типу «розкриття – локальна інтенсифікація охолодження – зменшення інтенсивності подальшого розкриття». Зроблено висновок щодо необхідності аналізу впливу даних зворотних зв'язків на стан елементів ВКП з використанням зв'язаного підходу та урахуванням взаємного впливу трьох фізик – нейтронно-фізичному, теплогідравлічному розрахунках та розрахунку міцності.

11. Запропоновано концепцію мультифізичного аналізу процесів деградації геометрії та розроблено відповідні алгоритми спряження.

12. Розроблено нейтронно-фізичний модуль мультифізичної процедури аналізу процесів деградації ВКП. При розробці моделі реалізовано інженерний аналіз паливних завантажень енергоблоку, безпосередньо модель транспорту нейтронів та гамма-квантів з можливістю урахування утворення зазорів між кільцями.

13. Сформульовано параметричні фактори зміни енерговиділення в основних елементах ВКП, які залежать від локальної температури теплоносія та металу (зв'язок з теплогідравлічним модулем), а також від співвідношення метал – вода (модуль розрахунків на міцність). Такий підхід дозволив раціональним чином організувати зв'язані розрахунки для обґрунтування впливу її деградації на зміну умов охолодження ВКП.

14. Запропоновано та виконано модифікацію модулю аналізу теплогідравлічних процесів та його розділення на три суб-моделі – одновимірну теплогідравлічну модель байпасу активної зони, твердотільну модель основних елементів ВКП, та модифіковану CFD-модель активної зони.

15. Розроблено одновимірну теплогідравлічну модель байпасу з використанням надійного та стабільного чисельного методу передаточних матриць (Transfer Matrix Method), що дозволяє суттєво оптимізувати найбільш навантажену частину теплогідравлічного модулю мультифізичної процедури. Розроблена одновимірна модель враховує повну схему розгалуження охолоджуючих каналів з урахуванням зон змішування навколо шпильок, а також появи камер перемішування через розкриття кілець вигородки.

16. Виконано тривимірне моделювання теплопровідності в твердих тілах елементів ВКП, вдосконалено модель активної зони. Розроблено систему інтерфейсів спряження твердотільної моделі з одновимірною теплогідравлічною моделлю байпасу. Процедура спряження пов'язує описані моделі теплопровідності та байпасу, а також застосовує дані з радіаційних енерговиділень та площ розкриття кілець, що передаються із відповідних розрахункових модулів, або сформованих параметричних функцій.

17. Застосовуючи розроблену мультифізичну процедуру спряженого аналізу зміни умов охолодження ВКП, уточнено значення розкриття кілець на момент 60-ї кампанії, що були отримані в Розділі 2 в рамках виконання послідовного аналізу. Отримані величини зазорів між кільцями мають менші значення, які в середньому на 22% нижчі за результати консервативного аналізу.

Розроблені підходи та моделі можуть бути застосовані для робіт із оцінки, обґрунтування і перепризначення термінів експлуатації енергоблоків України з реакторами ВВЕР-1000. Також, базуючись на розроблених підходах, є можливість аналізу впливу зміни умов охолодження ВКП на реакторну установку в цілому, шляхом модифікації розрахункових теплогідравлічних моделей РУ ВВЕР-1000 в RELAP5, використовуючи досвід розробленої в дисертації повної одновимірної схеми байпасу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неустроев В. С. Радиационные явления в стали X18H10T, облучённой в различных реакторах при условиях, близких к условиям эксплуатации ВКУ ВВЭР / В. С. Неустроев, В. Н. Голованов, В. К. Шамардин и др. // Сборник докладов VI Российской конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, 11–15 Сентября, 2000. ОАО «ГНЦНИИАР». 2001. Т. 3. Ч. 1. С. 3–23.
2. Garner F. A. Potential high fluence response of pressure vessel internals constructed from austenitic stainless steels / F. A. Garner, L. R. Greenwood, D. L. Harrod // Water Reactors, The Minerals, Metals, and Materials Society: 6th Int. symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. San Diego. 1993. P. 783–790.
3. Massoud J. P. The effect of irradiation on materials for core internals of PWRs: EDF-CEA-FRAMATOM joint research program / J. P. Massoud, N. de Mathan et al. // бая Рос. конф. по реакторному материаловедению. Сборник докладов. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». 2001. Т. 3. Ч. 1. С. 36–48.
4. Карзов Г. П. Основные механизмы радиационного повреждения материалов ВКУ и материаловедческие проблемы их длительной эксплуатации / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, А. А. Сорокин, В. А. Федорова. // "ОКБ Гидропресс". 2015. №117. С. 1–19.
5. Неустроев, В. С. Низкотемпературная радиационная повреждаемость аустенитных сталей, облученных в исследовательских и энергетических реакторах: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва. 2006.
6. Неустроев В.С. Исследования микроструктуры и механических свойств стали 08X18H10T после облучения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 / В. С. Неустроев, В. Г. Дворецкий, З. Е. Островский, В. К. Шамардин, Г.А. Шиманский // Вопросы атомной науки и техники. № 3. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2003. С. 73–78.

7. Неустроев В. С. Эволюция микроструктуры стали типа X18H10T при низкотемпературном облучении нейтронами как основной фактор упрочнения/ В. С. Неустроев, З. Е. Островский, С. В. Белозеров // Вопросы атомной науки и техники. № 6. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение №91. 2007. С. 78–81.

8. Edwards J. Influence of irradiation temperature and dose gradients on the microstructural evolution in neutron-irradiated 316SS / J. Edwards, E. P. Simonen, F. A. Garner. // J. Nucl. Mater. 2003. №317. P. 32–45.

9. Реактор. ТО. Реактор. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ГКАЭ ОКБ «Гидропресс». 1980.

10. 1152.02.09.000 СБ. Выгородка.

11. 1160.02.08.000 СБ. Шахта внутрикорпусная.

12. ПМ-Т.0.03.333-15. Типовая программа по оценке технического состояния и продления срока эксплуатации внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000.

13. Махненко О. В. Численный расчет радиационного распухания выгородки реактора ВВЭР-1000 в двухмерной постановке при вариации данных по объемным тепловыделениям и повреждающей дозе / О. В. Махненко, И. В. Мирзов // Проблемы прочности. 2014. №5. С. 127–139.

14. Марголин Б. З. Определение изменения геометрии выгородки реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. Расчет и измерение / Б. З. Марголин, А. Я. Варовин, А. И. Минкин и др. // Вопросы материаловедения. 2015. № 3(83).

15. Варовин А.Я. Опыт проведения измерений и анализа изменения геометрии выгородок российских реакторов ВВЭР-1000 / Варовин А.Я., Минкин А.И., Марголин Б.З. // Материалы конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»: ОКБ «Гидропресс», 2017, май 16-19.

16. Machnienko O.W. Stresses and Strains of Equipment Inside a WWER-1000 Nuclear Reactor / O.W. Machnienko, I.W. Mirzov // Bulletin of the Institute of Welding. No. 3, 2016. P. 49–56.

17. Разработка технических средств и методики измерения геометрических размеров выгордки активной зоны внутрикорпусных устройств реакторных установок ВВЭР-1000, ВП "КБ Атомприлад" ДП "НАЕК "Енергоатом", 2018.
18. Махненко О. В. Исследование напряженно-деформированного состояния сварных конструкций из аустенитной стали в условиях радиационного облучения / О. В. Махненко, И. В. Мирзов. // Автоматическая сварка. 2013. №1. С. 7–12.
19. Марголин Б.З. Совершенствование методики расчета прочности и остаточного ресурса внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет / Марголин Б.З., Федорова В.А., Сорокин А.А., и др. // Девятая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва. 2014.
20. Троянов В. М. Оценка и анализ термомеханического поведения элементов ВКУ реакторов ВВЭР с учетом эффектов облучения / В. М. Троянов, Ю. И. Лихачев, М. Я. Хмелевский. // Сб. докл. 5-й межотрасл. конф. по реакторному материаловедению, Димитровград. 1998. №2. С. 3–18.
21. Неустроев В. С. Экспериментальные исследования влияния типа напряженного состояния на радиационное распухание и ползучесть аустенитных сталей / В. С. Неустроев, С. В. Белозеров, Е. И. Макаров и др. // Отраслевой семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники», Обнинск. 2009.
22. Шарый Н. В. Методы расчетного обоснования прочности и динамика конструкций реакторных установок для АЭС с ВВЭР : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.14.03, 01.02.06 / Шарый Н. В. Подольск. 2008.
23. Королёв В. В. Методика выбора оптимального охлаждения выгордки реактора ВВЭР-1000 / В. В. Королёв, Д. А. Ягнатинский. // "ОКБ Гидропресс". 2011. №33.С. 1–14.

24. Коньшин В. И. Анализ технического состояния выгородки реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС / В. И. Коньшин, Г. Ю. Евлахович. // Энергетика: економіка, технології, екологія. 2016. №1. С. 75–81.
25. Мирзов И. В. Методика параметрического описания входных данных для расчета радиационного распухания ВКУ ВВЭР-1000 / И. В. Мирзов, С. М. Кандаля // Ядерна та радіаційна безпека №3(71). 2016. С. 23–27.
26. Мирзов И. В. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния выгородки ВВЭР-1000 / И. В. Мирзов. // UJV Rez a.s., Чехия. 2017. №147. С. 1–8.
27. Oryniak A. Swelling of VVER-1000 core baffle: numerical modeling and direct measurement of its geometrical dimensions / A. Oryniak, I. Oryniak // Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2017, Waikoloa, Hawaii, USA, July 16-20. 2017. P. 12.
28. Махненко О. В. Совершенствование методов оценки радиационного распухания и прогрессирующего формоизменения элементов ВКУ реактора ВВЭР-1000 / Махненко О. В., Кандаля С. М., Черкашин М. В. // Ядерна та радіаційна безпека №2(82). 2019. С. 35–42.
29. Filonova Y. Reactor baffle cooling CFD framework for swelling assessment / Y. Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk // Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26-82365. London, England, July 22-26, 2018. P. 10. DOI:<https://doi.org/10.1115/ICONE26-82365>
30. Filonov V. Calculation of VVER-1000 core baffle temperature distribution for its swelling assessment / V. Filonov, Y. Filonova, Y. Dubyk, A. Bohdan // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(60). 2020. P. 35-46. DOI:<https://doi.org/10.15276/opu.1.60.2020.04>
31. Dubyk Y. Swelling Of The WVER-1000 Reactor Core Baffle / Y. Dubyk, V. Filonov, Y. Filonova // SMIRT 25, Charlotte, NC, USA. August 4-9. 2019. Division II
32. Filonova Y. Improved CFD framework for reactor core baffle swelling assessment/ Y. Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk, V. Kondratjuk // ASME J of Nuclear

Rad Sci. Jan №7(1) 2021: 011404. Paper #NERS-20-1009 (10 pages).
DOI:<https://doi.org/10.1115/1.4047495>

33. Міжнародна конференція «International Conference VVER2019 – Recent and Future» (VVER2019, Prague, Czech Republic, листопад 2019).

34. Філонова Ю.С. Вдосконалення методики визначення температурного поля вигородки РУ типу ВВЕР-1000: автореф. магістерська дисертація: 05.14.14, Київ. 2018.

35. Расчетное обоснование безопасной эксплуатации внутрикорпусных устройств реактора энергоблока № 1 ОП ЗАЭС. Том 2. Оценка прогрессирующего формоизменения ВКУ реактора энергоблока № 1 ОП ЗАЭС, Киев. 2019.

36. Расчетное обоснование безопасной эксплуатации внутрикорпусных устройств реактора энергоблока № 2 ОП ЗАЭС. Том 2. Оценка прогрессирующего формоизменения ВКУ реактора энергоблока № 2 ОП ЗАЭС, Киев. 2019.

37. Расчетное обоснование безопасной эксплуатации внутрикорпусных устройств реактора энергоблока № 3 ОП ЗАЭС. Том 2. Оценка прогрессирующего формоизменения ВКУ реактора энергоблока № 3 ОП ЗАЭС, Киев. 2016.

38. Расчетное обоснование безопасной эксплуатации внутрикорпусных устройств реактора энергоблока № 4 ОП ЗАЭС. Том 2. Оценка прогрессирующего формоизменения ВКУ реактора энергоблока № 4 ОП ЗАЭС.

39. Оценка технического состояния и обоснование нового переназначенного срока эксплуатации оборудования РУ энергоблока № 3 ОП ЮУАЭС. Подэтап 4.2. Расчетное обоснование безопасной эксплуатации ВКУ реактора энергоблока №3 ОП ЮУАЭС. Том 2. Оценка прогрессирующего формоизменения ВКУ реактора, Киев. 2019.

40. Технический отчет. Расчет распухания и прочности вигородки энергоблока №3 ОП РАЭС /191-249-О-ПСЭ-16/ Этап 2.4. DITI 2301/703/REV [2], Сентябрь. 2017.

41. WCAP-18273-P. Neutron Exposure, Dosimetry, and Gamma-Ray Heat Generation Rate Analysis for Zaporizhzhya Unit 4 to Support Life Extension. Westinghouse Electric Company LLC. September, 2017

42. Расчеты радиационной нагрузки на ВКУ и поля энерговыделения в выгородке энергоблока № 1 ОП ЗАЭС. Харьков. 2019.

43. Расчетное обоснование безопасной эксплуатации выгородки реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС. Этап 1. Расчет энерговыделений и радиационного повреждения в выгородке активной зоны энергоблока №1 ОП ЮУАЭС.

44. Реалізація заходів з управління старінням елементів і конструкцій енергоблоку № 1 ВП «Хмельницька АЕС», визначених за результатами оцінки технічного стану при продовженні строку експлуатації. Етап 3.2.6. Оцінка теплогідравлічних параметрів ВКП реактора з використанням методів тривимірної гідродинаміки, Київ. 2021.

45. Хмельницкая АЭС. Энергоблок 1. Оценка технического состояния и переназначение срока эксплуатации корпуса реактора, верхнего блока, внутрикорпусных устройств и опорных элементов реактора энергоблока № 1 ОП ХАЭС. Этап 2.3.3.25. Расчет на статическую прочность и формоизменение выгородки реактора энергоблока № 1 ОП ХАЭС.

46. Волков В.Ю. Разработка CFD модели реактора проекта АЭС-2006 / В. Ю. Волков, Л. А. Голибродо, А. А. Крутиков и др. / ОАО ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.

47. Kliem S. Analyses of the V1000CT-1 benchmark with the DYN3D/ATHLET and DYN3D/RELAP coupled code systems including a coolant mixing model validated against CFD calculations / S. Kliem, Y. Kozmenkov, T. Höhne et al. Dresden, Germany.

48. Höhne T. CFD calculation of a mixing experiment in the VVER-1000 reactor model / T. Höhne, Y. Bezrukov - The 4-th International Conference Safety Assurance of nuclear power plants with WWER, FSUEEDO "GIDROPRESS", Podolsk, Moscow Region, Russian Federation, 23-25 May. 2005.

49. Ключников А. А. Теплофизика безопасности атомных электростанций: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС. 2010. 484 с.

50. Кириллов П.Л., Терентьева М.И, Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники, Обнинск, ГНЦ РФ ФЭИ. 2005. 182 с.
51. Дементьев Б. А. Ядерные энергетические реакторы / Б. А. Дементьев. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 351 с.
52. Ушаков П. А. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче к воде в шахматных пучках стержней / П. А. Ушаков, А. В. Жуков, П. А. Титов. Обнинск: Препринт ФЭИ-526. 1974.
53. Кириллов П. Л. Тепло-массообмен в ядерных энергетических установках / П. Л. Кириллов, Г. П. Богословская. Москва: Энергоатомиздат, 2000. 446 с.
54. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. Москва, издательство «Энергия».
55. WIMS-ANL USER MANUAL REV. 4 / ANL/RERTR/TM-23 / Jan. 2001.
56. Хмельницкая АЭС. Энергоблок 1. Оценка технического состояния и переназначение срока эксплуатации корпуса реактора, верхнего блока, внутрикорпусных устройств и опорных элементов реактора энергоблока № 1 ОП ХАЭС. Этап 2.3.3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА ЭНЕРГОБЛОКА №1 ОП ХАЭС.
57. Абдуллае А. М. Расчет флюенса нейтронов и тепловыделения в конструкционных элементах реактора ВВЭР-100 0 методом Монте-Карло / А. М. Абдуллае, С. А. Солдатов, В. В. Ганн, С. В. Черницкий. // Ядерна та радіаційна безпека. 2018. №1. С. 11–17.
58. MCNPX User's Manual Version 2.6.0, LA-CP-07-1473, April 2008
59. Марин С.В. Расчёт тепловыделения в материалах ядерного реактора методом Монте-Карло / Марин С.В., Олейник Д.С., Сухино-Хоменко Е.А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2016. №5 С. 27–35.
60. Стандарт государственного предприятия Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом». Радиационные характеристики и

остаточное энерговыделение отработавших тепловыделяющих сборок ВВЭР-1000, СОУ НАЕК 099:2015, Киев. 2015.

61. Обоснование безопасности эксплуатации активной зоны с ТВСА ВВЭР-1000 с уран-гадолиниевым топливом на энергоблоке №2 Хмельницкой АЭС начиная с первой топливной загрузки. Опытное конструкторское бюро машиностроения, Нижний Новгород, 2004.

62. Технический отчет "Расчеты радиационной нагрузки на ВКУ и поля энерговыделения в вигородке энергоблока №5 ЗАЭС", ред. 0, НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ, Харьков, Декабрь, 2018.

63. Technical Reports series № 452, "INTERNATIONAL REACTOR DOSIMETRY FILE 2002 (IRDF-2002)", IAEA, Vienna, 2006.

64. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, RSICC. CCC-700 MCNP4C, April 10, 2000.

65. Аттестационный паспорт программного средства №241 от 23.09.2008. БИПР-7А (версия 1.5). 5 с.

66. Аттестационный паспорт программного средства №137 от 21.02.02. БИПР-7А (версия 1.3). 6 с.

67. Аттестационный паспорт программного средства №136 от 21.02.02. Пермак-А (версия 1.3). 6 с.

68. Філонов В.В. Опис радіаційного модулю мультифізичного коду для аналізу деградації геометрії вигородки / В. В. Філонов, Ю. С. Філонова, О. В. Коваленко, В. А. Кондратюк. // Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». № 1. 2022 С. 81–89, DOI:<https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259232>

69. RELAP5 / MOD3.2 CODE MANUAL VOLUME IV: MODELS AND CORRELATIONS U. S. NRC, Washington, DC 20555

70. Mikhail V. L. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation / Lurie Mikhail. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH. 2008. P. 230 (ISBN: 978-3-527-40833-7).

71. Селезнев В. Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов / В. Е. Селезнев, В. В. Алешин, С. Н. Прялов. // МАКС Пресс, Москва. 2007. 695 с. (ISBN 978-5-317-02011-8).

72. Filonov V. Transfer matrix method for analysis of thermohydraulic characteristics of supercritical water using sub-channel approach / V. Filonov, Y. Filonova, Y. Dubyk, V. Razumovskiy. // 10th International Symposium on SCWRs (ISSCWR-10). 2021. P. 1–15.

73. Орыняк И. В. Прочность материалов и конструкций: Серия монографий / И. В. Орыняк. Киев: ИПП НАНУ, 2011. 472 с. (ISBN 978-966-6080-1; 4).

ДОДАТОК А. ПОРІВНЯННЯ ОТРИМАНИХ ЗНАЧЕНЬ МАСОВИХ ВИТРАТ
В ОХОЛОДЖУЮЧИХ КАНАЛАХ ВИГОРОДКИ ВВЕР-1000 ПРИ РІЗНИХ
КОНФІГУРАЦІЯХ ЇЇ КОНТАКТУ ІЗ ШАХТОЮ ВНУТРІШНЬОКОРПУСНОЮ

Табл. А.1 – Розгорнута таблиця значень масових витрат в охолоджуючих каналах вигородки на різних аксіальних рівнях (для повного переліку варіантів розглянутих в Розділі 2 конфігурацій контакту вигородки та ШВК)

Варіанти схем течії теплоносія в кільцевому каналі (КК)	Значення масових витрат в каналах з наявністю перемішування з КК в областях міжкільцевих шпильок (по висотно), [кг/с]				Граничні значення масових витрат ВХІД/ВИХІД, [кг/с]				
	Аксіальний рівень**	КК	К1*	К2*	КК	К1	К2	К1*	К2*
Нормальна схема течії	1(in)	9.349	0.605	1.316	9.349/ 2.976	0.596/ 0.596	1.310/ 1.310	0.605/ 0.748	1.316/ 2.875
	1-2	5.700	-	2.089					
	2	5.217	0.382	2.366					
	2-3	4.071	-	2.820					
	3	4.768	0.362	2.583					
	3-4	4.142	-	2.804					
	4	4.383	0.348	2.690					
	4-5	3.506	-	2.960					
	5(out)	2.976	0.748	2.875					
Повний контакт	1(in)	-	0.605	1.315	-	0.598/ 0.598	1.311/ 1.311	0.605/ 0.280	1.315/ 1.516
	1-2	-	0.006	1.640					
	2	-							
	2-3	-	0.004	1.629					
	3	-							
	3-4	-	0.003	1.654					
	4	-							
	4-5	-	0.004	1.650					
	5(out)	-	0.280	1.516					
Перекриття КК на рівні нижнього бурта 1 кільця	1(in)	0.000	0.608	1.320	0.000/ 1.247	0.597/ 0.597	1.309/ 1.309	0.608/ 0.379	1.320/ 1.142
	1-2	1.074	-	1.366					
	2	0.593	0.213	1.233					

	2-3	1.380	-	1.335					
	3	0.988	0.187	1.176					
	3-4	1.570	-	1.288					
	4	1.084	0.193	1.112					
	4-5	1.635	-	1.245					
	5(out)	1.247	0.379	1.142					
Перекриття КК на рівні верхнього бурта 5 кільця	1(in)	9.394	0.602	1.313	9.394/ 0.000	0.595/ 0.595	1.309/ 1.309	0.602/ 1.540	1.313/ 3.203
	1-2	6.129	-	2.144					
	2	6.433	0.659	1.907					
	2-3	4.867	-	2.520					
	3	5.412	0.364	2.322					
	3-4	4.586	-	2.626					
	4	4.894	0.259	2.567					
	4-5	4.083	-	2.839					
	5(out)	0.000	1.540	3.203					
Перекриття КК на рівні нижнього бурта 1 кільця та верхнього бурта 5 кільця	1(in)	0.000	0.605	1.320	0.000/ 0.000	0.598/ 0.598	1.307/ 1.307	0.605/ 0.668	1.320/ 1.306
	1-2	0.856	-	1.357					
	2	1.261	0.201	1.255					
	2-3	1.101	-	1.349					
	3	1.627	0.191	1.182					
	3-4	1.304	-	1.289					
	4	1.743	0.199	1.108					
	4-5	1.348	-	1.245					
	5(out)	0.000	0.668	1.306					
Перекриття КК на рівні бурта між 4 та 5 (верхнім) кільцями	1(in)	9.378	0.602	1.310	9.378/ 0.101	0.596/ 0.596	1.307/ 1.307	0.602/ 0.154	1.310/ 3.892
	1-2	6.068	-	2.042					
	2	7.090	0.292	1.697					
	2-3	5.566	-	2.298					
	3	5.748	0.265	2.414					

	3-4	4.791	-	2.715					
	4	3.964	0.440	2.863					
	4-5	0.000	-	4.005					
	5(out)	0.101	0.154	3.892					
Перекриття КК на рівні буртів між 3- 4 та 4-5 (верхнім) кільцями	1(in)	9.367	0.606	1.320	9.367/ 0.455	0.596/ 0.596	1.310/ 1.310	0.606/ 0.167	1.320/ 3.656
	1-2	7.343	-	1.445					
	2	6.033	0.181	2.048					
	2-3	4.445	-	2.548					
	3	4.382	0.326	2.494					
	3-4	0.000	-	3.859					
	4	0.437	0.000	3.680					
	4-5	0.000	-	3.822					
	5(out)	0.455	0.167	3.656					
Реальне перекриття КК на рівні буртів між 3- 4 та 4-5 (верхнім) кільцями	1(in)	9.368	0.601	1.314	9.368/ 0.762	0.595/ 0.595	1.307/ 1.307	0.601/ 0.251	1.314/ 3.592
	1-2	6.556	-	1.734					
	2	6.505	0.299	2.004					
	2-3	4.698	-	2.563					
	3	4.604	0.297	2.612					
	3-4	0.727	-	3.667					
	4	1.483	-0.019	3.514					
	4-5	0.422	-	3.758					
	5(out)	0.762	0.251	3.592					

Примітка:

* - канали, що мають області змішування з КК в області міжкільцевих шпильок;

** - аксіальний рівень позначений номером відповідного кільця (позначення 1-2 відповідає рівню між першим (нижнім) і другим кільцями)

ДОДАТОК Б. ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ В ПЕРЕРІЗІ ТА НА ЗОВНІШНІЙ
ПОВЕРХНІ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ШПИЛЬОК, ОТРИМАНІ ПРИ РІЗНИХ
КОНФІГУРАЦІЯХ КОНТАКТУ ВИГОРОДКИ ТА ШВК

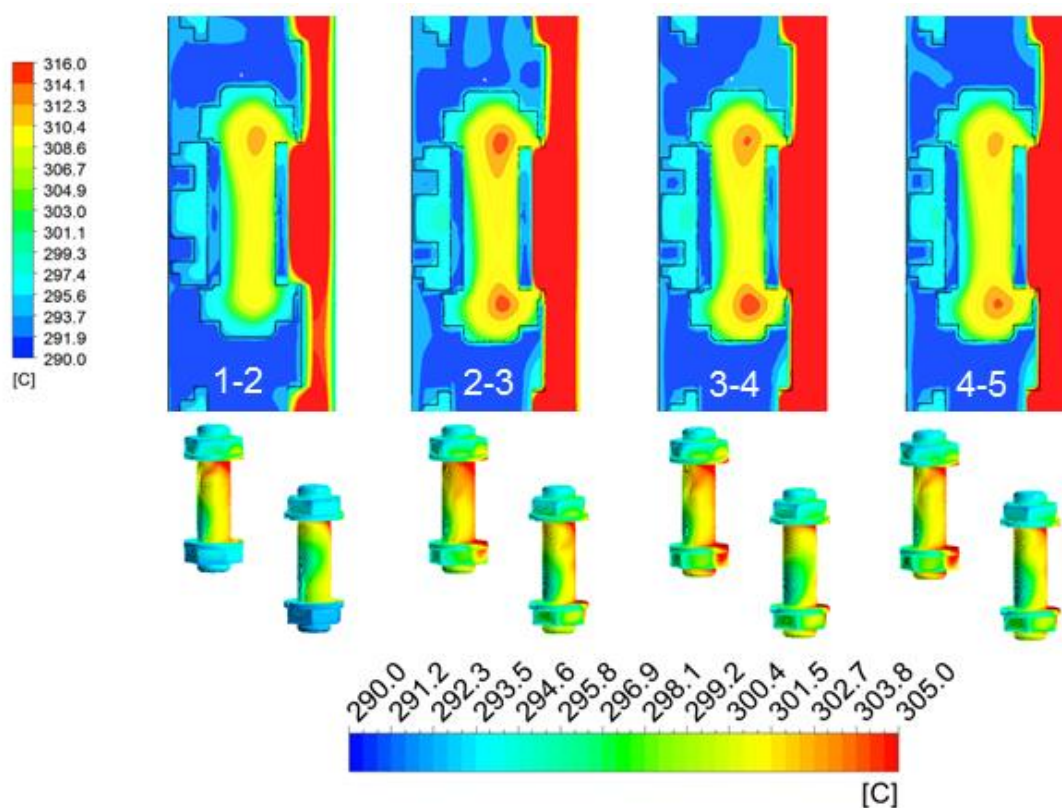


Рис. Б.1 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок (Проектна геометрія - 0 конф.)

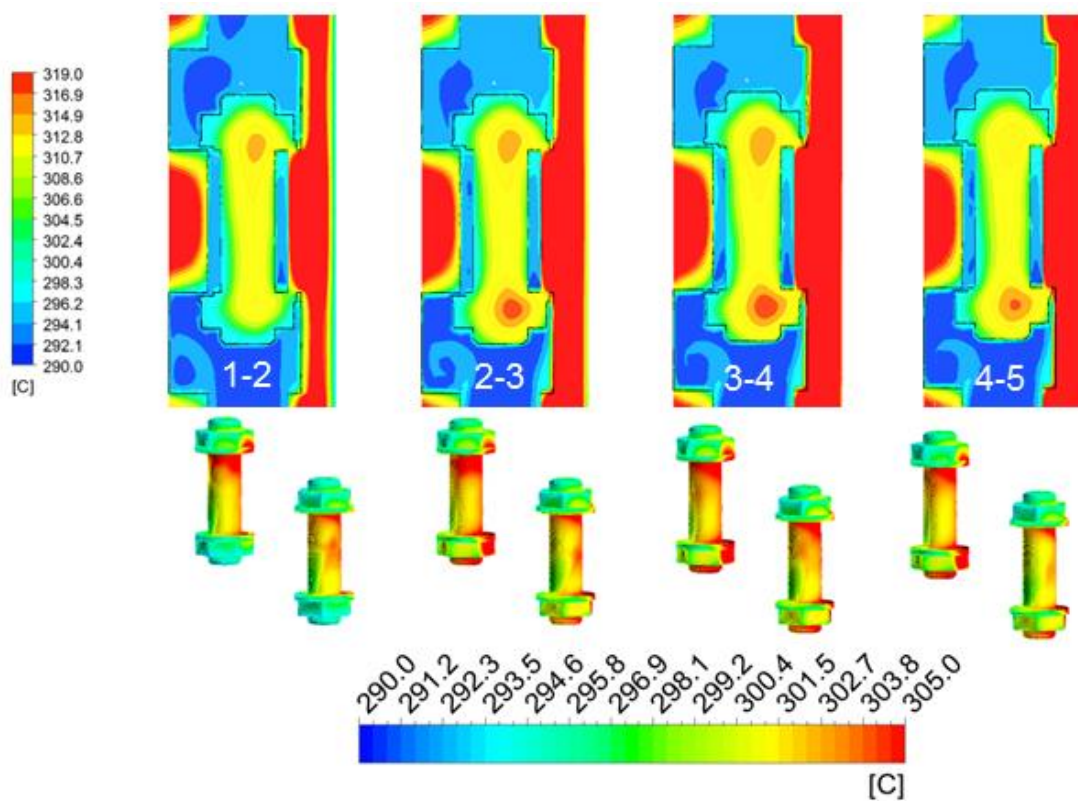


Рис. Б.2 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок (Повний контакт - 1 конф.)

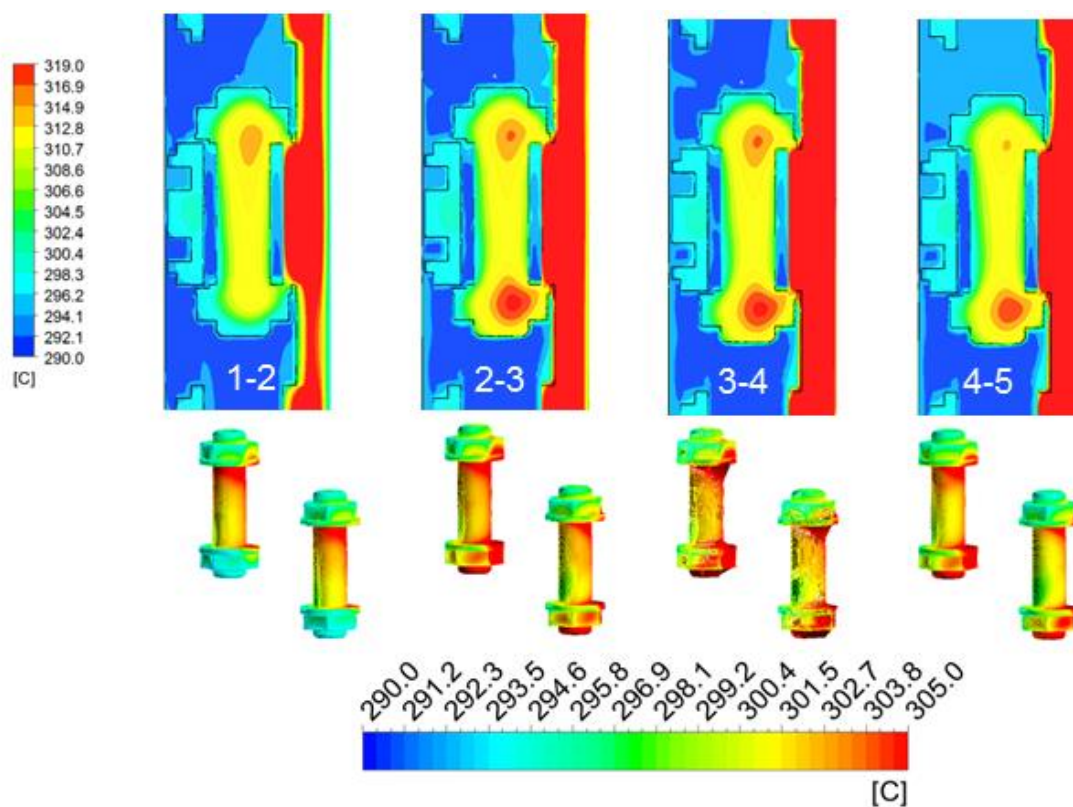


Рис. Б.3 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок (Перекриття нижнього та верхнього буртів - 2 конф.)

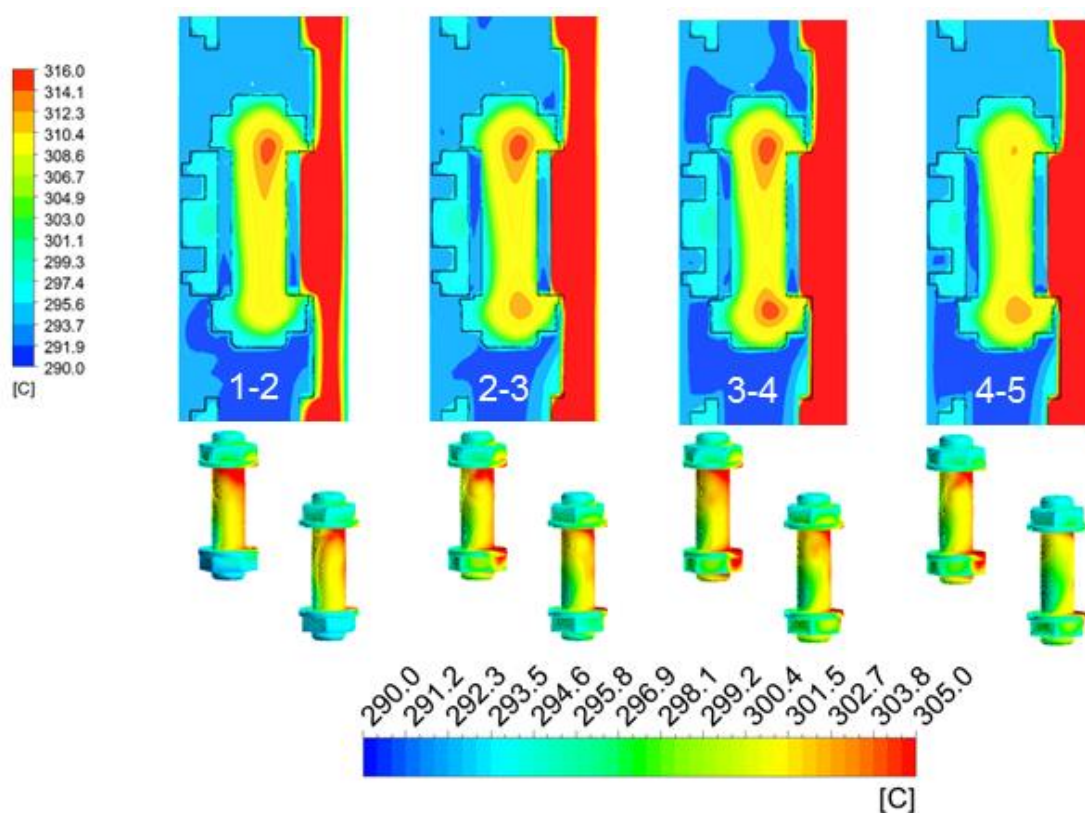


Рис. Б.4 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок (Перекриття верхнього бурта - 3 конф.)

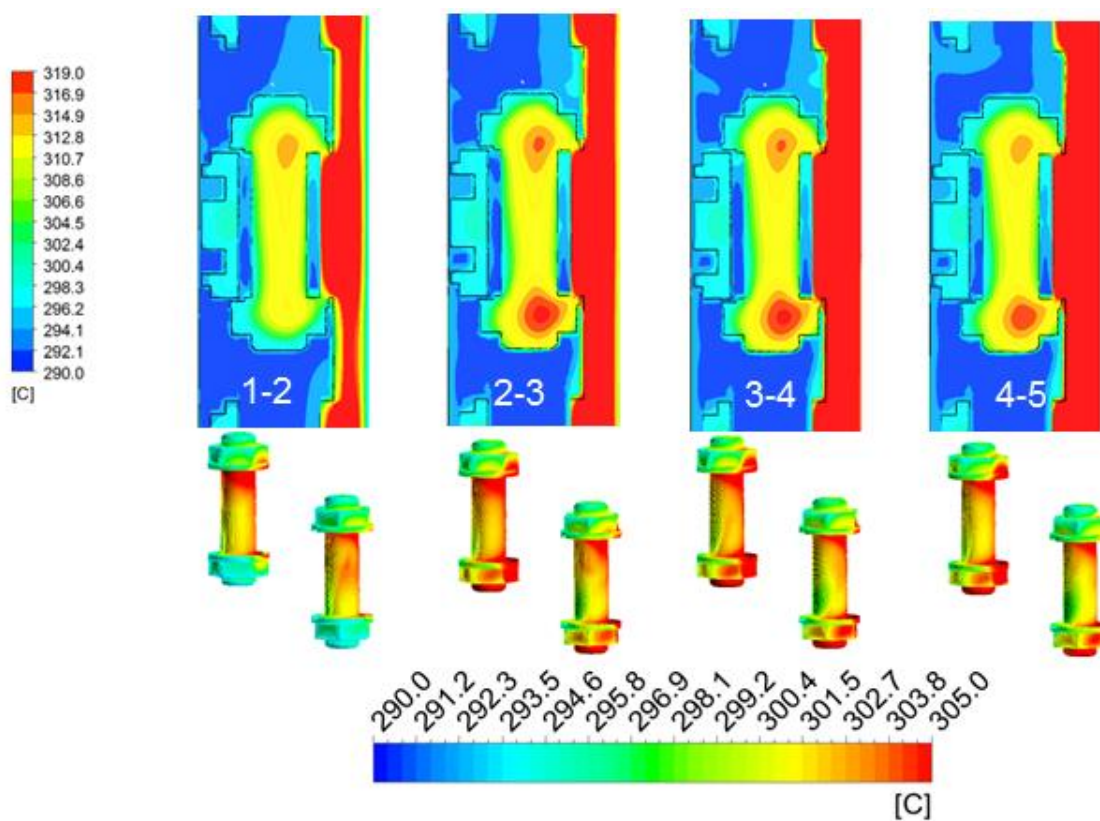


Рис. Б.5 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок
(Перекриття нижнього бурта - 4 конф.)

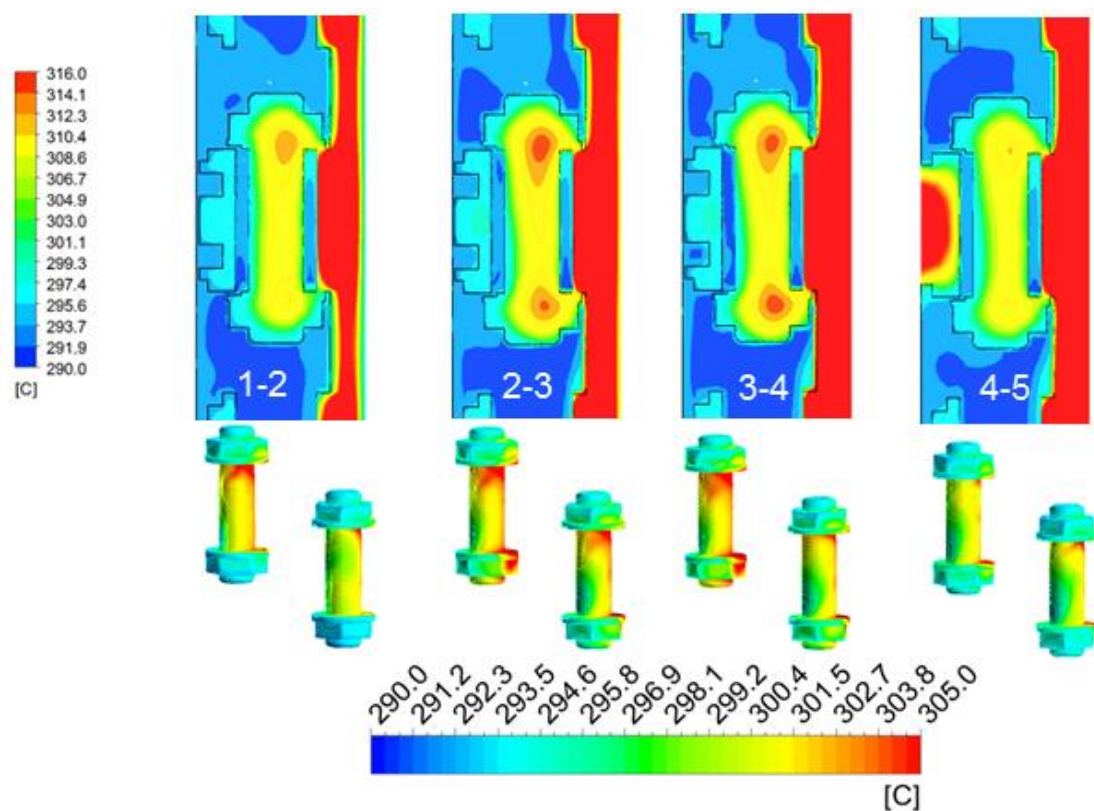


Рис. Б.6 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок
(Перекриття бурта між 4 та 5 кільцями - 5 конф.)

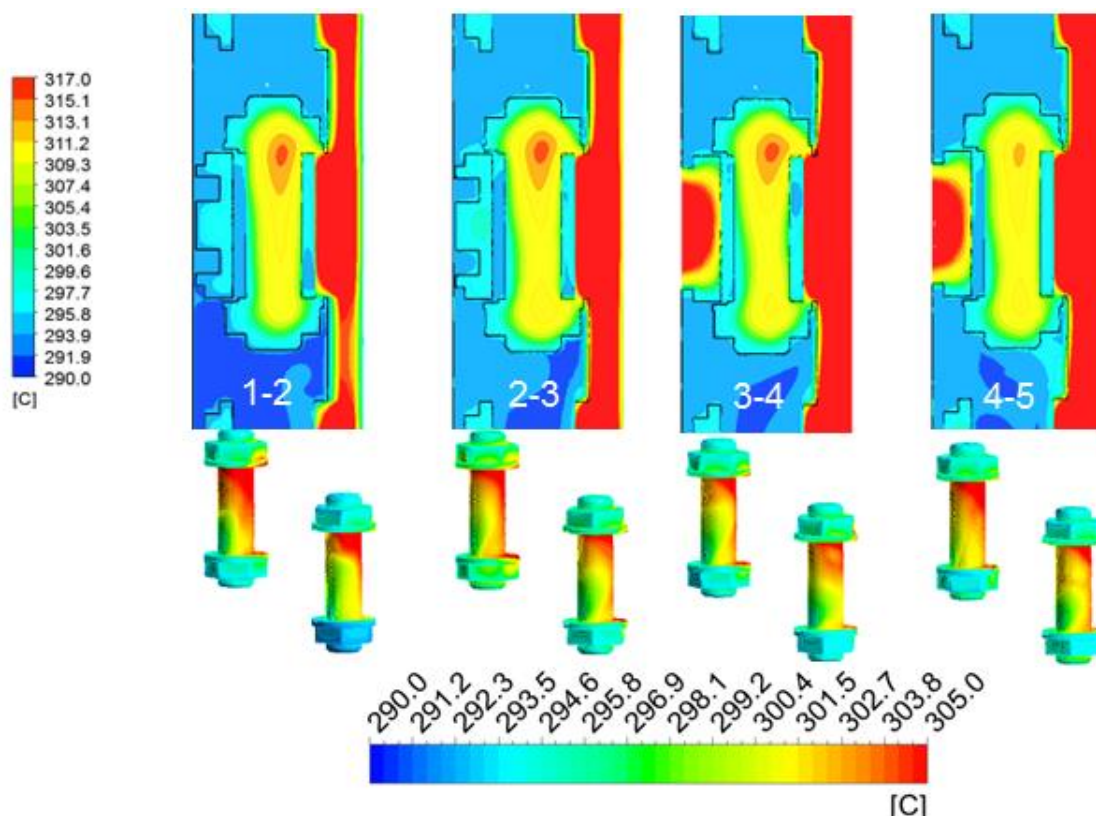


Рис. Б.7 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок
(Перекриття буртів між 3-4 та 4-5 кільцями - 6 конф.)

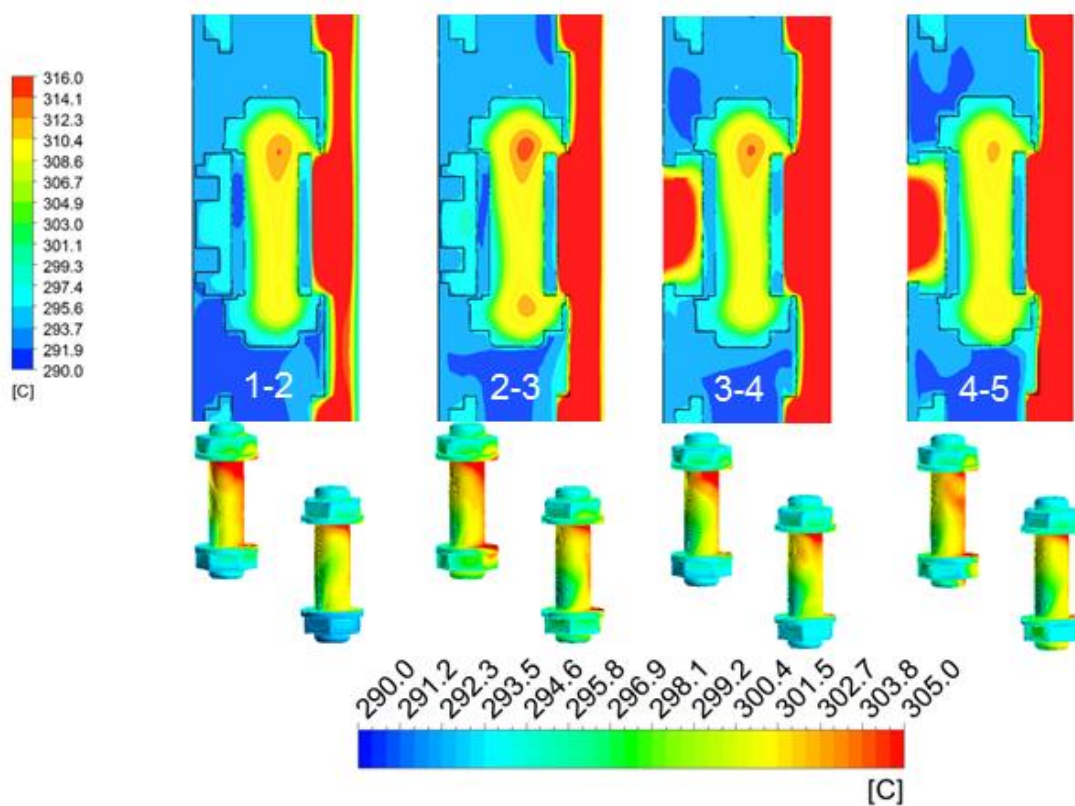


Рис. Б.8 – Температурне поле в перерізі та на зовнішній поверхні шпильок
(Реальна картина перекриття буртів між 3-4 та 4-5 кільцями - 7 конф.)

ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ ВАРІАНТНИХ РОЗРАХУНКІВ НДС
ВИГОРОДКИ ПРИ РОЗПУХАННІ ДЛЯ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ ЇЇ
КОНТАКТУ ІЗ ШВК

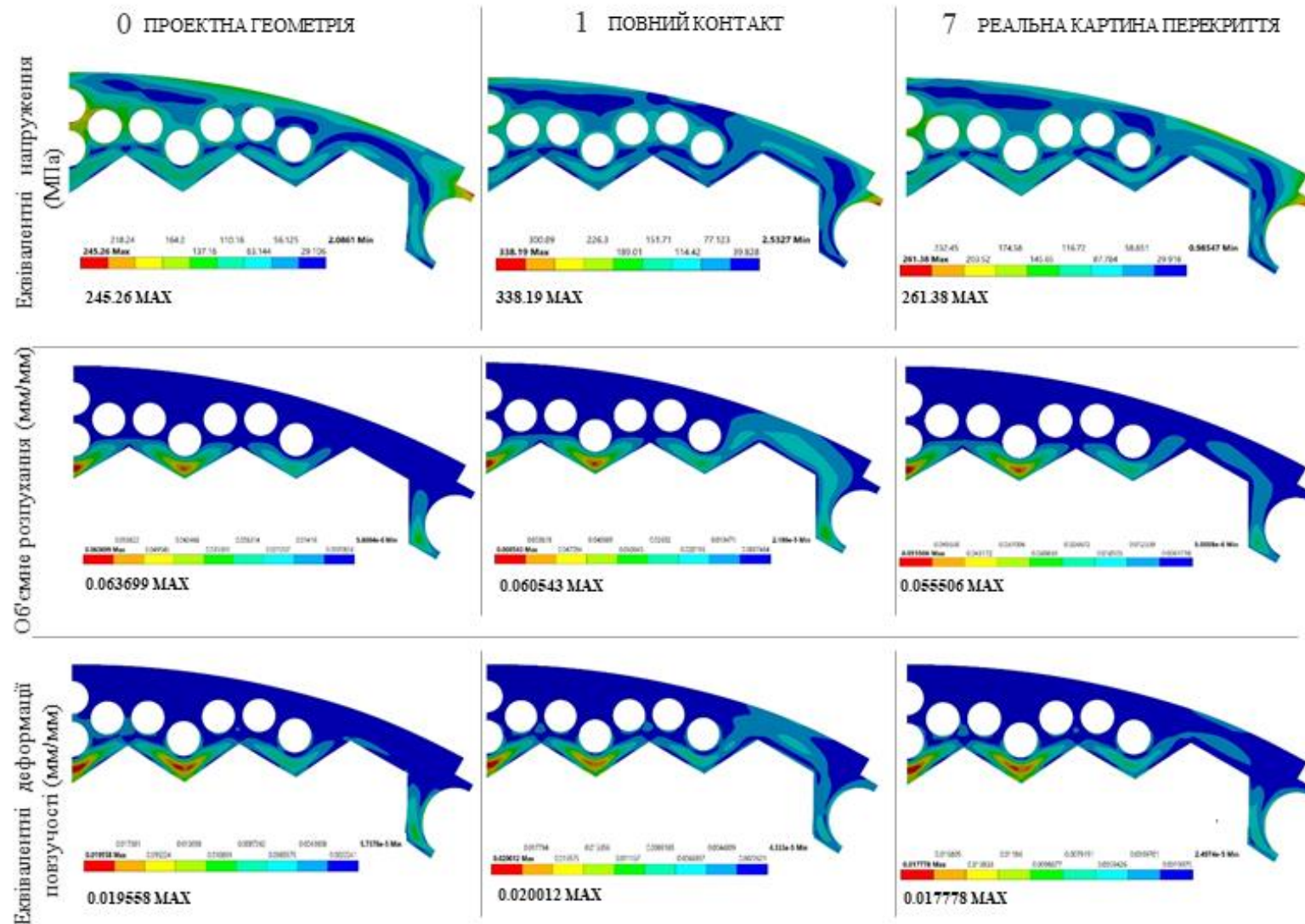


Рис. В.1 – Результати впливу конфігурації контакту на цільові функції розрахунків розпухання (наведені поля еквівалентних напружень (МПа), об'ємного розпухання (мм/мм) та еквівалентних деформацій (мм/мм) для прогнозної 60-ї кампанії одного з енергоблоків АЕС України)

ДОДАТОК Г. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ПІДХОДІВ
ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ



**Товариство з обмеженою
відповідальністю
"ІПП-ЦЕНТР"**

01104, м. Київ, вул. Болсуновська, 8
Тел/факс: (044) 502-4570. Код ЄДРПОУ 24264063
E-mail: ipp@ipp-centre.com.ua
Веб-сайт: www.ipp-centre.com.ua

Від «14» вересня 2022 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «ІПП-ЦЕНТР»
Матеяшук Б.М.
«14» 09 2022



ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Філонової Юлії Сергіївни
на тему

«Обґрунтування надійності тепловідводу від металу вигородки РУ типу ВВЕР-1000 при деградації її геометрії»

Дана довідка засвідчує те, що розроблені інженерні підходи щодо оцінки та аналізу умов охолодження вигородки та елементів внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП), викладені в дисертаційній роботі Ю.С.Філонової, використовувалися ТОВ «ІПП-ЦЕНТР» для оцінки технічного стану і обґрунтуванні можливості довгострокової експлуатації елементів ВКП реакторних установок типу ВВЕР-1000 енергоблоків АЕС України.

В рамках вказаних робіт, з використанням розроблених дисертанткинею розрахункових моделей та методології, виконувалась оцінка умов охолодження елементів ВКП для проектної геометрії, а також при прогнозованій зміні деградації геометрії внаслідок опромінення. Запропоновані в дисертаційній роботі процедури з урахування наявності зворотних зв'язків типу «розкриття – зміна умов охолодження ВКП – зменшення інтенсивності розкриття» дозволили уточнити оцінку прогнозованого вичерпання проектних зазорів між вигородкою і внутрішньокорпусною шахтою, та оцінити контактні напруження. Проте, одним з ключових питань при обґрунтуванні можливості продовження терміну експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000, що були вирішені завдяки запропонованій методиці є оцінка вичерпання зазорів між вигородкою і тепловидільними збірками (ядерним паливом). Окрім цього, уточнені розрахунки температурного поля дозволили отримати більш реалістичні розподіли механічних напружень, що є вкрай важливим для оцінки втомної довговічності та опору крихкому руйнуванню вигородки.

Головний інженер,
ТОВ «ІПП-ЦЕНТР»,
к.т.н.

Заразовський М.М.

ДОДАТОК Д. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації, в яких представлені основні наукові результати дисертації:

1. Filonov V. Calculation of VVER-1000 core baffle temperature distribution for its swelling assessment / V. Filonov, Y. Filonova, Y. Dubyk, A. Bohdan // Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(60). 2020. P. 35-46. DOI:<https://doi.org/10.15276/opu.1.60.2020.04>
2. Філонов В.В. Опис радіаційного модулю мультифізичного коду для аналізу деградації геометрії вигородки / В. В. Філонов, Ю. С. Філонова, О. В. Коваленко, В. А. Кондратюк. // Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». № 1. 2022 С. 81–89, DOI:<https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259232>
3. Filonova Y. Improved CFD framework for reactor core baffle swelling assessment/ Y. Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk, V. Kondratjuk // ASME J of Nuclear Rad Sci. Jan №7(1) 2021: 011404. Paper #NERS-20-1009 (10 pages). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4047495> (Q2, Scopus)

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Філонова Ю. С. Оценка распределения расходов по ВКУ реактора ВВЭР-1000. // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. 2017.
5. Філонова Ю. С. CFD модель охлаждения вигородки ВВЭР-1000 для оценки распухания. // Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. 2018.
6. Filonova Y. Reactor baffle cooling CFD framework for swelling assessment / Y. Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk // Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering ICONE26-82365. London, England, July 22-26, 2018. P. 10. DOI:<https://doi.org/10.1115/ICONE26-82365>
7. Філонов В.В., Розрахунок температурного поля вигородки реактору ВВЕР-1000 для аналізу її розпухання /В.В. Філонов, Ю.С. Філонова, Я.Р. Дубик, А.В. Богдан // VI міжнародна науково-практична конференція «Безпека та

ефективність атомної енергетики», Одеський національний політехнічний університет, Україна, м. Одеса. Вересень 2018.

8. Філонова Ю.С., Усовершенствованная процедура аналитической оценки массовый граничных условий для охлаждения выгородки реактора ВВЭР-1000/ Ю.С. Філонова, В.В. Філонов, VI науково-практична конференція «Комп'ютерна гідромеханіка» // Інститут гідромеханіки НАН України, Україна, м. Київ. Вересень 2018.

9. Філонова Ю.С. Reactor core baffle temperature distribution evaluation for swelling assessment/Ю.С. Філонова, В.А. Кондратюк// Матеріали II міжнародної наукової мультидисциплінарної конференції студентів та молодих учених “Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future”, 2018p.

10. Філонова Ю. С. Проблематика процесів деградації геометрії вигородки ВВЕР-1000 при роботі АЕС у понад проєктний термін. // Матеріали XVII-й міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів "Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики". 23 - 26 квітня. 2019 р.

11. Y. Dubyk, Swelling Of The WVER-1000 Reactor Core Baffle/ Y. Dubyk , V.Filonov, Y.Filonova//SMIRT 25, Charlotte, NC, USA, August 4-9, 2019, Division II

12. Y. Filonova. Changes in heat transfer conditions due to the contact of the core baffle and barrel during swelling processes/Y.Filonova, V. Filonov, Y. Dubyk// Міжнародна конференція «International Conference VVER2019 – Recent and Future» // VVER2019, Prague, Czech Republic, листопад 2019.

13. Філонова Ю. С. Концепція спряженого розрахунку полів радіаційного енерговиділення та температури з урахуванням особливостей формозміни вигородки ВВЕР-1000/ Філонова Ю. С., О.В. Коваленко. // Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів. 2021.