

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Одеська політехніка»

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Одеська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОЛОВЧЕНКО АНДРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 621.039.588

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ НА ГЕРМЕТИЧНІСТЬ
СИСТЕМИ ГЕРМЕТИЧНОГО ОГОРОДЖЕННЯ БЛОКУ АЕС З ВВЕР-1000**

Спеціальність 143 – Атомна енергетика
Галузь знань 14 - Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ А. Головченко

Науковий керівник Кравченко Володимир Петрович, доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри атомних електростанцій

ОДЕСА - 2024

АНОТАЦІЯ

Головченко А.М. Удосконалення методики випробувань системи герметичного огороження блоку АЕС з ВВЕР-1000. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 «Атомна енергетика» (14 - Електрична інженерія). - Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, 2024.

На сьогоднішній день атомні електростанції (АЕС) України виробляють більше 50 % електрики, що виробляється в країні. Підвищення економічності АЕС є першочерговою задачею поряд з підтримкою високих показників безпеки. Одним з показників економічності роботи АЕС є коефіцієнт встановленої потужності (КВВП), який відображає завантаження енергоблоку протягом року. Наразі великий вплив на КВВП має планово-попереджувальний ремонт, складовою якого є випробування систем безпеки, в тому числі системи герметичного огороження (СГО) реакторного відділення. СГО є останнім бар'єром безпеки на шляху виходу радіоактивних елементів та іонізуючого випромінювання в навколишнє середовище при аварії. Її надійності приділяється велика увага: після кожного планово-попереджувального ремонту (ППР) або після кожного позаштатного розущільнення засобів локалізації аварії здійснюється випробування СГО на герметичність. Складність та велика тривалість випробувань за «абсолютним» методом (більше ніж доба) є стимулом для скорочення терміну випробувань. В роботі досліджуються засоби скорочення часу випробувань, що доцільно з економічної точки зору. Були розглянуті всі п'ять етапів випробувань та запропоновані засоби їх скорочення. Найбільш суттєвими є використання ежектору для скорочення часу нагнітання повітря та використання компенсаційного методу для скорочення часу вимірювань. Запропоновані засоби дозволяють скоротити час вимірювань більше, ніж вдвічі.

Враховуючи, що кожна година простою енергоблоку – це недовиробіток одного мільйону кВт·год, скорочення часу проведення випробувань є актуальною задачею для покращення економічних показників роботи сучасних АЕС.

У **вступі** обґрунтовано актуальність і важливість роботи, визначено мету, завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відображено її зв'язок з галузевими дослідженнями, а також з науково-дослідними роботами, що виконувались в Національному університеті «Одеська політехніка» за напрямком підвищення ефективності та безпеки, відмічено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** виконано аналіз світового досвіду в частині випробувань СГО на герметичність, проведено аналіз патентної літератури в цьому напрямку в Україні, США та Франції. Розглянуто метод вимірювання, що використовується зараз на АЕС та принцип застосування компенсаційного методу визначення степені герметичності.

По результатам проведеного аналізу визначено можливі шляхи подальших досліджень у вибраному напрямку. Визначено мету роботи та необхідні завдання, які потрібно виконати для досягнення мети.

Другий розділ присвячений розробці математичної моделі розрахунку повітряного ежектору, запропонованого для зменшення часу нагнітання повітря для випробувань. Представлена методика визначення характеристик ежектора визначеної конструкції, що дає можливість розрахувати час нагнітання до заданого тиску. Проведено визначення часу нагнітання повітря тільки за допомогою компресору. Розроблено методику визначення характеристики ежектора при заданих параметрах на вході та виході ежектора. Проведено оптимізацію конструкції ежектору з точки зору мінімізації часу нагнітання повітря. Проведені варіантні розрахунки часу нагнітання повітря до СГО при використанні ежекторів різної конструкції. Визначено, що оптимальна конструкція ежектору відповідає проєктному значенню тиску в ГО, що дорівнює 1,45 бар. Враховано додатковий аеродинамічний опір обладнання для очищення повітря, що підсмоктується, від пилу та вологи.

У **третьому розділі** розглядається методика використання компенсаційного методу визначення інтегрального витоку з ГО. Розглянуто схему, приведено описання, розроблено алгоритм проведення випробування та методику обробки

отриманих результатів.

Четвертий розділ присвячено розробці математичної моделі стану повітря в СГО в процесі нагнітання та стабілізації параметрів. Математична модель складається з вирішення системи наступних диференціальних рівнянь: швидкість зміни маси пароповітряної суміші в ГО, швидкість зміни кількості енергії пароповітряної суміші в ГО, зміна температури в часі за шарами матеріалу пасивних поглиначів теплоти при нестационарній теплопровідності. Розроблена модель була верифікована на результатах проведення випробування на 4-му енергоблоці Рівненської АЕС. Розроблена модель дозволяє визначити фактори, що впливають на час етапу стабілізації параметрів. На основі аналізу результатів розрахунків, отриманих за допомогою розробленої моделі, були запропоновані заходи, які дозволяють зменшити час етапу стабілізації.

У п'ятому розділі проведено аналіз можливості скорочення часу випробувань в результаті запропонованих заходів. В результаті отримано, що

- через відміну процесу вакуумування, за результатами якого вже багато років не визначаються ніякі дефекти;
- скорочення часу нагнітання повітря завдяки використанню ежектора;
- скорочення часу стабілізації параметрів, через використання запропонованих заходів;
- скорочення часу вимірювання через використання компенсаційного методу;
- скорочення часу скидання тиску через регулювання скидного клапану, час випробувань може бути зменшений майже вдвічі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше було запропоновано та обґрунтовано використання ежектору для зменшення часу нагнітання повітря для проведення випробувань.
- розроблено методику проведення випробувань за компенсаційним методом. Запропонована методика обробки результатів випробувань.
- змодельований процес зміни параметрів в ГО, що дозволив розробити рекомендації відносно скорочення часу етапу стабілізації параметрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

1. розроблені пропозиції, спрямовані на зменшення часу випробувань на герметичність СГО. Це дозволить скоротити час ППР і підвищити виробіток електроенергії енергоблоками АЕС України.

2. результати дисертації використано у держбюджетній науково-дослідній роботі № 124-42 «Ядерна та радіаційна безпека та ефективність енергоблоків АЕС з урахуванням сучасних проблем та тенденцій в атомній електроенергетиці» (№ д/р 0116U004924) результати дисертації використано у держбюджетній науково-дослідній роботі

3. результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 143 – атомна енергетика.

Ключові слова: система герметичного огороження, інтегральний витік, компенсаційний метод вимірювання витоку, використання ежектору для нагнітання повітря.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kravchenko, V., Vlasov, A., Andryushchenko, A., Vlasov, D., Golovchenko, A., Gavrilov, P. (2022). Reduced air injection time during containment testing due to the use of an ejector. Odes'kyi Polytechnichniy Universytet, Pratsi, 1 (65), 62–69. Reduced air injection time during containment testing due to the use of an ejector / V. Kravchenko, A. Vlasov, A. Andryushchenko, D. Vlasov, A. Golovchenko, P. Gavrilov // Пр. Одес. політехн. ун-ту. – Одеса, 2022. – Вип. 1 (65). – Р. 62–69. <https://pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1660041533.pdf>
Журнал реферується в зарубіжних базах даних «Україніка наукова», Ulrich's periodicals directory (США), Index Copernicus.
2. Кравченко В. П. , Власов А. П. , **Головченко А. М. ,** Мазуренко А. С. , Дубковський В. О. , Чулкін О. О. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність /Ядерна та радіаційна безпека. 2(98)2023. С. 53-60.

Doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05) Журнал входить до міжнародної науково метричної бази даних SCOPUS

<http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/13962/1/document-3.pdf>

3. **Головченко А. М.** , Запорожан В. В. , Запорожан І. В., Кравченко В. П. Моделювання процесів у герметичному огороженні реакторної установки з ВВЕР-1000 під час випробувань на герметичність /Ядерна енергетика та довкілля. № 3 (28) 2023. С. 3-9.

Журнал індексується в базах даних Index Copernicus, Google Scholar, INIS, ResearchBib. doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.1

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Кравченко В.П., Головченко А.М. Зменшення часу випробувань на герметичність захисної оболонки через використання ежектору / XVI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики», Нетішин, 16-18 листопада 2022 р.
2. Доповідь на робочій зустрічі на Південноукраїнській АЕС про стан та перспективи зменшення часу випробувань на герметичність захисної оболонки АЕС з ВВЕР-1000. Южноукраїнськ. 17 квітня 2023 р.
3. Кравченко В.П. Власов А.П., Головченко А.М., Мазуренко А.С., Дубковський В.О., Чулкін О.О. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність / V Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», Київ, 28-29 вересня 2023 р.
4. Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Математичне моделювання випробувань на герметичність контейнменту з ВВЕР-1000. Збірник праць XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. P. 291-293
https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_mo

dern_development.pdf

Наукові результати роботи впроваджені (див. Додаток Б) у методичні матеріали дисципліни «Атомні електростанції», «Безпека та надійність АЕС» кафедри АЕС Національного університету «Одеська політехніка» та використані під час роботи над кваліфікаційними роботами бакалаврів та магістрів Національного університету «Одеська політехніка» Литвинова Богдана, Новоскольцева Миколи та Череваня Валентина (детальніше див. Акт впровадження від 5 березня 2024 року).

ABSTRACT

A. Holovchenko. Improvement of the test procedure for the hermetic enclosure system of a VVER-1000 NPP unit. - Manuscript copyright.

Thesis for a Doctor of Philosophy Degree in Specialty 143 «Nuclear Energy» (14 - Electrical engineering). - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2024.

Nuclear power plants (NPPs) in Ukraine currently generate more than 50% of the country's power generation. Increasing the efficiency of NPPs is a priority task, along with maintaining high safety indicators. One of the indicators of the efficiency of NPP operation is the capacity factor (CF), which reflects the load of the power unit during the year. Currently, a significant impact on the CF is made by scheduled preventive maintenance (SPM), which includes testing of safety systems, including the containment enclosure (CE) of the reactor compartment. The CE is the last safety barrier to prevent the release of radioactive elements and ionizing radiation into the environment in the event of an accident. Its reliability is given great attention: after each SPM or after each emergency depressurization of the accident mitigation systems, the CE is tested for leak-tightness. The complexity and long duration of full-scale testing procedures (more than 24 hours) are a stimulus for reducing the testing time. This paper investigates the means of reducing the testing time, which is economically feasible. All five stages of the testing procedures were considered and methods for their reduction were proposed. The most significant are the use of an ejector to reduce the air injection time and the use of the compensation method to reduce the measurement stage. The proposed methods allow to reduce the measurement stage by more than half. Considering that each hour of downtime of a power unit results in a loss of one million kWh of electricity generation, reducing the testing time is a relevant task for improving the economic performance of modern nuclear power plants.

The introduction presents the relevance and importance of the work, defines the goal, objectives of the research, scientific novelty and practical significance of the obtained results, reflects its connection with industry research, as well as with research and development

works carried out at the National University "Odesa Polytechnic" in the direction of increasing efficiency and safety, the personal contribution of the applicant is noted.

Chapter 1 presents an analysis of the global experience in containment enclosure leak tightness testing, as well as a review of patent literature in this field in Ukraine, the USA, and France. The measurement method currently used at NPP is examined, along with the principle of applying the compensation method for determining the degree of leak tightness.

Chapter 2 focuses on the development of a mathematical model for calculating the air ejector proposed to reduce the air pressurization time for testing. The methodology for determining the characteristics of an ejector of a certain design is presented, which allows calculating the pressurization time to a given pressure. The determination of the air pressurization time was carried out using only a compressor. A methodology for determining the ejector characteristic at given input and output parameters has been developed. The optimization of the ejector design was carried out from the point of view of minimizing the air pressurization time. Variant calculations of the air pressurization time to the containment enclosure were performed using ejectors of different designs. It was determined that the optimal ejector design corresponds to the design pressure value in the containment of 1.45 bar. The additional aerodynamic resistance of the equipment for cleaning the suctioned air from dust and moisture is taken into account.

Chapter 3 explores the methodology of using the compensation method for determining the integral leak from the containment system. The scheme is considered, a description is provided, an algorithm for testing is developed, and a methodology for processing the obtained results is proposed.

Chapter 4 focuses on the development of a mathematical model of the air state in the containment system during the pressurization and stabilization of parameters. The mathematical model consists of solving the system of the following differential equations: the rate of change of the mass of the vapor-air mixture in the GO, the rate of change of the amount of energy of the vapor-air mixture in the GO, the temperature change over time along the layers of the material of passive heat absorbers with non-stationary thermal conductivity. The developed model was verified against the results of tests conducted at

Unit 4 of the Rivne NPP. The developed model allows determining the factors affecting the time of the parameter stabilization stage. Based on the analysis of the developed model, measures were proposed to reduce the time of the stabilization stage.

Chapter 5 analyzes the possibility of reducing the test time as a result of the proposed measures. The results show that:

- by eliminating the vacuuming process, which has not detected any defects for many years;
- reducing the air pressurization time using an ejector;
- reducing the parameter stabilization time using the proposed measures;
- reducing the measurement time using the compensation method;
- reducing the pressure relief time by adjusting the relief valve

the test time can be reduced by almost half.

The scientific novelty of the results is:

- The first proposal and justification for using an ejector to reduce the air pressurization time for testing.
- The development of a methodology for testing using the compensation method. The proposed methodology for processing the test results.
- The modeling of the process of parameter changing in the containment system, which allowed the development of recommendations for reducing the time of the parameter stabilization stage.

The practical significance of the results is:

1. Developed proposals for reducing the containment leak test time. This will reduce the time of scheduled preventive maintenance (SPM) and increase the electricity production of nuclear power plant (NPP) units in Ukraine.

2. The dissertation results were used in the state budget research and development work No. 124-42 "Nuclear and radiation safety and efficiency of NPP units taking into account modern problems and trends in nuclear power" (No. 0116U004924).

3. The results of the dissertation are used in the educational process of the Odesa

Polytechnic National University for training specialists in the specialty 143 - Nuclear Power

Keywords: containment system, integral leakage, compensation method on leak measurement, using an ejector for air pressurization.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

The main scientific results of the thesis have been published in the following scientific articles:

1. Kravchenko V., Vlasov A., Andryushchenko A., Vlasov D., Holovchenko A., Gavrilov P. Reducing air injection time during tests of nuclear power plant containment shells using an ejector. Proceedings of Odesa Polytechnic University. 2022. Issue 1(65). P. 62-69. <https://pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1660041533.pdf>
2. Kravchenko V.P., Vlasov A.P., Holovchenko A.M., Mazurenko A.S., Dubkovsky V.O., Chulkin O.O. State and Prospects of Testing the Containment System of a VVER-1000 Reactor Unit for Tightness / Nuclear and Radiation Safety. 2(98)2023. Pp. 53-60. Doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05)
3. Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Mathematical modeling of reactor VVER-1000 installation containment during leak tests. /Nuclear energy and environment. № 3 (28) 2023. C. 3-9. doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.1

Scientific papers certifying the approbation of the dissertation materials:

1. Kravchenko V.P., Holovchenko A.M. (2022). Reducing the Time of Leak Testing of the Containment Shell Using an Ejector. XVI International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists "Problems of Modern Nuclear Power". Netyshin, Ukraine. November 16-18.
2. Holovchenko A.M., Kravchenko V.P. (2023). State and prospects of reducing the time of leak testing of the containment shell of VVER-1000 NPPs. Report at the working meeting at the South Ukrainian NPP, Yuzhnoukrainsk, Ukraine. April 17.
3. Kravchenko V.P., Vlasov A.P., Holovchenko A.M., Mazurenko A.S., Dubkovsky V.O., Chulkin O.O. (2023). State and Prospects of Testing the Containment System of a

VVER-1000 Reactor Unit for Tightness. V International Conference "Prospects for Innovation in Nuclear Energy". Kyiv, Ukraine.

September 28-29.

4. Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Mathematical modeling of containment leak tests with VVER-1000. Proceedings of XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. P. 291-293.

https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf

The scientific results of the work have been implemented (see Appendix B) in the methodological materials of the disciplines "Nuclear Power Plants" and "Safety and Reliability of NPPs" of the Department of Nuclear Power Plants of the National University "Odesa Polytechnic" and were used during the work on the qualification papers of bachelors and masters of the National University "Odesa Polytechnic" Bohdan Litvynov, Mykola Novoskoltsev and Valentyn Cherevany (for more details see the ACT of implementation dated March 05, 2024).

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	15
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИПРОБУВАНЬ ГЕРМЕТИЧНОСТІ	22
1.1. Описання системи герметичного огороження	22
1.2. Абсолютний метод вимірювання витоку в гермооболонці	24
1.3. Огляд методів випробування герметичності	28
1.4. Методи випробування на герметичність ГО на АЕС з ВВЕР-440	37
1.5. Компенсаційний метод вимірювання витоку	40
1.6. Висновки до розділу 1	43
РОЗДІЛ 2 ВИКОРИСТАННЯ ЕЖЕКТОРУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЧАСУ НАГНІТАННЯ ПОВІТРЯ	45
2.1. Методика розрахунку ежектору	45
2.2. Методика отримання робочої характеристики для обраної конструкції ежектору	50
2.3. Оптимізація конструкції ежектору для скорочення часу нагнітання повітря для випробувань	52
2.4. Розрахунок часу нагнітання з використанням ежектору	57
2.5. Моделювання ежектору	61
2.5.1. Опис конструкції ежектору	62
2.5.2. Попередні результати	62
2.5.3. Аналіз похибки розрахункових даних	63
2.6. Врахування додаткового опору, що виникає при використанні фільтру пилу та установки очищення вологи на вході в ежектор	66
2.7. Висновок до розділу 2	68
РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ВИТОКУ	70
3.1. Розробка методики проведення вимірів	70
3.2. Методика обробки вимірів	75
3.3. Висновки до розділу 3	77

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ.....	78
4.1 Процеси, що відбуваються в СГО під час випробувань на щільність.....	78
4.2 Висновки до розділу 4.....	87
РОЗДІЛ 5 ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЧАСУ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ СГО НА ГЕРМЕТИЧНІСТЬ	89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	100
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	108
ДОДАТОК Б. Акт впровадження результатів дисертації.....	110
ДОДАТОК В Результати проведення випробувань ЛСБ СГО енергобоків ЗАЕС....	111
ДОДАТОК Г Результати розрахунку ежектору при різних значеннях значеннях кінцевого тиску в ГО	127
ДОДАТОК Д Характеристика ежекторів, що спроєктовані на різний кінцевий тиск	130
ДОДАТОК Е Визначення характеристики компресора ЦК-135/8	133

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС – атомна електрична станція

БД – база даних

ВВЕР – водо-водяний енергетичний реактор

ГО – гермооболонка, гермооб’єм

ДІЯРУ – Державна інспекція з ядерного регулювання України

ЗО – захисна оболонка

ЗАЕС – Запорізька АЕС

ЗОК - залізобетонна огорожувальна конструкція

ЕЄ - еталонна ємність

ІВ – інтегральний виток

КЄ - контрольна ємність

МАГАТЕ - міжнародне агентство з атомної енергії

МПА - максимальна проєктна аварія

ЛСБ – локалізуюча система безпеки

ПА – проєктна аварія

ППР - плановий попереджувальний ремонт

РАЕС - Рівненська атомна електростанція

РК – розрахунковий код

РУ – реакторна установка

САОЗ - система аварійного охолодження зони

СБ – система безпека

СГО - система герметичного огородження

СЛА - система локалізації аварій

ТН - теплоносій

ПУАЕС – Південноукраїнська АЕС

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день атомна енергетика відповідає за економічну та енергетичну безпеку України. Це пояснюється тим, що АЕС виробляють більше 50 % електрики, що виробляється і споживається в країні [1]. Відповідно Енергетичній стратегії України [2] атомній енергетиці надається велике значення і планується її розвиток.

У світі кліматичної проблеми з підвищенням температури на Землі, якій було присвячено XXI Конференцію ООН [3], де була прийнята Паризька угода (2015 р.), атомній енергетиці наданий «зелений» статус, тобто безвуглецевої [4], і вона разом із відновлюваною енергетикою має вирішити основний сучасний виклик – сповільнення підвищення температури на планеті.

В підручнику С.В. Широкова з ядерних реакторів [5] вказується, що для успішного розвитку ядерної енергетики мають бути вирішені три проблеми:

1. Безпека ядерних реакторів.
2. Економічна, конкурентно-спроможна експлуатація.
3. Позитивне відношення суспільства.

Досягненню перших двох пунктів присвячена розробка реакторів четвертого покоління [6]. Якщо експлуатація нових реакторів буде безпечна та економічна, відношення суспільства знову стане позитивним.

Україна йде шляхом розвитку ядерної енергетики. В кінці липня 2018 року Кабінет міністрів України затвердив техніко-економічне обґрунтування добудови двох енергоблоків ХАЕС вартістю 72,4 млрд грн. [7]. В серпні 2021 р. була підписана угода з компанією Westinghouse про будівництво п'яти енергоблоків AP-1000 (США) [8], а в лютому 2023 вже був підписаний меморандум про зміну кількості до дев'яти [9]. До того ж підписаний також меморандум про будівництво в Україні 20 малих модульних реакторів [10].

Але звичайно, якщо безпечний реактор буде занадто дорогим, в нього нема перспектив. Тому питанням економічності надається велика увага. Вчені та проєктувальники шукають шляхи підвищення безпеки та утримання чи покращення економічних показників. Прикладом цього може слугувати пропозиція використання

концепції течі перед руйнуванням, що дозволила суттєво зменшити вартість систем безпеки, які були призначені для локалізації наслідків максимальної проектної аварії [11].

Одним з основних показників ефективності роботи АЕС є коефіцієнт використання встановленої потужності [12, 13, 14], який визначається відношенням виробленої за рік електроенергії до максимально можливої без врахування простоїв. Найкращі показники у США – 90%, Канада – 78%, Мексика та Чилі – 73%. В Україні цей показник для АЕС в середньому – 71 % [12].

Основний час простоїв припадає на планово-попереджувальний ремонт (ППР), який складається в тому числі і з часу проведення випробувань обладнання після ремонту. Ведеться робота з питання зменшення часу ППР через перехід зі стратегії ремонту за періодичністю до стратегії ремонту за технічним станом обладнання [15].

Невід'ємною частиною АЕС є системи безпеки, які призначені для недопущення аварій на АЕС та послаблення їх наслідків [16, 17]. Система безпеки АЕС, що запобігає виходу радіоактивних речовин в навколишнє середовище, складається з 4-х бар'єрів:

- паливна матриця, що запобігає виходу продуктів поділу під оболонку тепловидільного елемента.
- оболонка тепловидільного елемента, що не дає продуктам ядерного ділення потрапити в теплоносій головного циркуляційного контуру.
- головний циркуляційний контур, що перешкоджає виходу продуктів ядерного ділення під захисну герметичну оболонку.
- система захисних герметичних оболонок, що запобігає виходу продуктів поділу в навколишнє середовище.

В деяких джерелах введено п'ятий бар'єр – біологічний захист. Але на нашу думку функцію біологічного захисту виконує бетонна шахта реактору, яка знаходиться в гермооболонці і не є герметичною. Вона виконує функцію бар'єру лише частково. В будь-якому випадку останнім бар'єром на шляху виходу радіоактивних речовин в навколишнє середовище при аварії є система герметичного

огородження чи просто гермооболонка (ГО).

Стан всіх бар'єрів має підтримуватися на відповідному рівні, тому крім гідравлічного випробування першого контуру проводиться випробування на герметичність і останнього бар'єру безпеки - системи герметичного огородження. Ці випробування проводяться протягом більше доби. Причому в період випробувань ніякі роботи в гермооболонці (ГО) не проводяться. Ця умова висунута вимогами безпеки, тому що знаходитися в приміщенні при зниженому та підвищеному тиску повітря людині дуже небезпечно.

Враховуючи, що кожна година простою енергоблоку – це недовирібок одного мільйону кВт·год, скорочення часу проведення випробувань є актуальною задачею для покращення економічних показників роботи сучасних АЕС.

Мета роботи – зменшення часу випробувань на герметичність системи герметичного огородження.

Для досягнення цієї мети потрібно було виконати наступні завдання:

- аналіз світового досвіду відносно методів проведення випробування на герметичність ємностей великого об'єму;
- аналіз методики визначення ступеня негерметичності, що використовується сьогодні - “абсолютного” методу;
- розробка пропозиції використання ежектору для зниження часу нагнітання повітря в ГО для проведення випробувань;
- розробка методики проведення випробувань на герметичність за компенсаційним методом, що дозволяє визначити течу безпосередньо та за менший час;
- розробка математичної моделі стану повітря в СГО для виробітку рекомендацій відносно зменшення часу процесу стабілізації параметрів при проведенні випробування.

Об'єктом дослідження є процес випробувань системи герметичного огородження на герметичність.

Предмет дослідження: етап нагнітання повітря для випробувань, етап вимірювання інтегрального витоку, етап стабілізації параметрів повітря перед

випробуваннями.

Методи дослідження. При вирішенні завдань дослідження були застосовані аналітичні методи (розрахунок повітряного ежектору, моделювання режимів роботи ежектору, моделювання зміни стану повітря у великому об'ємі). Ці методи дозволили отримати кількісні результати оцінки використання ежектору для прискорення нагнітання повітря до СГО, розробити рекомендації з прискорення процесу стабілізації параметрів в СГО, що разом дозволило запропонувати комплекс заходів зі зменшення часу проведення випробувань герметичності на АЕС з реакторами ВВЕР. При верифікації розробленої моделі були використані дані промислового експерименту, а саме протокол випробувань СГО 4-го енергоблоку Рівненської АЕС.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше було запропоновано та обґрунтовано використання ежектору для зменшення часу нагнітання повітря для проведення випробувань.
- розроблено методику проведення випробувань за компенсаційним методом. Запропонована методика обробки результатів випробувань.
- змодельований процес зміни параметрів в ГО, що дозволив розробити рекомендації відносно скорочення часу етапу стабілізації параметрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

- розроблені пропозиції, спрямовані на зменшення часу випробувань на герметичність СГО. Це дозволить скоротити час ППР і підвищити виробіток електроенергії енергоблоками АЕС України.
- результати дисертації використано у держбюджетній науково-дослідній роботі № 124-42 «Ядерна та радіаційна безпека та ефективність енергоблоків АЕС з урахуванням сучасних проблем та тенденцій в атомній електроенергетиці» (№ д/р 0116U004924).
- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 143 – атомна енергетика.

Результати дисертації впроваджені у навчальному процесі кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка» для підготовки

студентів за спеціальністю 143 – атомна енергетика, що підтверджується відповідним актом впровадження (див. Додаток Б).

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, науковими напрямами Університету та кафедри. Основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи одержані при виконанні НДР відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2050 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р., комплексної програми робіт щодо продовження терміну експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій, затвердженої Розпорядженням КМУ від 29 квітня 2004 року № 263-р) та у рамках Комплексної кафедральної науково-дослідної роботи №124-42 «Ядерна та радіаційна безпека та ефективність енергоблоків АЕС з урахуванням сучасних проблем та тенденцій в атомній електроенергетиці». У кафедральний звіт увійшов розділ «Розробка методу зменшення часу випробувань на герметичність системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000», виконаний Головченком А.М.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів полягає у постановці цілей та задач дисертації, зборі інформації та матеріалів з досвіду проведення випробувань ГО на герметичність, аналізу патентної та науково-технічної літератури, розрахункових обґрунтуваннях використання ежектору для нагнітання повітря для проведення випробувань на герметичність ГО, розробці методики використання компенсаційного методу визначення інтегрального витоку з ГО, моделюванні зміни стану середовища в ГО при нагнітанні повітря та етапі стабілізації параметрів, аналізі отриманих результатів.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на трьох міжнародних конференціях та робочій зустрічі на Південноукраїнській АЕС.

Публікації. Основні наукові результати дисертаційної роботи викладено в трьох наукових статтях, опублікованих у виданнях, включених до Переліку фахових видань України (всі видання індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, зокрема: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals

Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar та ін.), одна з них опублікована в журналі, який входить до науко-метричної бази SCOPUS, а також в 1 тезах наукової конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури з 91-го найменування, 16 рисунків та 13 таблиць, додатків на 25 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 126 сторінок, в тому числі 101 сторінки основного тексту.

Наукова новизна роботи міститься в результатах теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення економічності АЕС шляхом удосконалення методики випробувань на герметичність системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000, що потребує менше часу в порівнянні з існуючою методикою. Це сприяє підвищенню коефіцієнта використання встановленої потужності через скорочення часу планово попереджувального ремонту, по закінченні якого і проводяться випробування на герметичність СГО.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИПРОБУВАНЬ ГЕРМЕТИЧНОСТІ

1.1. Описання системи герметичного огороження

Основне обладнання реакторної установки, яке експлуатується в Україні на енергоблоках АЕС (це здебільшого реактори ВВЕР-1000) розміщують в циліндричних конструкціях (контейнментах) із попередньо напруженого залізобетону з випуклою овальною покрівлею [18,19]. Контейнмент розрахований на внутрішній тиск до 5 кг/см². Оскільки бетон не є щільною перепорою для газових середовищ, контейнмент зсередини має облицювання з щільного металевого покриття товщиною 8 мм. Таким чином, герметичність контейнменту забезпечують металевим облицюванням та елементами системи локалізації аварії (СЛІА), а зусилля, які можуть виникати за аварійних умов при дії внутрішнього тиску на металеве облицювання, сприймаються залізобетонною захисною оболонкою (ЗО). Міцність ЗО забезпечують попередньо напружені сталеві троси, які проходять в спеціальних каналах в стінці та куполі ЗО [20]. Експлуатація та обслуговування системи попереднього напруження захисної оболонки регламентується комплексом нормативної документації [21-27]. Захисна оборонка є також бар'єром і для зниження радіоактивного впливу з герметичного об'єму (ГО). Надійність системи герметичного огороження (СГО) перевіряють проведенням випробувань герметичності надлишковим внутрішнім тиском повітря з визначенням інтегрального витоку (ІВ), що регламентується Правилами ядерної безпеки та Програмою проведення випробувань [28,29].

Таким чином, система герметичного огороження (СГО) призначена для утримання активних продуктів поділу, що виділяються при різних проєктних режимах експлуатації АЕС, а також для ослаблення впливу іонізуючого випромінювання [30, 31]. СГО виконує наступні функції:

- утримання радіоактивних продуктів ділення ядерного пального в межах зони локалізації аварій;
- ізоляція від навколишнього середовища тих систем і елементів, відмова яких може призвести до викиду радіоактивних речовин;
- захист персоналу і населення від іонізуючих випромінювань.

Одночасно СГО захищає реакторну установку (РУ) від зовнішніх впливів, а саме, від повітряної ударної хвилі чи падіння літака малих габаритів.

Крім сталевих облицювань та залізобетонної огорожувальної конструкції, СГО включає шлюзи та систему локалізуючих груп.

В основу розробки конструкцій ГО покладені наступні основні принципи:

- СГО має виконувати свої функції у всіх проєктних режимах експлуатації АЕС, в тому числі при проєктній аварії (ПА);
- зберігає задані функції при вакуумі до 0,049 МПа;
- зберігає задані функції при впливі зовнішніх факторів: вітру і снігу, навантаження, повені, зовнішньої ударної хвилі і тому подібне.

Максимальне значення внутрішнього надлишкового тиску для режиму передпускових випробувань прийнято рівним 1,15 розрахункового надлишкового тиску при ПА, виходячи з якого, визначався рівень попереднього стиснення захисної оболонки.

Вимоги до улаштування та безпечної експлуатації локалізуючих систем безпеки сформульовані у відповідній інструкції ДІЯРУ [32]. Де, нажаль, є тільки посилання на проєкт, який є практично недоступним. Це ускладнює визначення основних чисельних значень, які є визначальними при проведенні випробувань.

В Додатку В наводяться дані за початковий період (1990-2006 р.р.) проведення випробувань на ЗАЕС. За аналізом наведених даних (табл. 1.1) отримано, практично на всіх енергоблоках вийшли на тривалість випробувань декілька більше 9 годин. Але це викликає сумнів, тому що один тільки етап нагнітання повітря має практично таку тривалість. Скоріш за все наведені дані характеризують час тільки вимірювання параметрів, за якими розраховується інтегральний виток (ІВ).

Таблиця 1.1 - Аналіз статистичних даних тривалості випробувань на герметичність енергоблоків ЗАЕС

Номер блоку	Інтервал, в якому змінюється тривалість випробувань, год.	Середня тривалість за період з 1990 по 2006 рік, год
1	8-14,75	9,56
2	8-29,2	15,29
3	7,45-31,35	17,94
4	8-15,5	9,11
5	7-10,7	8,7
6	8-20,39	9,29

1.2. Абсолютний метод вимірювання витоку в гермооболонці

Існує декілька методів вимірювання витоку з ГО. На даний момент на АЕС України є програма [29,33], за якою і проводять випробування на герметичність абсолютним методом вимірювання. В об'єм випробувань входить:

1. Випробування на герметичність СГО розрідженням величиною (0,03 - 0,05) кгс/см² з метою визначення дефектів зі сторони ГО.

2. Випробування на герметичність СГО надлишковим тиском повітря величиною (0,65±0,01) кгс/см² з метою: визначення дефектів з зовнішньої сторони контуру герметизації, визначення величини інтегрального витоку та, відповідно, за його значенням підтвердження придатності СГО до подальшої експлуатації.

Технологічними обмеженнями є вміст повітря:

- Домішок масла більше 0,002 г/м³.
- Домішок пилу більше 0,01 г/ м³.
- Вологості (відносна вологість) більше 40 %.

В ході випробувань СГО заборонено перевищення наступних параметрів:

- Розрідження в ГО більше - 0,051 кгс/см².
- Тиск в ГО більше $P_{абс} = 0,66$ кгс/см².

- Швидкість вирівнювання тиску в ГО до атмосферного не більше 0,6 кгс/см²/год.
- Швидкість підйому тиску в ГО більше 0,4 кгс/см²/год.
- Швидкість скидання тиску з ГО більше 1,0 кгс/см²/год.

До технологічних вказівок відноситься наступне:

- При випробуванні СГО на герметичність вакуумуванням вимірюванню підлягають:
 1. Розрідження в герметичній оболонці.
 2. Швидкість вирівнювання тиску в ГО до атмосферного.
 3. Астрономічний час.
 4. Час від початку випробування.
- При випробуванні СГО надлишковим тиском повітрям вимірюванню підлягають:
 1. Абсолютний тиск всередині СГО.
 2. Надлишковий тиск всередині СГО.
 3. Атмосферний тиск.
 4. Локальні температури у встановлених місцях всередині СГО.
 5. Вологість повітря у встановлених місцях всередині СГО.
 6. Швидкість підйому тиску у ГО.
 7. Швидкість скидання тиску з ГО.
 8. Астрономічний час.
 9. Час від початку випробування.

При аналізі наведених даних слід відмітити, що визначення атмосферного тиску та надлишкового тиску дає можливість визначити абсолютний тиск, що виключає чи ставить під сумнів необхідність вимірювання абсолютного тиску. Час від початку випробування теж розраховується за різницею часу конкретної операції та часу початку випробувань і не вимірюється.

Умовою припинення випробування є [33]:

1. Виникнення аварійної ситуації, загрози безпеки персоналу або цілісності обладнання.
2. Виявлення місць значних витоків повітря, які оперативно неможливо усунути.

3. Задимлення приміщення ГО.

За даним методом вимірювання величини витоку [33] на першому етапі вимірюють локальні зміни тиску, вологості та температури закачаного в ГО повітря та періодично (кожні 2 хвилини) визначають окремі параметри з наступним використанням комплексів вимірювань для розрахункового одиничного визначення інтегрального витоку (ІВ) з ГО. Потім в подальших розрахунках використовують рівняння стану середи в ГО, а через нього вже визначається відсоток витоку:

$$L = \frac{m_o - m_i}{m_o} = 100 \cdot \left(1 - \frac{P_i \cdot T_o \cdot R_o}{P_o \cdot T_i \cdot R_i} \right), \%,$$

де P - тиск, T - температура, R - газова постійна. Індекс "о" відноситься до початкового стану повітря в ГО на даному проміжку часу, індекс "і" – до кінцевого стану повітря в ГО на даному проміжку часу.

Далі за результатами розрахунку середньо годинного витоку визначається добова величина витоку.

Випробування вважають успішними, якщо отримана в ході випробувань величина прогнозованого інтегрального витоку задовольняє умові:

$$L_{1,3} \leq 20 \% / \text{доба},$$

де $L_{1,3} = (L + \Delta L)_{1,3}$ – величина прогнозованого інтегрального витоку, з урахуванням похибки, з поточних величин тиску режиму "вимір" на тиск 1,3 кгс/см².

На ЗАЕС величина прогнозованого інтегрального витоку на блоках різна.

Критерієм успішного виконання робіт є виконання нерівності $L_k \leq 1,15 \cdot L_{кр}$,

де

$L_k = (L \pm \Delta L)$ – значення добового витоку, розраховане під час випробувань, % / добу. В [34] вказується, що значення витоку із ГО у всьому діапазоні аварійних тисків не має перевищувати 0,3 % від об'єму повітря в ГО (при тиску надл. 4 кгс/см²) за добу (підтверджується результатами випробувань);

L – значення добового витоку, % / добу;

ΔL – сумарна похибка визначення комплексу;

$L_{кр}$ – значення витоку, отримане при зниженому тиску під час передпускових

налагоджувальних робіт, % / добу.

Значення $L_{кр}$, для блоків ЗАЕС:

- енергоблоку №1 – $(0,14 \pm 0,02)$ %/добу;
- енергоблоку №2 – $(0,17 \pm 0,01)$ %/добу;
- енергоблоку №3 – $(0,11 \pm 0,01)$ %/добу;
- енергоблоку №4 – $(0,10 \pm 0,01)$ %/добу;
- енергоблоку №5 – $(0,10 \pm 0,10)$ %/добу;
- енергоблоку №6 – $(0,07 \pm 0,01)$ %/добу.

На рис. 1.1 наводиться принципова схема нагнітання повітря в ГО блоків ЗАЕС компресором ЦК-138/8.

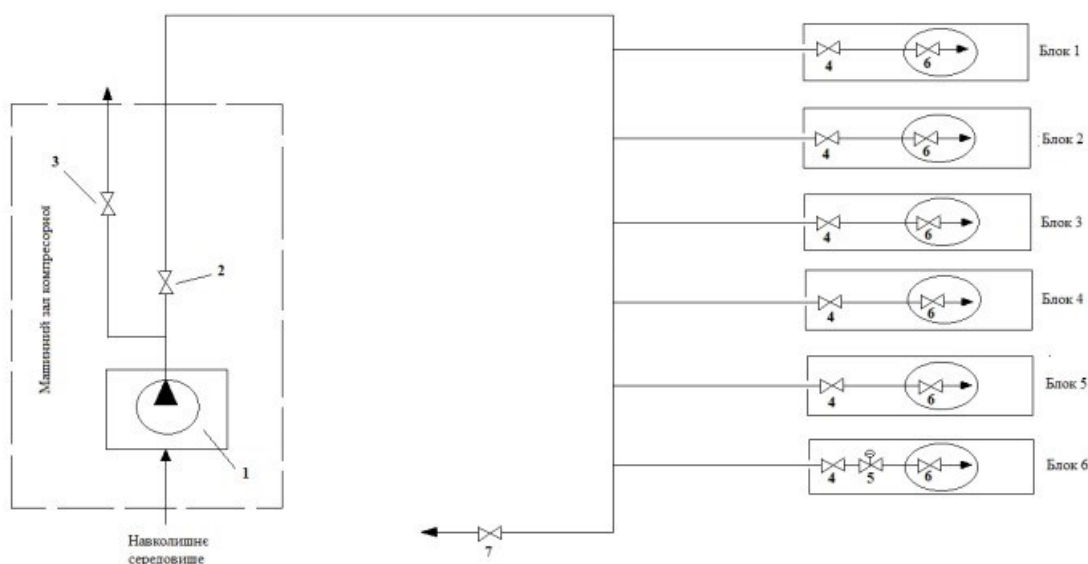


Рисунок 1.1 – Спрощена схема нагнітання повітря в СГО на ЗАЕС

1 - компресор марки ЦК-135/8; 2 - арматура на виході компресора; 3 - арматура подачі стисненого повітря в навколишнє середовище; 4,6 –арматура на лінії подачі стисненого повітря в ГО; 5 - арматура з метою автоматизації процесу; 7 - арматура аварійної подачі стисненого повітря в навколишнє середовище

Випробування для визначення інтегрального витоку проводяться в п'ять етапів:

1. Вакуумування герметичної оболонки для визначення нещільностей та усунення пошкоджень – 4 години. Ступінь розрідження в ГО має знаходитися в межах 15-20 мм вод. ст. та здійснюється вентиляційними системами [34].

2. Нагнітання повітря у ГО до заданого тиску. Визначення нещільності вузлів СЛА – 8 години.
3. Стабілізація параметрів, що необхідно для вирівнювання їх по всьому герметичному об'єму – 8 годин.
4. Вимірювання температури, тиску та вологості, для визначення інтегрального тиску з заданою точністю – 8 годин.
5. Скидання тиску – 1,5 години.

Місце знаходження компресорної станції та деякі інші фактори приводять до того, що час проведення деяких етапів для всіх АЕС та енергоблоків різний.

Таким чином, для визначення інтегрального витоку, значення якого підтверджує можливість роботи енергоблоку на потужності, необхідна витрата часу 29,5 години. І це при тому, що ніякі планові роботи в герметичній оболонці в цей період не проводяться. Тобто випробування для визначення інтегрального витоку лежать на критичному шляху графіка ППР заслуговує відповідної уваги та зусиль для зменшення часу на його проведення.

1.3. Огляд методів випробування герметичності

Питання визначення негерметичності виробів є достатньо затребуваним. Багато виробів потребують перевірки на герметичність, це двигуни, елементи космічних апаратів, літаків і багато інших виробів. Зупинимось на основних ідеях, які використовуються при перевірці продукції на герметичність.

В [35] удосконалюється пристрій для контролю герметичності невеликих виробів (а саме пневмо розподільвачів), що включає джерело тиску, з'єднане через відсічний пристрій з виробом, клапан, вхід якого підключений до плюсової, а вихід до мінусової порожнини мембранного елемента. У нижній порожнині цього елемента знаходиться форсунка для задачі нуля, регулятор тиску і блок реєстрації перепадів тиску, вхід якого з'єднаний через пневматичний опір з каналом подачі, який відрізняється тим, що додатково оснащений вимикачем, один вхід якого з'єднаний з виходом запірного пристрою, а другий - з джерелом тиску, а вихідний з'єднаний з вентильними входами, мембранний елемент виконаний багато

порожнинним.

Цілий ряд патентів передбачає використання додаткову ємність, частково заповнену рідиною. Так у [36] запропоновано метод випробування герметичності виробів шляхом з'єднання виробу з газовою порожниною, частково заповненої рідиною, а еталонної ємності (ЕЄ) - з соплом, зануреним в цю рідину, і заповненням виробу і еталонної ємності газом під рівним надлишковим тиском, який відрізняється тим, що виріб та еталонна ємність відокремлюються і тиск з останньої скидається до виходу бульбашок газу з сопла, після чого з тієї ж ємності в обсязі робиться контрольний витік в кількості, необхідній для виділення бульбашок газу, кількість яких розраховується. Проаналізуємо цю формулу. По-перше, треба відмітити погане формулювання запропонованої ідеї. Якщо роз'єднати виріб та еталонну ємність, неможливо отримувати результати, які будуть відображати стан виробу. Але можна припустити, що ідея наступна. Виріб частково заповнюється рідиною. До виробу під'єднується еталонна ємність, з якої трубка підводиться під рівень води. У виробі та ЕЄ однаковий тиск газу. При зниженні тиску у виробі через витік, газ з еталонної ємності поступає у виріб і виходить з під рівня води у вигляді бульбашок. Підрахунок кількості бульбашок за визначений час дозволяє визначити витік з виробу, тобто степінь негерметичності. Метод вимагає настройки, тому що результат буде залежати від рівня води над соплом. Відносно вимірювання кількості бульбашок, слід відмітити невизначеність розміру бульбашок, а також необхідність присутності людини для підрахунку.

Слід відмітити, що розглянутий метод при застосування автоматизації може бути використаний для визначення витоку з ГО. Особливо враховуючи маленькі значення інтегрального витоку.

Для контролю герметичності при виробництві ракетно-космічної техніки нещодавно застосовувався мас-спектрометричний метод [37], який полягає в наступному. Виріб заповнюється контрольним газом та встановлюється у вакуумну камеру. При течі газ попадає у вакуумну камеру, концентрацію якого можна визначити за допомогою мас-спектрометра. Метод має високу чутливість, але дуже дорогий. Тому останнім часом для контролю герметичності КА усе частіше

використовується менш чуттєвий у порівнянні з мас-спектрометричним методом спосіб, заснований на заповненні виробу нейтральним газом, наприклад, азотом, приєднанні до виробу ЕЄ і вимірі величини спаду тиску у виробі за час витримки відносно еталонної ємності (АС СРСР №250163, МПК G01M 3/26, патент РФ №2039961, МПК G01M 3/26). Значно більш високу точність контролю герметичності забезпечує "Спосіб контролю герметичності виробів" по патенту України №78607, МПК G01M3/02, G01M3/26 - прототип. За цим способом контроль герметичності здійснюють не по спаду тиску газу за час витримки, а за спадом густини газу. Її вимірюють в ЕЄ, приєднаної до виробу. Перед початком контролю герметичності в ЕЄ встановлюють посудину і частково заповнюють її рідиною. У рідину занурюють плавуче тіло, на верхній частині якого вертикально закріплюють стрижень з меншим, чим у тіла поперечним перерізом. Після з'єднання виробу з ЕЄ та подачі в них контрольного газу, наприклад, повітря, під робочим тиском забезпечують занурення основи стрижня в рідину спочатку навантаженням тіла грузилами, а потім зміною робочого тиску газу у виробі. Після витримки виробу протягом заданого часу під робочим тиском визначають глибину занурення стрижня в рідину, а по ній, з використанням закону Архімеда, - величину негерметичності виробу.

В [38] негерметичність виробу теж визначається по зменшенню густини газу по масі контрольних гир, які торкнулися днища контрольної ємності за час витримки, відповідно до формули. Треба відмітити, що момент торкання гирями днища вже суб'єктивний фактор і використання гир ускладнює процес.

В основу винаходу [39] поставлена задача вирівнювання середньо інтегральної температури газу у виробі та еталонній ємності шляхом виготовлення ємності з металу високої теплопровідності у вигляді оребреного спірального трубопроводу з капілярною внутрішньою поверхнею і закріпленого уздовж виробу через тепло ізолятори. Різниця температур має бути не більше 0,01 градуса. Прискорення перемішування досягається використанням вентилятору.

Аналізі матеріалів патенту показав, що дійсно треба при вимірах мати однакові умови у виробі та ЕЄ. Прискорення часу досягнення однакових параметрів - етап

стабілізації параметрів, дозволяє зменшити загальний час випробувань та підвищити точність визначання витоку. Але слід відмітити, що незрозуміло написано. Мабуть у виріб вставляється труба з високою теплопровідністю, а не виріб виготовляється у вигляді спіральної труби.

Винахід [40] відноситься до діагностики устаткування, що експлуатується в енергетиці, хімічній промисловості, транспорті. Задачею винаходу є створення способу діагностування тріщин за об'ємом їхнього розкриття на працюючому устаткуванні, в якому шляхом безперервного контролю тиску рідини в герметичній порожнині, що залежить від величини об'єму розкриття тріщин усередині цієї порожнини, досягається новий технічний результат - підвищення безпеки і надійності. Поставлена задача досягається тим, що в способі діагностування тріщин по об'єму їхнього розкриття на працюючому устаткуванні, який складається в тім, що наявність тріщини визначається за тиском в герметичній порожнині, яка формується додатково на контрольованій ділянці устаткування, що є частиною порожнини, заповнюється рідиною, з'єднується з гнучкою мембраною, і за значенням стріли прогину мембрани чи по її напружено-деформованому стану безперервно визначається об'єм розкриття тріщин.

Мета, досягненню якої присвячений винахід, є дуже важливою - підвищення надійності експлуатації відповідального обладнання. Але розглянутий метод здійснює діагностику стану тільки відомої тріщини. Саме вона обладнується додатковим устаткуванням, яке дозволяє контролювати її стан. Невиявлені тріщини не контролюються за цим методом.

В [41] розглянуто спосіб контролю герметичності виробу, який заснований на з'єднанні виробу з контрольною ємністю (КЄ), установці в ній тіла великого об'єму, його обезважуванні (тобто закріплені між пружинами), подачі у виріб газу під робочим тиском і визначенні герметичності по висоті опускання тіла за час витримки. Тіло великого об'єму закріплюють на верхній частині КЄ на послідовно з'єднаних пружинах розтягування і стискання однакової жорсткості. Між нижніми частинами тіла і ємністю встановлюють пружину стискання значно меншої жорсткості, визначають висоту опускання тіла за час витримки по переміщенню

реперної кромки на верхній частині тіла щодо розподілу шкали лінійки на ілюмінаторі контрольної ємності, рис. 1.2.

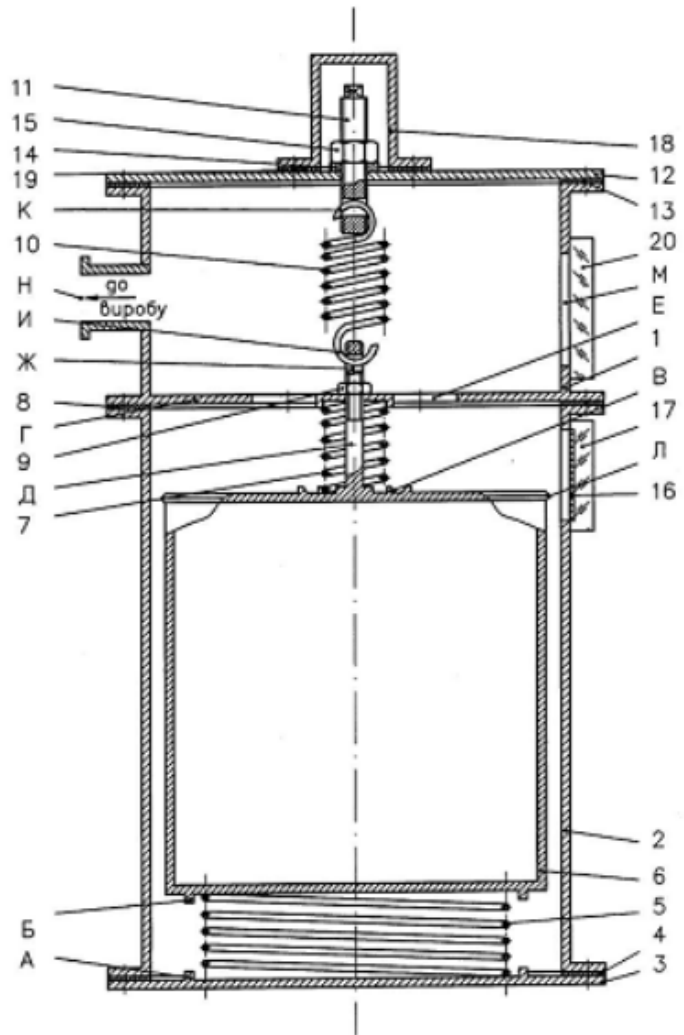


Рисунок 1.2 - Схема контрольної ємності з порожнім тілом, яке змінює своє положення через виток у виробі

Аналіз описання показує, що порожнє тіло в результаті зменшення густини газу при наявності витoku дійсно буде опускатися, як вказано в описанні. Наявність пружин приводить до необхідності тарування приладу, що ускладнює його придатність. Відносно пристосування його винаходу до випробування ГО, слід відмітити, що малий витік з ГО практично не впливає на густину газу в ній.

В [42] розглянуто спосіб контролю герметичності через вимірювання різниці тиску між порожнинами. В деяких місцях запропоновано використання кольорового маркера для визначення траєкторії руху газу. На виході джерела тиску встановлюють волого уловлювач. Призначення його не обговорюється. З одної сторони при розрахунках за

рівнянням стану ідеального газу (Менделєєва-Клапейрона) потрібно знати склад газу, щоб визначити газову постійну. Наявність волого уловлювача не забезпечує стовідсоткову сухість газу, тому не зрозуміла пропозиція його використання.

Спосіб контролю герметичності виробів [43] включає сполучення виробу з ЕЄ, заповнення їх газом до робочого тиску і визначення зміни параметру газу за час витримки, який відрізняється тим, що в еталонну ємність установлюють посудину, частково заповнену рідиною з малою пружністю парів, наприклад вакуумною олією ВО-1, занурюють у рідину плавуче тіло, на верхній частині якого вертикально закріплюють стрижень з меншим, ніж у тіла поперечним перерізом, і після сполучення виробу з еталонною ємністю та подачі в них газу під робочим тиском вимірюють величину занурення стрижня в рідину за час витримки і в залежності від неї визначають величину зменшення густини газу, при цьому перед початком контролю герметичності забезпечують занурення основи стрижня в рідину в місці його кріплення до тіла спочатку шляхом навантаження тіла грузилами, а потім зміною робочого тиску газу у виробі.

Можна зробити висновок, що розглянутий спосіб аналогічний [37,38], з різним засобом визначення ступеня занурення тіла. Як вже вказувалося, зміна густини повітря у ГО при випробуваннях при досягнутій степені герметичності достатньо мала. Але спосіб визначення негерметичності через визначення зміни густини газу має такий же як і “абсолютним” метод недолік: виток визначається непрямим шляхом, через розрахунок, використовуючи виміряну густину середи.

В [44] запропоновано пристрій для контролю герметичності виробів і виміру величини витоку. Ущільнена ущільнювальними вузлами робоча камера контрольованого виробу заповнюється крізь клапан стисненим газом, використовуваним для гідравлічних випробувань, крім того, він включає контрольну камеру, з'єднану з ущільнювальним вузлом, що ущільнює вхід робочої камери контрольованого виробу, що включає встановлений на її вході клапан, крізь який у контрольну камеру від джерела газу надходить газ під тим же тиском, що і газ, що надходить через клапан від джерела газу у робочу камеру контрольованого виробу, а також диференціальний датчик тиску, розміщений між робочою камерою

контрольованого виробу і контрольною камерою.

Тобто, пропонується виток визначати через різницю тиску у виробі та ЕЄ. Треба відмітити, що різниця тиску в ГО при наявності витoku мала і виміряти її важко.

В [45] розглядається спосіб визначення негерметичності через встановлення до герметичної еталонної ємності додаткової герметичної ємності, внутрішній об'єм якої дорівнює внутрішньому об'єму випробуваного виробу, приєднують до додаткової герметичної ємності трубопровід скидання тиску з встановленими в ньому відсічним клапаном і каліброваною течєю, що відповідає мінімально допустимій негерметичності випробуваного виробу. Зрозуміло, що для цей спосіб не підходить для випробування ГО через його великі розміри.

В [46] розглянуто спосіб, заснований на вимірі зміни параметрів газу за час витримки, який відрізняється тим, що для виміру параметрів газу усередині контрольної ємності розміщують різноплечий важіль, на довге плече якого установлюють тіло, наприклад герметичний пустотілий циліндр, на коротке – гирі, які його зрівноважують та мають значно менший в порівнянні з тілом об'єм. Спосіб відрізняється тим, що глибину занурення стрижня в рідину візуальним способом визначають по поділках шкали лінійки, встановленої вертикально усередині прозорої посудини або поруч з нею. Тобто, при випробуванні через переміщення важеля визначається зміна густини газу. Уявляється, що при контролі стану повітря в ГО треба використовувати автоматизовані засоби. Тому використання візуального контролю не підходить.

Деякі патенти присвячені перевірці герметичності саме двигунів [47,48] з урахуванням саме їх конструкції.

Зупинимося на деяких патентах Франції. В [49,50] розглядаються патенти з використанням шукача течі та індикаторного газу. В якості індикаторного газу розглядається водень [51]. Це вимагає наявності газоаналізатору певної властивості.

В [52] об'єктом винаходу є пристрій для проведення випробувань рідинної мережі літака, відрізняється тим, що корпус містить на виході щонайменше два різних з'єднувальних засоби, з'єднаних із засобами для регулювання тиску газу, причому кожний з'єднувальний засіб адаптований до діапазону тиску або заданого тиску.

В [53] розглянуто спосіб впорскування та підтримання рідини під тиском у внутрішньому обсязі. Він включає перед упорскуванням рідини введення твердого матеріалу для наповнення у внутрішній об'єм, а після витримки рідини під тиском щонайменше часткове видалення рідини. Спосіб може бути використаний до механічних випробувань на міцність або запечатування обладнання під тиском або свердловин. Оскільки твердий матеріал вже не видаляється, цей спосіб не підходить для випробувань на герметичність ГО.

В [54] винахід відноситься до пристрою для виявлення витоків однієї з двох рідин через засоби їх розділення в баку під тиском, причому засоби розділення складаються з двох герметичних мембран, кожна з яких контактує з однією з рідин і утримується на відстані проміжною мембраною.

В [55] пропонується засіб для контролю внутрішніх поверхонь басейнів АЕС, саме зварних швів. Для цього над швом утворюється закритий об'єм, в який подається контрольна рідина.

У [56] розглянуто прилад для випробування на герметичність, що включає випробувальну камеру, датчик тиску, джерело вакууму і відвідника конденсату для зменшення виходу пари. Спосіб випробування на герметичність включає розміщення випробуваної деталі у випробувальній камері, вакуумування випробувальної камери, зменшення газовиділення за допомогою відвідника конденсату та виявлення підвищення тиску у випробувальній камері.

Система для виявлення витоків [57] складається з акумулятора, контролера потоку, з'єданого з акумулятором, та витратоміра/датчика, з'єданого з акумулятором, контролером потоку та виробу, що контролюється (КВ). Витратомір сконструйовано таким чином, що він подає газ з акумулятора до КВ і вимірює витрату газу, що подається, причому витратомір забезпечує зворотний зв'язок з контролером потоку, який представляє витрату, а контролер потоку реагує на зворотний зв'язок, подаючи газ для компенсації потоку в акумулятор для підтримання бажаного тиску в акумуляторі. Також передбачені методи для виявлення невеликих витоків, особливо у великих установках для тестування.

Системи і способи виявлення та контролю витоків за допомогою аналізу даних

про потік речовини [58]. Система контролю витоків містить процесор, який отримує дані про потік речовини від безлічі датчиків потоку, аналізує дані про потік для виявлення принаймні однієї невідповідності в цих даних і передає принаймні одне попередження та/або виконує профілактичні або коригувальні дії після виявлення зазначеної принаймні однієї невідповідності. В одному аспекті, виявлення згаданої принаймні однієї невідповідності включає визначення заздалегідь визначеної різниці між значенням, зчитаним на первинному з множини датчиків потоку речовини, і сумою всіх значень, зчитаних на всіх вторинних з множини датчиків потоку речовини, причому заздалегідь визначена різниця становить похибку. Датчики витрати можуть перезаряджатися потоком речовини, що проходить через датчик. Можна відмітити, що даний пристрій призначений для визначення витoku в потоці, що не підходить для визначення витoku з ГО.

Система виявлення витоків [59] включає в себе напірну систему, яка потребує перевірки на герметичність та/або тиск. Датчик тиску, з'єднаний з напірною системою, вимірює перший тиск в момент часу $t.sub.0$, після чого система перекачування рідини подає вибраний об'єм випробувальної рідини в напірну систему. Датчик тиску вимірює випробувальний тиск в момент часу $t.sub.1$ і через вибрані інтервали часу n до моменту часу $t.sub.(n + 1)$ і передає сигнал, що відображає тиск в кожен момент часу, в комп'ютерну систему для запису і зберігання на носії, придатному для зчитування. Програмне забезпечення, що працює на комп'ютерній системі, налаштоване на обчислення значення виявлення витoku, яке є функцією відношення першого тиску в момент часу $t.sub.0$ і тестового тиску в момент часу $t.sub.1$; тестового тиску в момент часу $t.sub.1$ і тестового тиску в момент часу $t.sub.2$; і так далі до тестового тиску в момент часу $t.sub.n$ і тестового тиску в момент часу $t.sub.(n + 1)$. На графічному виході відображається значення виявлення витoku, як функція часу. Можна зробити висновок, що визначення витoku здійснюється по зміні тиску у контрольованому виробі, що схоже з “абсолютним методом”.

Спосіб визначення наявності витoku в системі під тиском [60] включає отримання даних про тиск у КВ після відключення нагнітання, визначення зниження

тиску на основі даних про тиск, вхід у прохідний стан у відповідь на те, що нахил є меншим за попередньо визначений поріг нахилу, вихід з прохідного стану у відповідь на те, що нахил є більшим за попередньо визначений поріг нахилу, та генерування індикації проходження в результаті перебування у прохідному стані протягом принаймні попередньо визначеного періоду часу.

Спосіб визначення наявності витoku в напірній системі [61], який включає отримання даних про тиск у напірній системі після відключення напірної системи, визначення нахилу тиску та кривої тиску на основі даних про тиск та генерування сигналу про несправність, якщо нахил тиску перевищує заздалегідь визначений поріг, а крива тиску вказує на те, що нахил є постійним або зростає в абсолютному значенні.

У світовій практиці пропонувалися різні методи проведення випробувань на герметичність, в тому числі МАГАТ [62]: «абсолютний» метод, метод еталонної судини, компенсаційний метод, метод з використанням «міченого» газу або домішки газів, метод додавання контрольованої течії, метод визначення всіх можливих локальних течій та їх підсумовування, метод безперервного контролю різниці тисків у ЗО та еталонній посудині. Але кожен із цих методів мав свої недоліки, які гальмували використання кожного з них. Тому в більшості випадків випробування ЗО на щільність проводяться двома методами: методом «абсолютного» тиску та методом еталонної судини.

Виходячи з наявності сучасних тепловізорів, можна запропонувати наступний метод. При наявності більш гарячого повітря в ГО, а це буде мати місце після нагнітання повітря компресором, можна тепловізором обстежити зовнішню поверхню гермооболонки. При наявності витoku він може бути заміряний через приклеювання гумової сфери та вимірювання її розміну та часу надування.

1.4. Методи випробування на герметичність ГО на АЕС з ВВЕР–440

Герметичні відсіки АЕС ВВЕР-440 виконують функцію захисної оболонки (ЗО) [63]. Підвищення герметичності на АЕС з реакторами ВВЕР 440/213 і ВВЕР 440/230 є важливим питанням безпеки. Нові процедури, заходи і методи були прийняті на

АЕС в Моховці, Богуніце, Дукованах і Пакш.

Принципова відмінність ЗО АЕС ВВЕР-440 від ЗО АЕС у всьому світі полягає в її формі і компонуванні [63]. Захисна оболонка ВВЕР-440 має ряд недоліків, оскільки вона складається з прямокутних відсіків, значно зазубрених, з герметичною прокладкою, нанесеною частково зовні і частково зсередини герметичного кордону. Тому герметичність ЗО ВВЕР-440 нижче в порівнянні з оболонками західного типу, і, отже, підвищенню її герметичності приділяється велика увага.

Для робіт з виявлення витоків і герметизації, виконуваних компанією SUEZ Levis, були прийняті нові процедури, заходи і методи. У якості методів ідентифікації витоків використовуються:

- візуальний огляд;
- перевірка на герметичність стисненням азотом;
- перевірка на герметичність вакуумними камерами;
- перевірка на герметичність ультразвуковим детектором;
- перевірка на герметичність методом відбитка.

Ультразвуковий метод дозволяє виявляти витoki в важкодоступних місцях (наприклад, на стелях) на значній відстані (до 10 м). Ультразвуковий пошукач витoku приймає високочастотний шум газу, що випливає з витoku, і надзвук з частотою 35- 45 кГц перетворюється в гучний звук. Завдяки своїй значній чутливості, він підходить для ідентифікації витоків. Цей спосіб ідентифікації витоків успішно застосовується при локальних перевірках дверей з одинарним ущільненням, а також для випробування кришки реактора. Цей метод також використовується для локалізації витоків під час комплексних випробувань на герметичність.

Метод відбитка використовується тільки для виявлення витоків в демонтованих герметичних з'єднаннях, наприклад, з'єднаннях з гумовими ущільненнями. Такі ущільнення є на герметичних дверях, каналізаційних люках, люках обладнання і т. д.

Для локального контролю герметичності вузлів і компонентів на кордоні герметичності використовуються методи гелію і NOx. У разі компонентів, забезпечених випробувальними обсягами, використовуються методи локального контролю

герметичності при надлишковому тиску з вимірюванням або перепаду тиску, або витрати азоту. У разі компонентів, не оснащених випробувальними об'ємами, використовується метод зниженого тиску з вакуумною камерою і локалізація витoku методом мильних бульбашок.

Для усунення витоків застосовуються наступні методи: зварюванням; усунення прихованих витоків після видалення захисного бетону; шляхом впорскування епоксидних смол виробництва SIKА; шляхом впорскування поліуретанових матеріалів виробництва CARBOTЕCH.

Метод впорскування епоксидних смол полягає у уприскуванні двокомпонентної епоксидної смоли в тріщини в залізобетонних конструкціях або в поступовому заповненні зазорів між облицюванням і бетоном. Епоксидна смола (ін'єкційний матеріал) нагнітається в бетонні тріщини під тиском за допомогою спеціальних насосів.

Основні місця з вторинними витоками потребують ремонту за допомогою ін'єкційних матеріалів (поліуретан), здатних забезпечити герметичність залізобетонних стін. Це особливо важкодоступні місця для ін'єкцій звичайного типу (з епоксидними смолами). Приблизно через 35 секунд після впорскування поліуретанові матеріали розширюються.

Інтегральні випробування на ступінь витoku і структурну цілісність проводяться з метою перевірки герметичності і структурної цілісності захисної оболонки реактора і підвищення ефективності робіт по герметизації [64].

Для перевірки герметичності ємностей в Чеській Республіці та Словаччині використовується тільки абсолютний метод, коли тиск в захисній оболонці досягає заданого значення надлишкового тиску. Після підвищення тиску параметри захисного повітря стабілізуються протягом 6-8 годин. Цей період стабілізації був підтверджений моніторингом змін температури, вологості і тиску в захисній оболонці. Після стабілізації вимірюють температуру, тиск водяної пари і абсолютний тиск повітря в захисній оболонці (24 годин під час інтегрального випробування; 6 год під час періодичного інтегрального випробування на АЕС в Богуниці; 8 годин під час періодичного інтегрального випробування на АЕС у Моховці) (рис. 1.3) [64].

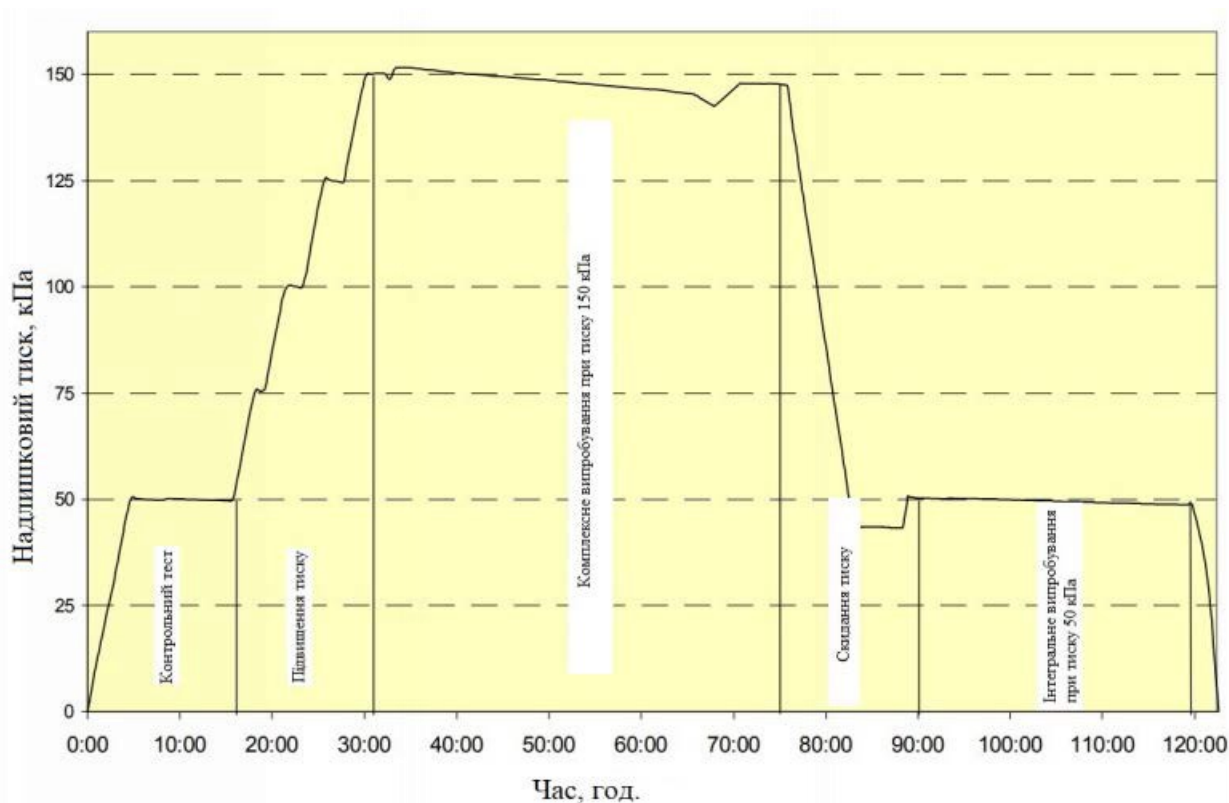


Рисунок 1.3 – Процедура інтегрального випробування на АЕС в Моховці

З наведеного рисунка 1.3 можна зробити висновок, що процес нагнітання повітря триває 12 годин. Стабілізація та вимірювання при постійному тиску тривають 42 години. Це говорить, про доцільність удосконалення діючих методів перевірки герметичності, які негативно впливають на загальні техніко-економічні показники атомних станцій.

Результати випробувань на чеських АЕС [65] підтверджують, що реакторні блоки з ВВЕР-440 задовольняють граничній умові $L = 13\%/24$ год.

1.5. Компенсаційний метод вимірювання витоку

Ще одним методом може розглядатися метод еталонної посудини [66]. Принцип цього методу заснований на порівнянні зміни тиску в ЗО і в провіреній на герметичність еталонній посудині, чи системі посудин, розташованих в ЗО. Як правило, еталонні посудини значно менші ЗО за об'ємом, величина яких відома, легше та суттєво точніше перевіряються на щільність. Величина витоку з ЗО визначається за зміною різниці між тисками в еталонній системі та ЗО. Ця різниця тисків мала, вона і гальмувала використання метода. На ЗАЕС був виготовлений

мікровитратомір и стало можливим надійно реєструвати різницю тисків у мм в. с. Це забезпечує більш високу точність, ніж система вимірювань за «абсолютним» методом, який використовує вимірювання абсолютних величин середнє в 30.

Вперше (ще в СРСР) практичне рішення про розробку «експрес» методів реалізовувалося у 1986 р. на Запорізькій АЕС в період пуску 3-го блоку ЗАЕС [66]. Випробовувалися два методи вимірювання витoku: компенсаційний та за швидкістю зниження тиску. Для використання методу вимірювання за швидкістю зниження тиску для випробувань не були готові технічні засоби. Позитивний результат на той час був отриманий тільки за компенсаційним методом. Спосіб отримав назву компенсаційний метод вимірювання витoku КМВВ [67]. Прототипний метод був відомий з кінця 50-х років. У США компенсаційний метод досліджувався та перевірявся на початку 60-х років [68]. Принцип компенсації втраченого за рахунок витoku повітря, контролювався або ваговим способом, або з використанням стандартного витратоміра.

В обох випадках витік визначається протягом тривалого часу, що обумовлюється необхідною точністю визначення її величини. Однак збільшення тривалості проведення випробувань автоматично призводить до необхідності врахування зміни температури та вологості. У КМВВ, на думку авторів, підтвердженого досвідом випробування та практичного застосування, обрано оптимальний варіант, при якому немає необхідності контролю зміни температури та вологості, а точність виміру істотно вища, ніж при використанні «абсолютного» методу. На рис. 1.4 наведено принципову схему використання методу КМВВ, що застосовувалася при пускових випробуваннях 3-го блоку Запорізької АЕС та 4-го блоку Балаківської АЕС у 1986 та 1994 роках.

Умовою цієї компенсації є рівність нулю величини витoku з контрольної ємності. Вимірювання проводяться наступним чином: плавним регулюванням вентиля подачі повітря в ГО домагаються рівності нулю значення витoku. В якості витoku беруть показання витратоміра на лінії подачі повітря. Принцип роботи компенсаційного методу полягає у наступному [66]:

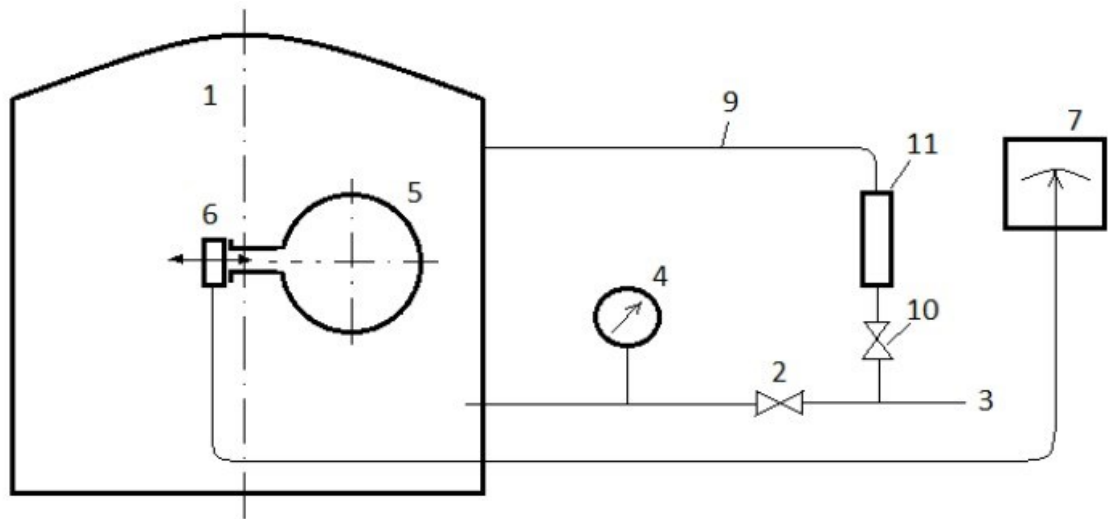


Рисунок 1.4 – Принципова схема компенсаційного методу

Відчиняється вентиль 2 і через трубопровід 3 з компресору в нього подається стиснений газ. За допомогою манометра 4 здійснюється контроль тиску. Через отвір, на якому знаходиться індикатор 6 потоку, стиснений газ заповняє і контрольну ємність 5. Водночас вторинний прилад 7 демонструє наявність потоку газу з гермооб'єму 1 в контрольну ємність 5. При досягненні випробуваного тиску вентиль 2 зачиняється, проводиться витримка, в процесі якої відбувається вирівнювання тиску між герметичним об'ємом і контрольною ємністю 5, що фіксується стабільними показаннями приладу 7 індикатора потоку 6.

При відсутності витoku з замкнутого об'єму 1 прилад 7 фіксуватиме відсутність перетікання газу між випробовуваним обсягом і контрольною ємністю 5. Якщо після вирівнювання тиску індикатор 6 потоку буде демонструвати перетікання газу з КЄ в герметичну оболонку, це буде свідчити про наявність витoku з ГО.

Для її вимірювання відкривається вентиль 10 і газ подається в герметичну оболонку 1 по трубопроводу 9 через витратомір 11, який фіксує витрату газу, що подається. З початком подачі газу перепад тисків між ГО і КЄ і перетікання газу з контрольної ємності 5 в замкнутий об'єм 1 почнуть зменшуватися. За допомогою вентилля 10 витрату газу, що подається, регулюють таким чином, щоб вторинний прилад 7 індикатора 6 потоку показав спочатку відсутність перетікання, а потім наявність зворотного перетікання з гермооб'єму, в КЄ. Потім витрату зменшують так,

щоб індикатор 6 потоку знову показав відсутність перетікання, а потім поява зворотного напрямку з контрольної ємності 5 в герметичну оболонку 1. За величину витоку приймають витрату газу, що подається в замкнутий об'єм 1 в періоди рівності тиску в випробувальному обсязі та контрольній ємності 5.

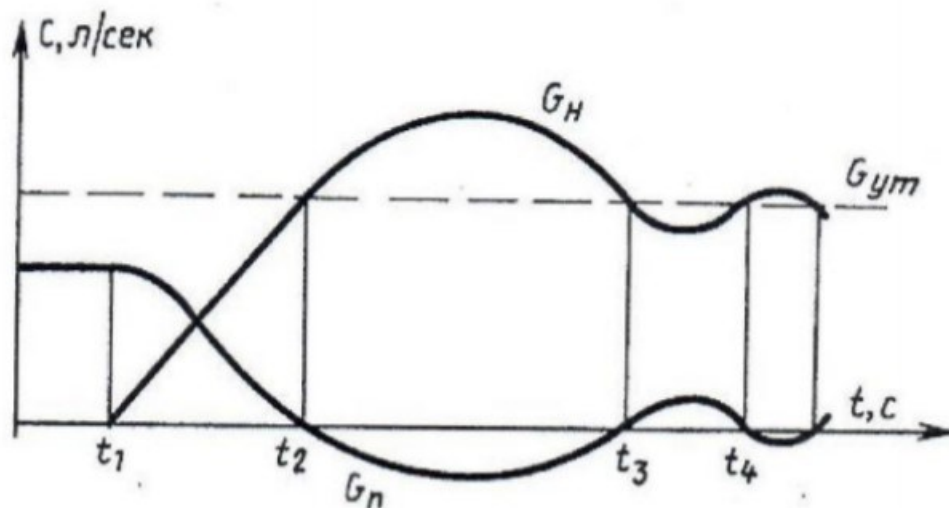


Рисунок 1.5 – Графік зміни в часі витрати витіку $G_{ут}$, перетікання G_p між гермооб'ємом і КЄ і витрати G_n стисненого газу, що подається в замкнутий об'єм

Для підвищення точності визначення витіку збільшення і зменшення витрати газу, що подається з переходом через періоди рівності тисків в випробувальному обсязі та контрольній ємності може виконуватися кілька разів з послідовним наближенням до стану динамічної рівноваги за тиском в зазначених обсягах.

1.6. Висновки до розділу

1. Розглянуто систему герметичного огороження АЕС з реакторами ВВЕР-1000 та ВВЕ-440. Визначено, що для випробувань на герметичність використовується абсолютний метод, який має такі недоліки: - великий час використання, - непрямий принцип визначення інтегрального витіку через розрахунок за рівнянням ідеального газу, звідки невелика точність отриманого результату. Через багатий досвід експлуатації досягнуто великий рівень герметичності, що ускладнює вимірювання

малих величин. Випробування герметичності системи герметичного огороження потребують більше доби часу, що негативно впливає на техніко-економічні показники АЕС.

2. Розглянуто основні патенти України, СРСР, Франції та США з питання визначення степені герметичності. Питання визначення герметичності судин є актуальним, особливо для двигунів та космічної техніки. Визначено, що основними методами, що можуть використовуватися для аналізу герметичності великих об'ємів є абсолютний метод, метод використання контрольної (еталонної) ємності. Всі розглянуті методи мають певні недоліки.

3. Розглянуто компенсаційний метод, що є перспективним, тому що він потребує менше приладів для вимірювання та є прямим методом, в якому вимірюється безпосередньо виток речовини. Він має бути доопрацьований з точки зору розробки методики проведення вимірювання та обробки результатів.

4. Випробування на герметичність проводяться у п'ять етапів. Найбільший час займають етапи нагнітання повітря, стабілізації параметрів та саме вимірювання. На скорочення часу цих етапів і треба зосередитися в роботі.

РОЗДІЛ 2

ВИКОРИСТАННЯ ЕЖЕКТОРУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЧАСУ НАГНІТАННЯ ПОВІТРЯ

2.1. Методика розрахунку ежектору

Розрахунок ежектору ведеться за методикою [69, 70, 71]. Алгоритм розрахунку складається в тому, що приймається коефіцієнт ежекції u та адіабатна швидкість $\lambda_{p.i.}$. Потім розраховується тиск на виході з ежектору P_c . При отриманні значення P_c , яке відрізняється від потрібного, змінюється u . Адіабатна швидкість $\lambda_{p.i.}$ впливає на результат не так сильно, як u . Після визначення термодинамічних параметрів, визначаються конструктивні розміри, які забезпечують бажані параметри. Далі наводиться приклад розрахунку для прийнятих вихідних даних.

Початкові дані:

P_p – тиск робочого повітря, МПа, $P_p = 0,68$ МПа.

T_p – температура робочого повітря, К. $T_p = 293$ К.

P_i – тиск повітря, що підсмоктується, МПа. $P_i = 0,1$ МПа.

T_i – температура повітря, що підсмоктується, К. $T_i = 293$ К.

k – показник адіабати. Для повітря $k 1,4$ [72,73].

R – газова постійна, $R = 287$ кДж/(кг К).

Q – витрата робочого газу, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $Q = 2,25 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 2,27$ кг/с.

Q – витрата робочого газу, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$. $Q = 2,25 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 2,27$ кг/с.

1. Задаємо коефіцієнтом ежекції: $u = 1$.

2. Визначаємо відносний тиск:

$$P_{p.i.} = \frac{P_i}{P_p} = \frac{0,1}{0,68} = 0,147, \quad (2.1)$$

3. Знаходимо газо-динамічні функції:

Задаємось наведеною адіабатною швидкістю: $\lambda_{p.i.} = 1,6$.

Визначаємо відносну густину

$$\varepsilon_{p.i.} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{k-1}{k+1}} = \left(1 - \frac{1,4-1}{1,4+1} \cdot 1,6^2\right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 0,249, \quad (2.2)$$

Визначаємо приведену масову швидкість:

$$q_{p.i.} = \frac{\lambda \cdot \varepsilon}{\varepsilon_*} = \frac{1,6 \cdot 0,249}{0,634} = 0,628, \quad (2.3)$$

Визначаємо критичну масову швидкість:

$$\varepsilon_{p.i.} = \left(1 - \frac{1,4-1}{1,4+1}\right)^{\frac{1}{0,4}} = 0,634, \quad (2.4)$$

4. Температура стиснутого повітря:

$$T_c = \frac{T_p + u \cdot T_i}{u + 1} = \frac{293 + 1 \cdot 293}{1 + 1} = 293 \text{ K}, \quad (2.5)$$

5. Знаходимо тиск у критичному перетині сопла:

$$P_{кр} = q_{p.i.} \cdot P_0 = 0,628 \cdot 0,68 = 0,427 \text{ МПа}, \quad (2.6)$$

6. Знаходимо питомий об'єм у критичному перетині сопла:

$$v_{кр} = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{287 \cdot 293}{0,427 \cdot 10^6} = 0,197 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}, \quad (2.7)$$

7. Знаходимо питомий об'єм повітря за н.у. ($P=1 \text{ атм}$, $T=293 \text{ K}$)

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1,2} = 0,833 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}, \quad (2.8)$$

8. Знаходимо критичну швидкість робочого потоку:

$$\omega = a = \sqrt{k \cdot P_{кр} \cdot v} = \sqrt{1,4 \cdot 0,427 \cdot 10^6 \cdot 0,197} = 343,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.9)$$

9. З рівняння нерозривності ($Q = F \cdot \omega$), знаходимо площу критичного перетину:

$$F = \frac{Q}{\omega} = \frac{2,25}{343} = 0,00656, \quad (2.10)$$

10. З площі перетину знаходимо діаметр критичного перерізу:

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00656}{3,14}} = 0,0914 \text{ м}, \quad (2.11)$$

11. Знаходимо відношення питомих об'ємів:

$$\frac{v_i}{v_p} = \frac{P_p \cdot T_i}{P_i \cdot T_p} = \frac{0,68 \cdot 293}{0,1 \cdot 293} = 6,8, \quad (2.12)$$

$$\frac{v_c}{v_p} = \frac{P_p \cdot T_c}{P_c \cdot T_p} = \frac{0,68 \cdot 293}{0,11 \cdot 293} = 7,567, \quad (2.13)$$

$$P_c = 1,1 \cdot P_i = 1,1 \cdot 0,1 = 0,11 \text{ МПа}, \quad (2.14)$$

12. Знаходимо оптимальне співвідношення $\frac{F3}{F_{p*}}$:

$$\frac{F3}{F_{p*}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} = \frac{8,733 \cdot \sqrt{-8,773^2 - 4 \cdot 0,582 \cdot 13,17}}{2 \cdot 0,582} = 13,387, \quad (2.15)$$

$$a = \phi 1 * \phi 2 * q_{p.i.} = 0,582, \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} b &= -(\phi 1 \cdot \phi 2 + 2 \cdot \varepsilon_{p.i.} \cdot ((\frac{1}{\phi 2} - 0,5) \cdot v_c / v_p \cdot (1 + u)^2 - (\phi 2 \cdot \phi 4 - 0,5) \cdot v_i / v_p \cdot u^2 \\ &= -8,77 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$c = 2 \cdot \frac{\varepsilon_{p.i.}}{q_{p.i.}} \cdot \left(\frac{1}{\phi 3} - 0,5 \right) \cdot \frac{v_c}{v_p} \cdot (1 + u)^2 = 13,172, \quad (2.18)$$

$$\phi 1 = 0,95; \phi 2 = 0,975; \phi 3 = 0,9; \phi 4 = 0,925;$$

13. Знаходимо тиск стиснення, який може бути досягнутий:

$$\frac{\Delta P_c}{P_i} = \frac{k \cdot \phi_1^2 \cdot \phi_2^2 \cdot \lambda_{p.i.}^2}{2 \cdot (k + 1) \cdot \text{Пр.і.} \cdot \left(\left(\frac{1}{\phi_3} - 0,5 \right) \cdot \frac{vc}{vp} \cdot (1 + u)^2 - (\phi_3 \cdot \phi_4 - 0,5) \cdot \frac{vi}{vp} \cdot nu^2 \right)} =$$

$$\frac{1,4 \cdot 0,95^2 \cdot 0,975^2 \cdot 1,6^2}{4,8 \cdot 0,147 \cdot \left(\left(\frac{1}{0,9} - 0,5 \right) \cdot 7,567 \cdot 2^2 - (0,9 \cdot 0,925 - 0,5) \cdot 6,8 \cdot 1,13 \cdot 1^2 \right)} = 0,605, \quad (2.19)$$

$$n = \frac{\frac{f_3}{f_{p*}}}{\frac{f_3}{f_{p*}} - \frac{1}{q_{p.i.}}} = \frac{13,38}{13,38 - \frac{1}{0,628}} = 1,192, \quad (2.20)$$

14. Знаходимо ΔP_c :

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P_c}{P_i} \cdot P_i = 0,605 \cdot 0,1 = 0,0605 \text{ МПа} = 0,605 \text{ бар}, \quad (2.21)$$

15. Знаходимо тиск за дифузором, тобто за ежектором P_c :

$$P_c = P_i + \Delta P = 0,1 + 0,0605 = 0,161 \text{ МПа} = 1,605 \text{ бар}, \quad (2.21)$$

16. Знаходимо тиск потоку, що ежектуюється, у вхідному перетині циліндричної камери змішення:

$$\frac{\Delta P_k}{P_i} = \frac{0,5 \cdot k \cdot \varepsilon_{p*} \cdot \text{Пр.і.} \cdot \frac{vi}{vp} \cdot u^2}{\phi_4^2 \cdot \text{Пр.і.} \cdot \left(\frac{f_3}{f_{p*}} - \frac{1}{q_{p.i.}} \right)^2} = \frac{0,5 \cdot 1,4 \cdot 0,249 \cdot 0,143 \cdot 6,8 \cdot 1}{0,925^2 \cdot 0,147 \cdot \left(13,387 - \frac{1}{0,628} \right)^2} = 0,0195, \quad (2.23)$$

17. Знаходимо ΔP_k :

$$\Delta P_k = \frac{\Delta P_k}{P_i} \cdot P_i = 0,0195 \cdot 0,1 = 0,00195 \text{ МПа} = 0,0195 \text{ бар}, \quad (2.24)$$

18. Знаходимо $\frac{P_2}{P_i}$:

$$\frac{P_2}{P_i} = 1 - \frac{\Delta P_k}{P_i} = 1 - 0,00195 = 0,98, \quad (2.25)$$

19. Знаходимо тиск на виході P_2 :

$$P_2 = \frac{P_2}{P_i} \cdot P_i = 0,98 \cdot 0,1 = 0,098 \text{ МПа} = 0,98 \text{ бар}, \quad (2.26)$$

$$G_c = G_p \cdot (1 + u) = 2,25(1 + 1) = 4,5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 5,4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (2.27)$$

$$G_i = G_p \cdot u = 2,25 \cdot 1 = 2,25 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 2,7 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (2.28)$$

20. Знаходимо тиск змішаного потоку у вихідному перетині циліндричної камери:

$$\frac{\Delta P_D}{\Delta P_K} = \left(\frac{1+u}{u} \right)^2 \cdot \frac{v_c}{v_i} = \left(\frac{2}{1} \right)^2 \cdot 1,113 = 3,636, \quad (2.29)$$

21. Знаходимо тиск P_3 :

$$P_3 = P_2 + \Delta P = 0,105 \text{ МПа}, \quad (2.30)$$

22. Знаходимо критичну швидкість:

$$a_{p*} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T} = \sqrt{\frac{2,8}{1,4+1} \cdot 287 \cdot 293} = 313,219 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.31)$$

23. Знаходимо критичний перетин сопла:

$$F_{p*} = \frac{G_p \cdot a_p}{k \cdot \Pi \cdot \rho} = \frac{2,25/313,219}{1,4 \cdot 0,1427 \cdot 0,68 \cdot 10^6} = 0,00519 \text{ м}^2, \quad (2.32)$$

$$d_{p*} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{p*}}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00519}{3,14}} = 0,0813 \text{ м}, \quad (2.33)$$

24. Розраховуємо вихідний перетин сопла:

$$F_1 = \frac{F_{p*}}{q_{p.i.}} = \frac{0,00519}{0,628} = 0,00826 \text{ м}^2, \quad (2.34)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00826}{3,14}} = 0,103 \text{ м}, \quad (2.35)$$

25. Розраховуємо перетин та діаметр камери змішання:

$$F_3 = \frac{F_3}{F_{p*}} \cdot F_{p*} = 13,387 \cdot 0,00519 = 0,0513 \text{ м}^2, \quad (2.36)$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_3}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0513}{3,14}} = 0,256 \text{ м}, \quad (2.37)$$

26. Розраховуємо діаметр вільного струму:

$$d_4 = 1,55 \cdot d_1 \cdot (1+u) = 1,55 \cdot 0,103 \cdot (1+1) = 0,318 \text{ м}, \quad (2.38)$$

27. Розраховуємо відстань від вхідного перетину робочого сопла до перетину циліндричної камери:

$$l_c = l_{c1} + l_{c2} = 0,399 + 0,0623 = 0,461 \text{ м.}, \quad (2.39)$$

$$l_{c1} = \frac{0,37 + u}{0,352} \cdot d_1 = \frac{0,37 + 1}{0,352} \cdot 0,103 = 0,399 \text{ м.}, \quad (2.40)$$

$$l_{c2} = d_4 - d_3 = 0,318 - 0,256 = 0,0623 \text{ м.}, \quad (2.41)$$

28. Розраховуємо довжину циліндричної камери змішання:

$$l_k = 8 \cdot d_3 = 8 \cdot 0,256 = 2,046 \text{ м.}, \quad (2.42)$$

29. Швидкість потоку на виході з ежектору задається: $\omega_c = 30 \text{ м/с}$.

30. З рівняння нерозривності отримуємо площу поперечного перерізу дифузору:

$$F_c = \frac{G_c}{\omega_c} = \frac{4,5}{30} = 0,15 \text{ м}^2, \quad (2.43)$$

$$d_c = \sqrt{4 \cdot \frac{F_c}{3,14}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,15}{3,14}} = 0,437 \text{ м.}, \quad (2.44)$$

31. Знаходимо довжину дифузору:

$$l_d = \frac{\frac{d_c - d_3}{2}}{t_{g10}} = 0,515 \text{ м.}, \quad (2.45)$$

За представленою методикою була розроблена математична модель, за допомогою якої були розраховані конструкції ежекторів, які були спроектовані на різні значення кінцевого тиску. Результати розрахунків наведені в додатку Г.

2.2. Методика отримання робочої характеристики для обраної конструкції ежектору

Визначення часу нагнітання повітря за допомогою ежектору здійснюється через використання робочої характеристики конкретного ежектору, який впродовж випробувань працює в перемінному графіку навантаження. Для розробки характеристики ежектору використовувалася методика [69]. Послідовність розрахунку характеристики ежектору при заданій геометрії наступна:

$$p_c, u, (u_{\text{пред}}), u_{\text{пред}}, q_{p2}, q_{H2}, q_{c3}, \lambda_{p2}, \lambda_{H2}, \lambda_{c3}, P_{p2}, P_{H2}, P_{c3}, \frac{p_c}{p_H}, p_c$$

Тобто, тиск за ежектором спочатку задається, а потім уточняється. Рівність прийнятого та визначеного значень досягається підбором коефіцієнта інжекції u . Приведена масова швидкість робочого потоку q_{p2} та потоку, що інжектуються q_{H2} у

вхідному перерізі циліндричної камери змішання (КЗ) та стиснутого повітря у вихідному перерізі КЗ q_{c3} (так же як і відносні швидкості λ та відносні тиски Π) визначаються через відомі співвідношення площини. Характеристика ежектору, який розрахований для кінцевого тиску 1,35 бар, приведена в табл. 2.1. Характеристики ежекторів, що розраховані на інші протитиски, приведені в Додатку Е.

Таблиця 2.1 - Характеристика ежектору, що розрахований на протитиск 1,35 бар

p_c, МПа	u	V_{tc}, $\text{нм}^3/\text{год}$
0,1542	0,0000	8000
0,1525	0,1000	8800
0,1513	0,2000	9601
0,1501	0,3000	10401
0,1497	0,4000	11201
0,1451	0,5000	12001
0,1462	0,6000	12801
0,1449	0,7000	13601
0,1430	0,8000	14401
0,1440	0,9000	15201
0,1400	1,0000	16001
0,1394	1,1000	16801
0,1350	1,2000	17601
0,1320	1,3000	18401
0,1254	1,3240	18593
0,1000	1,3240	18593

З наведеної характеристики видно, що при збільшенні тиску в ГО від 0,1 до 0,125 МПа витрата з ежектору буде максимальна та постійна 18593 $\text{м}^3/\text{год}$. При подальшому збільшенні тиску в ГО витрата починає падати та при досягненні тиску 0,1542 МПа витрата буде мінімальна і буде дорівнювати витраті через компресор, тобто коефіцієнт інжекції при цьому дорівнює нулю.

2.3. Оптимізація конструкції ежектору для скорочення часу нагнітання повітря для випробувань

Одним з етапів випробувань є нагнітання повітря у ГО до тиску $0,7+0,2$ кгс/см² (надл.) [74]. Подача повітря для випробування здійснюється компресором.

В роботі було запропоновано для зменшення часу нагнітання повітря використати ежектор, який за рахунок підсмоктування навколишнього повітря забезпечує підвищення витрати повітря на виході [75].

Метою цього підрозділу є аналіз використання ежектору для прискорення процесу нагнітання повітря при проведенні випробувань на герметичність СГО реакторної установки з ВВЕР. Розрахунки проводилися на прикладі енергоблоку №3 Рівненської АЕС.

З досвіду проведення випробувань на герметичність СГО реакторної установки з ВВЕР-1000, що розташована на третьому та четвертому енергоблоках РАЕС було з'ясовано, що:

- вільний об'єм ГО дорівнює 60000 м³;
- для забезпечення випробувань використовується компресор марки ЦК-135/8 [76];
- при початку роботи компресора при тиску в ГО 1 атм (абс.) тиск на напорі компресора дорівнює $2,5$ кгс/см² (надл.).

Згідно [74] швидкість підвищення тиску у ГО не має перевищувати $0,4$ кгс/(см²·год.). Випробування мають проводитися при тиску $0,72$ кгс/см². З цього витікає, що найменший час нагнітання повітря може дорівнювати $0,72/0,4 = 1,8$ години. Це у $2,5$ рази менше, ніж час сьогоdnішнього нагнітання на РАЕС і суттєво менший за цю величину для інших АЕС.

Враховуючи, що тиск за компресором при початку нагнітання дорівнює $2,5$ кгс/см² ($2,45$ бар, надлишкове), тобто при тиску в ГО $P_{ГО} = 1$ атм, можна вважати, що опір тракту від компресора до ГО дорівнює $2,45$ бар.

Номинальні параметри компресора зазначені в технічному паспорті:

$Q = 135$ м³/хв. при тиску $P = 6,8$ кгс/см² ($6,668$ бар) [76]. Характеристика

компресора знаходиться в діапазоні 0,42 - 0,6 МПа і $Q = 110 - 150 \text{ м}^3/\text{хв.}$ [77]. Таким чином в період часу, коли компресор підвищує тиск в гермооб'ємі від 1 атм (1,0132 бар) до $1,0132 + 0,72 \times 0,98 = 1,719$ бар компресор працює поза робочої характеристики. Обробка характеристики компресора [77] дала можливість отримати залежність витрати від кінцевого тиску (додаток Е), яка використовувалася у подальших розрахунках.

Прийнявши, що опір тракту від компресора до гермооб'єму при зміні тиску в ГО практично не змінюється, розрахуємо час нагнітання за наступним алгоритмом. Абсолютний тиск за компресором поступово збільшується від $P_1 = P_{\text{го}} + \Delta P_{\text{тр}} = 1,0132 + 2,45 = 3,463$ бар до $1,719 + 2,45 = 4,169$ бар.

За прийнятим тиском за компресором P_1 визначаємо витрату q ($\text{м}^3/\text{хв.}$). Приймаємо інтервал часу τ (наприклад 10 хвилин), за який витрата повітря практично не зміниться. Тоді, за цей час до ГО буде подано:

$$Q = q \cdot \tau; \text{ м}^3, \quad (2.39)$$

Знаходимо масу повітря в гермооб'ємі:

$$m = m_0 + \Delta m, \quad (2.40)$$

де m_0 – початкова кількість повітря в ГО;

Δm – маса закачаного повітря

$$\Delta m = Q \cdot \rho = Q \cdot 1,2041; \text{ кг}, \quad (2.41)$$

ρ – густина повітря при 20 °С.

За рівнянням Менделєєва-Клапейрона для ідеального газу визначаємо відповідний тиск P_2 , який буде мати місце в ГО при новій масі повітря:

$$P_2 = m \cdot R_{\mu} \cdot T/V, \quad (2.42)$$

Якщо $P_2 < P_n = 1,719$ бар, повторюємо розрахунок з початку, враховуючи нову початкову масу повітря та тиск в ГО. Розрахуємо початкову кількість повітря в ГО при атмосферному тиску. Приймаємо температуру повітря 293 К. Молярна маса повітря (кисень – 21%, азот – 78%, аргон – 1%) дорівнює 29 кг/моль. Тиск в ГО 1 атм = 1,01325 бар = 101325 Па.

Універсальна газова стала для повітря:

$$R_{\mu} = \frac{8314}{29} = 286.69 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (2.43)$$

Початкова маса повітря:

$$m = \frac{P \cdot V}{R_{\mu} \cdot T} = \frac{101325 \cdot 60000}{286.69 \cdot 293} = 72374,8 \text{ кг}, \quad (2.44)$$

З аналізу характеристики компресору ЦК-135/8 можна відмітити, що від 0,42 до 0,6 МПа характеристика - практично лінійна функція. В результаті апроксимації отримаємо рівняння залежності питомої витрати повітря від тиску після компресору при $P = 1,0132 + 2,45 = 3,463$ бар:

$$q = - 21,775 \cdot P + 161,45, \text{ м}^3/\text{хв}, \quad (2.45)$$

де P – тиск за компресором, МПа

Тоді

$$q (P_1 = 3,463 \text{ бар}) = - 21,775 \cdot 0,3463 + 161,45 = 153,91 \text{ м}^3/\text{хв}, \quad (2.46)$$

За 10 хвилин буде закачано

$$Q = 153,91 \cdot 10 = 1539,1 \text{ м}^3, \quad (2.47)$$

Маса цього повітря:

$$\Delta m = Q \cdot \rho = 1539,1 \cdot 1,2041 = 1853,22 \text{ кг}, \quad (2.48)$$

Маса повітря в ГО через 10 хв:

$$m = m_0 + \Delta m = 72374,8 + 1853,22 = 74228 \text{ кг}, \quad (2.49)$$

Тиск в гермооб'ємі через 10 хвилин

$$P = \frac{m \cdot R_{\mu} \cdot T}{V} = \frac{74228 \cdot 286,69 \cdot 293}{60000} = 103919 \text{ Па}, \quad (2.50)$$

Результати подальшої зміни тиску в ГО з інтервалом часу 10 хвилин наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок часу досягнення тиску в ГО $1,72 \text{ кгс/см}^2$ ($P_{\text{ГО}}$ – тиск в ГО, P_1 – тиск перед ежектором, q – питома витрата повітря за ежектором, d_m – маса повітря, яке буде закачано за відповідний час до ГО, m_0 – початкова маса повітря у ГО перед початком заданого інтервалу часу, m – наявна маса повітря у ГО в кінці розглянутого інтервалу часу, $P_{\text{ГО'}}$ – тиск у ГО в кінці цього інтервалу часу)

Час після пуску, хв.	10	20	30	40	50	60
$P_{\text{ГО}}$, бар	1,0132	1,039194	1,065126	1,09105	1,116963	1,142868
P_1 , бар	3,4632	3,489194	3,515126	3,54105	3,566963	3,592868
q , м ³ /хв	153,9054	153,8488	153,7923	153,7358	153,6794	153,6229
d_m , кг	1853,021	1852,339	1851,659	1850,979	1850,3	1849,62
m_0 , кг	72374,94	74227,96	76080,3	77931,96	79782,94	81633,24
m , кг	74227,96	76080,3	77931,96	79782,94	81633,24	83482,86
$P_{\text{ГО'}}$, Па	103919,4	106512,6	109105	111696,3	114286,8	116876,2

Час після пуску, хв.	70	80	90	100	110	120
$P_{\text{ГО}}$, бар	1,168762	1,194648	1,220523	1,24639	1,272246	1,298094
P_1 , бар	3,618762	3,644648	3,670523	3,69639	3,722246	3,748094
q , м ³ /хв	153,5665	153,5101	153,4538	153,3974	153,3411	153,2848
d_m , кг	1848,941	1848,262	1847,583	1846,905	1846,227	1845,549
m_0 , кг	83482,86	85331,8	87180,06	89027,65	90874,55	92720,78
m , кг	85331,8	87180,06	89027,65	90874,55	92720,78	94566,33
$P_{\text{ГО'}}$, Па	119464,8	122052,3	124639	127224,6	129809,4	132393,1

Час після пуску, хв.	130	140	150	160	170	180
P _{го} , бар	1,323931	1,349759	1,375578	1,401388	1,427187	1,452978
P ₁ , бар	3,773931	3,799759	3,825578	3,851388	3,877187	3,902978
q, м ³ /хв	153,2285	153,1722	153,116	153,0598	153,0035	152,9474
dm, кг	1844,871	1844,194	1843,516	1842,839	1842,163	1841,486
m ₀ , кг	94566,33	96411,2	98255,39	100098,9	101941,7	103783,9
m, кг	96411,2	98255,39	100098,9	101941,7	103783,9	105625,4
P _{го'} , Па	134975,9	137557,8	140138,8	142718,7	145297,8	147875,9

Час після пуску, хв.	190	200	210	220	230	240
P _{го} , бар	1,478759	1,50453	1,530292	1,556044	1,581787	1,607521
P ₁ , бар	3,928759	3,95453	3,980292	4,006044	4,031787	4,057521
q, м ³ /хв	152,8912	152,8351	152,7789	152,7228	152,6668	152,6107
dm, кг	1840,81	1840,134	1839,458	1838,783	1838,108	1837,433
m ₀ , кг	105625,4	107466,2	109306,3	111145,8	112984,6	114822,7
m, кг	107466,2	109306,3	111145,8	112984,6	114822,7	116660,1
P _{го'} , Па	150453	153029,2	155604,4	158178,7	160752,1	163324,5

Час після пуску, хв.	250	260	270	274
P _{го} , бар	1,633245	1,65896	1,684665	1,710361
P ₁ , бар	4,083245	4,10896	4,134665	4,160361
q, м ³ /хв	152,5547	152,4986	152,4426	152,3867
dm, кг	1836,758	1836,084	1835,409	733,8941
m ₀ , кг	116660,1	118496,9	120333	122168,4
m, кг	118496,9	120333	122168,4	122902,3
P _{го'} , Па	165896	168466,5	171036,1	172063,5

З проведених розрахунків отримано, що тиск в ГО 1,72 бар буде отримано через $274 \text{ хв} = 274/60 = 4,57$ години. Це практично співпадає з часом нагнітання на 3-у та 4-у блоках РАЕС.

Перевіримо отриманий результат. При тиску в ГО 1,72 бар в гермооб'ємі буде наступна маса повітря:

$$m_f = \frac{P \cdot V}{R_\mu \cdot T} = \frac{168800 \cdot 60000}{286.69 \cdot 293} = 120571 \text{ кг}, \quad (2.51)$$

Таким чином для досягнення цього тиску в ГО потрібно закачати:

$$\Delta m = m_f - m_0 = 120571 - 72374,9 = 48196 \text{ кг}, \quad (2.52)$$

Відповідний об'єм повітря:

$$V = \frac{\Delta m}{\rho} = \frac{48196}{1,204} = 40030 \text{ м}^3, \quad (2.53)$$

Середня подача компресора з табл. 2.1 дорівнює $q = 153,14 \text{ м}^3/\text{хв}$.

Таким чином для здійснення нагнітання буде потрібно

$$\tau = \frac{V}{q} = \frac{40030}{153,14} = 261,4 \frac{\text{м}^3}{\text{хв}}, \quad (2.54)$$

Тобто, отримано значення, яке практично співпадає з попереднім значенням часу на нагнітання. Беручи до уваги час нагнітання на РАЕС, який здійснюється за 4,5 години, середня подача компресора:

$$q = \Delta m / 4,5 = 9317 \text{ м}^3/\text{год} = 155,29 \text{ м}^3/\text{хв}, \quad (2.55)$$

що має похибку з отриманим значенням 1,4 %.

2.4. Розрахунок часу нагнітання з використанням ежектору

Розрахунок ежектору [54] проводиться при зазначеному тиску перед та після ежектору. Відразу виникає питання: при якому тиску за ежектором треба проводити розрахунок. В процесі нагнітання тиск у ГО змінюється від 1,013 до 1,72 бар. Тобто в будь-якому випадку сконструйований пристрій буде працювати в широкому діапазоні параметрів. Таким чином для вирішення задачі: визначення часу роботи компресора з ежектором до досягнення тиску в ГО 1,72 бар (абс.), необхідно вибрати початкові параметри, розрахувати ежектор, а потім визначити витрату ежектору вже заданої

конструкції, як функцію зміни тиску за ежектором. Оскільки не відомо, при яких параметрах час роботи ежектору буде мінімальний, треба відповідні розрахунки провести для декількох варіантів ежектору, розрахованих для різних початкових тисків за ежектором.

Приведемо розрахунки першого вибраного варіанту. Оскільки тиск за ежектором змінюється у вказаному діапазоні, для розрахунку був вибраний середній тиск 1,35 бар. При тиску за компресором 7 бар тиск перед ежектором дорівнює 4,5 бар. Витрата робочого повітря за компресором 8000 м³/год.

Для розрахованої конструкції був проведений розрахунок зміни параметрів при зміні тиску в ГО (після ежектору). Результати розрахунку – залежність витрати повітря після ежектору в залежності від тиску за ним (тиск в ГО) наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Характеристики ежектору, спроектованому при $P_c=1,35$ бар, при перемінному режимі роботи

P_c , МПа	Коеф. ежекції, u	Витрата після ежектору, м ³ /год	Витрата після ежектору, м ³ /хв	Середня витрата в інтервалі тиску
0,1551	0	8000	133,3333	
0,1535	0,1	8800	146,6667	140
0,1519	0,2	9601	160,0167	153,3417
0,1501	0,3	10401	173,35	166,6833
0,1485	0,4	11201	186,6833	180,0167
0,1465	0,5	12001	200,0167	193,35
0,1445	0,6	12801	213,35	206,6833
0,1423	0,7	13601	226,6833	220,0167
0,1401	0,8	14401	240,0167	233,35
0,1367	0,9	15201	253,35	246,6833
0,133	1	16001	266,6833	260,0167
0,1279	1,0257	16207	270,1167	268,4

В табл. 2.2 в останній колонці наводиться середня витрата в інтервалі тиску, що

наведений в першій колонці. Тобто наприклад, при роботі ежектору в інтервалі тиску в ГО від 0,1279 до 0,133 МПа витрата ежектору дорівнює 268,4 м³/хв. До досягнення тиску в ГО 0,1279 МПа витрата за ежектором постійна і дорівнює 270,11 м³/хв. Після досягнення тиску в ГО 0,1551 МПа витрата за ежектором дорівнює витраті за компресором 133,3 м³/хв. Тобто можна ежектор байпасувати, що навіть збільшить витрату повітря.

За допомогою наведених даних був проведений розрахунок зміни тиску в ГО з часом. Розрахунок часу роботи ежектора до досягнення потрібного часу в ГО наведений в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Розрахунок часу нагнітання повітря в ГО до досягнення необхідного тиску 1,72 бар за допомогою ежектору, що спроектований на кінцевий тиск 1,35 бар

Час після пуску, хв.	10	58,5	69,7	78,2	86,4	92
$P_{го}$, бар	1,013	1,240906	1,279607	1,330278	1,367533	1,401629
P_1 , бар	3,463	3,690906	3,729607	3,780278	3,817533	3,851629
q , м ³ /хв	270,12	270,12	268,40	260,02	246,68	233,35
d_m , кг	3252,205	2764,374	3619,32	2661,045	2435,422	1573,339
m_0 , кг	72374,94	88635,97	91400,34	95019,66	97680,71	100116,1
m , кг	75627,15	91400,34	95019,66	97680,71	100116,1	101689,5
$P_{го}'$, Па	105878,2	127960,7	133027,8	136753,3	140162,9	142365,5

Час після пуску, хв.	97,9	103,6	109,7	115	121,4	127,6
$P_{го}$, бар	1,423655	1,445537	1,465394	1,485275	1,501355	1,519337
P_1 , бар	3,873655	3,895537	3,915394	3,935275	3,951355	3,969337
q , м ³ /хв	220,02	206,68	193,35	180,00	166,68	153,34
d_m , кг	1562,934	1418,404	1420,04	1148,616	1284,369	1144,652
m_0 , кг	101689,5	103252,4	104670,8	106090,8	107239,5	108523,8
m , кг	103252,4	104670,8	106090,8	107239,5	108523,8	109668,5
$P_{го}'$, Па	144553,7	146539,4	148527,5	150135,5	151933,7	153536,2

Час після пуску, хв.	134,5	209,2
$P_{го}$, бар	1,535362	1,551645
P_1 , бар	3,985362	4,001645
q , м ³ /хв	140,00	133,33
d_m , кг	1163,064	11991,54
m_0 , кг	109668,5	110831,5
m , кг	110831,5	122823,1
$P_{го}'$, Па	155164,5	171952,7

За результатом розрахунку отримано, що заданий тиск 1,72 бар при використанні ежектору, який був запроектований на кінцевий тиск 1,35 бар, буде досягнуто за $209,7/60=3,49$ години, що на $4,57-3,49=1,08$ години менше, ніж без ежектору. Економія часу складає 23,5 %.

Було проведено відповідні розрахунки для ежектору, спроектованого на 1,25; 1,45; 1,56 та 1,7 бар. Залежність часу нагнітання для різного проектного тиску за ежектором наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 - Залежність часу, необхідного для нагнітання повітря у ГО до 1,72 бар, від проектного тиску за ежектором

В результаті проведених розрахунків отримано, що мінімальний час нагнітання повітря у ГО до досягнення тиску 1,72 бар дорівнює 3,09 години (186 хвилин) і відповідає проектному тиску за ежектором 1,45 бар.

2.5. Моделювання ежектору

З розрахунків, наведених в 2.1-2.3 були визначені геометричні параметри ежектору для його подальшого моделювання у середовищі SolidWorks, що являє собою автоматизований програмний комплекс для моделювання механізмів будь якої достовірної конструкції у трьох вимірному просторі з подальшим випробуванням цих механізмів на різні параметри. За допомогою моделі можливий аналіз того, як механізм або структура буде поводитися при реальних умовах. Була побудована тривимірна модель та за допомогою додатку FlowSimulation (симуляція перебігу будь якої рідини у конструкції) промодельована картина швидкостей всередині ежектору. Цей пакет програм, SolidWorks, дає змогу змодельовати, а потім випробувати виріб на різноманітні параметри. Мета моделювання ежектору складається у перевірці розрахункових геометричних розмірів на дійсність за допомогою додатку FlowSimulation у середовищі SolidWorks.

2.5.1. Опис конструкції ежектору

На рис. 2.2 зображено ежектор у перерізі розрахованої геометрії.

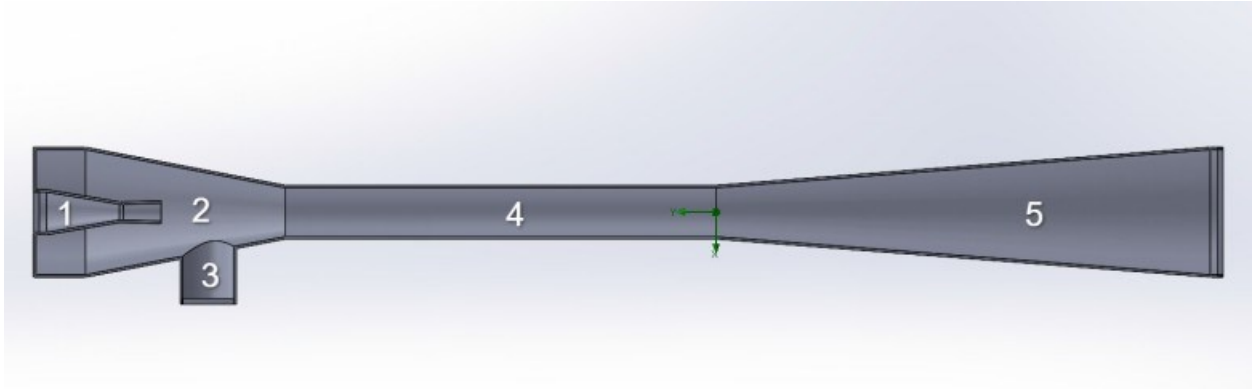


Рисунок 2.2 – Переріз моделі ежектору

- 1 сопло робочого повітря після компресору; 2 - конфузор; 3 - патрубок пасивного середовища (повітря з навколишнього середовища); 4 - камера змішування (КЗ); 5 - дифузор

Робоче повітря після компресору потрапляє у сопло 1. Сопло має форму спільну з соплом Лавалю. Сопло призначено для отримання високошвидкісного струменя. З патрубку пасивного середовища 3 відбувається підсмоктування повітря у конфузор 2. Далі потік робочого повітря та потік пасивної середовища змішуються у камері змішування 4. Після КЗ потік, який утворився шляхом змішання пасивного та робочого потоків, потрапляє у дифузор 5, звідки повітря потрапляє до ГО. Дифузор призначений для збільшення тиску в ньому, при цьому швидкість зменшується.

2.5.2. Попередні результати

Була побудована модель спроектованого ежектору на кінцевий тиск 1,35 бар. В результаті процесу моделювання отримана конструкція, що показана на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Модель ежектору, спроектованого на протитиск 1,35 бар

В результаті аналізу представлених даних отримано, що при тиску з робочого сопла 4,5 бар та протитиску 1,35 бар витрата за ежектором становить $211,25 \text{ м}^3/\text{хв}$. Та витрата через робоче сопло при тих же тисках дорівнює 9,82 т/год.

Також була побудована модель ежектору для протитиску 1,45 бар. Цей протитиск є оптимальним для ежектору з точки зору мінімального часу нагнітання повітря у ГО. Відмінності між ежектором на протитиск 1,35 бар та 1,45 бар полягають у різній довжині камери змішування, довжині дифузору, вихідному діаметру дифузору, відстані між камерою змішування та вихідним діаметром робочого сопла, довжиною робочого сопла, діаметром патрубку пасивної середи. Цей же ежектор було промодельовано на протитиски від 1,013 бар до 1,72 бар аби отримати більш докладніші характеристики ежектору, зокрема витрати на вході у робоче сопло, витрати повітря, що підсмоктується з навколишньої середи та витрати на виході з дифузору. Відповідно до кожного експерименту отримана характеристика розподілу швидкостей в ежекторі.

2.5.3. Аналіз похибки розрахункових даних

Для ежектору на протитиск 1,35 бар похибка на витрату за ежектором становить 18%, тому її зменшення полягає у оптимізації внутрішньої поверхні ежектору, зокрема кутом між дифузором та камерою змішування. Щодо похибки на витраті робочого сопла, то вона дорівнює 4%. Це означає, що форма та внутрішня поверхня сопла майже ідеальна. У табл. 2.5 показано, що при збільшенні тиску за ежектором

зменшується витрата за ежектором та витрата підсмоктуємого повітря.

Таблиця 2.5 – Зміна витрати та коефіцієнту інжекції при збільшенні тиску за ежектором, спроектованого на протитиск 1,35 бар (тиск перед ежектором 4,5 бар)

Тиск за ежектором, бар	Витрата за ежектором, кг/с	Витрата перед ежектором, кг/с	Витрата підсмоктуємого повітря, кг/с	Коефіцієнт інжекції
1,013	4,8002	2,7259	2,0301	0,73
1,279	4,6646	2,7275	1,9135	0,7
1,330	4,607	2,7267	1,9019	0,7
1,367	4,4719	2,7279	1,7393	0,64
1,401	4,2224	2,7266	1,4835	0,54
1,423	4,1365	2,7284	1,4014	0,51
1,445	3,9565	2,7257	1,2201	0,45
1,465	3,7842	2,7264	1,0419	0,38
1,485	3,5937	2,7258	0,8582	0,31
1,501	3,4482	2,7297	0,7078	0,26
1,519	3,328	2,7269	0,5915	0,22
1,535	3,1912	2,7264	0,4576	0,17
1,551	3,1162	2,7284	0,3847	0,14
1,600	2,7671	2,7291	0,0411	0,02

Через те, що витрата пасивної середи змінюється, то і коефіцієнт інжекції зменшується від 0,7 до 0,02. Графік залежності коефіцієнту інжекції від тиску за ежектором представлено на рис. 2.4.

Для ежектору, розрахованого на оптимальний протитиск 1,45 бар було отримано розподіл швидкостей у ежекторі (рис. 2.5).

З аналізу результату моделювання можна побачити (рис. 2.5), що у камері змішування (КЗ) потік добре змішується: нема відриву потоку від стінок КЗ. На

виході з КЗ відсутнє прилипання до стінок дифузору. Це є хороша ознака того, що кут між КЗ та дифузором оптимальний. У дифузорі потік має відхилення до верхньої стінки. Це обумовлено розташування патрубків пасивної серії. На рис. 2.6 (а,б) показано, що як змінюється швидкість в залежності від протитиску від 1,013 бар до 1,71 бар.

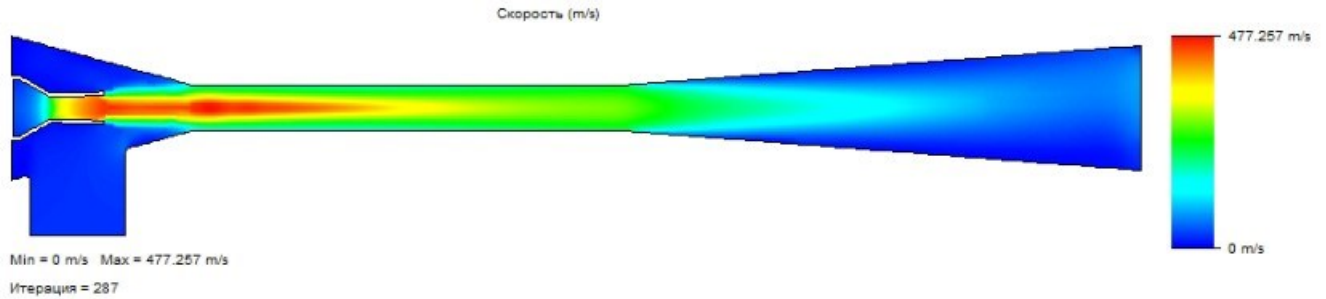
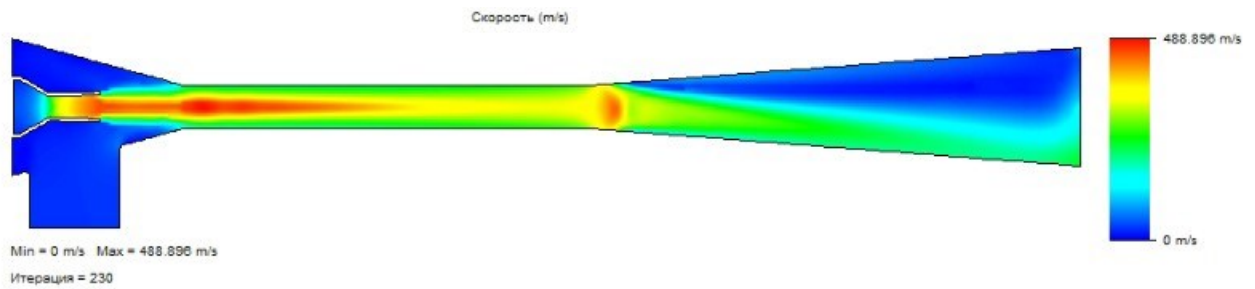
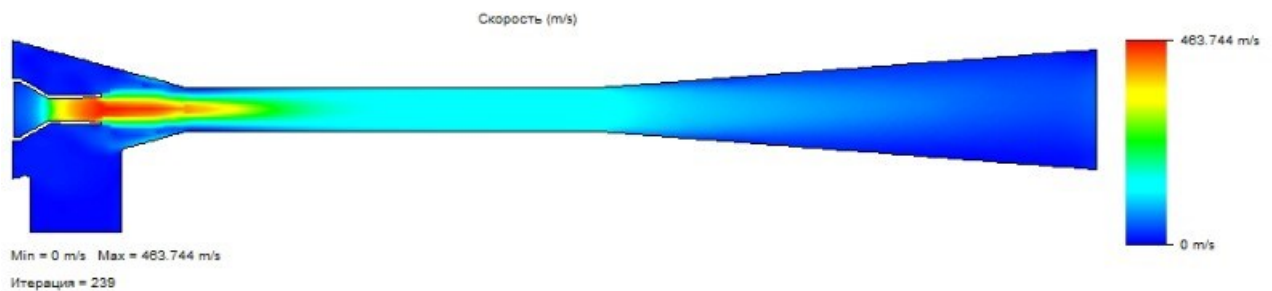


Рисунок 2.5 - Розподіл швидкостей у ежекторі, розрахованого на протитиск 1,35 бар



а)



б)

Рисунок 2.6 – Зміна швидкості повітря в частинах ежектору а - протитиск 1,013 бар, б - протитиск 1,71 бар.

Як видно з результатів моделювання, на початку роботи ежектору у КЗ потік має чіткий факел робочого повітря та на виході з КЗ спостерігається замикаючий потік. Це зумовлено великою швидкістю повітря у КЗ та низьким протитиском. У

кінцевому випадку (1,71 бар) великий протитиск та низька швидкість у КЗ, витрата повітря, що підсмоктується, майже нульова.

Таблиця 2.6 – Порівняння значень витрати за ежектором, отриманих при моделюванні та розрахунку (для ежектору на протитиск 1,45 бар), м³/год

Розрахункова витрата	%	Промодельована витрата
13681	17%	11414

В результаті аналізу результатів моделювання та розрахунку отримано, що похибка витрати за ежектором моделі та розрахунку дорівнює 17%. (табл. 2.6). Ця похибка достатньо велика. Таким чином для зменшення похибки треба удосконалювати внутрішню поверхню дифузору, змінити кут між камерою змішування та дифузором. На вході робочого сопла, змодельованого та розрахункового, похибка дорівнює 4% (табл. 2.7). Таке значення похибки показує, що сопло має форму близьку до ідеальної.

Таблиця 2.7 – Витрати з робочого сопла при моделювання та розрахунку при тиску перед соплом 4,5 бар, т/год

Розрахункова витрата	%	Промодельована витрата
10,21	4%	9,78

2.6. Врахування додаткового опору, що виникає при використанні фільтру пилу та установки очищення вологи на вході в ежектор

Відповідно до Програми випробувань [29,74] є вимоги до якості повітря, яке подається до ГО. А саме:

- домішок масла не більше 0,002 г/м³.
- домішок пилу не більше 0,01 г/м³.
- вологість (відносна вологість) не більше 40%.

Для забезпечення цих умов на виході компресору встановлюються фільтр пилу

та відокремлювач вологи. Аналогічні пристрої треба установити на потік повітря, що інжектується в ежектор. Фільтр масла не потрібен, оскільки масла нема у навколишньому повітрі.

Зупинимося на описанні пристроїв очищення, що використовуються в компресорі ЦК-135/8 [76].

Компресор обладнаний наступним чином. Атмосферне повітря всмоктується через повітряний фільтр, встановлений на всмоктуванні і стискається послідовно у всіх колесах компресора. Після другого і четвертого колеса повітря надходить в проміжні охолоджувачі, де він охолоджується водою системи охолодження. Після шостого колеса повітря надходить на охолодження в кінцевий охолоджувач газу, і далі через вологовідокремлювач, де з нього видаляється крапельна волога, повітря під тиском нагнітання надходить в збірники повітря. Далі повітря з температурою $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ подається в теплообмінник, де охолоджується до температури $+20\div 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Від зважених часток води і масла повітря очищується в вологовідокремлювачі. За необхідності очищене повітря надходить в автоматичний блок осушки повітря. Після осушки повітря проходить через фільтр пилу і надходить в збірник повітря, з якого повітря подається до споживачів.

Повітряний фільтр компресора призначений для очищення повітря від твердих частинок і домішок, що можуть викликати ерозійний і корозійний знос елементів ротора. Кількість твердих частинок в повітрі після фільтра не більше 5 мг/м^3 . Вологовідокремлювач уловлює крапельну вологу, що виноситься з кінцевого повітроохолоджувача. Відділення вологи проводиться методом відцентрової сепарації. Відцентрова сила притискає краплі вологи до стінок корпусу, звідки волога стікає на дно вологовідокремлювача, а потім відводиться через дренаж. Осушене повітря направляється до споживача.

Автоматичний блок осушки повітря використовує адсорбцію водяної пари силікагелем, який після насичення регенерується продуванням його гарячим повітрям.

Аналіз розмірів цього обладнання показав, що воно може бути розміщено поряд ежектора, який в свою чергу має розміщуватися на повітропроводі безпосередньо

перед ГО.

Треба відмітити, що при установці фільтрів безпосередньо перед входом в ежектор, тиск повітря зменшиться, парціальний тиск водяної пари збільшиться і надлишок можна буде видалити у вологовідокремлювачі. Після цих пристроїв перед ежектором для компенсації втрати тиску пропонується поставити газодувку. При такому рішенні перераховувати ежектор на менший тиск повітря, що інжектується, не потрібно.

Було проведено розрахунок часу нагнітання повітря до ГО при встановленні фільтрів на потік повітря, що підсмоктується до ежектора. За характеристиками, наведеними в паспортах пилового фільтру та вологовідокремлювача, було визначено, що аеродинамічний опір кожного обладнання дорівнює 0,1 бар. Тобто загальний додатковий опір фільтрів, що встановлені перед ежектором, дорівнює 0,2 бар. Згідно з проведеними розрахунками було встановлено, що наявність додаткового опору на виході ежектора сильно впливає на коефіцієнт інжекції. Додатковий опір на потоці повітря, що підсмоктується, впливає не так сильно. За результатами розрахунку можна зробити висновок, що додатковий опір обладнання по очищенню повітря, що встановлено на потоці повітря, що підсмоктується, збільшує час нагнітання на 5 %.

2.7. Висновок до розділу 2

1. Запропоновано для зменшення часу нагнітання повітря при проведенні випробування герметичності гермооболонки реакторного відділення АЕС використовувати ежектор, який за рахунок робочого повітря зі штатного компресору буде підсмоктувати повітря з навколишнього середовища і збільшувати таким чином витрату повітря в гермооболонку.
2. Проведено розрахунок часу нагнітання повітря для сьогоденних умов на Рівненській АЕС, результат якого співпав з дійсним часом нагнітання повітря при проведенні випробувань (4,5 години). При розрахунку використовувалася характеристика компресору, а саме залежність витрати від тиску перед компресором.
3. Розроблено програму розрахунку повітряного ежектору для роботи зі штатним

компресором марки ЦК-135/8, вихідними даними для якого є початковий та кінцевий тиск повітря, витрата робочого повітря.

4. Розроблено математичну модель роботи ежектору заданої конструкції при роботі у перемінному режимі. Тобто визначено залежність витрати повітря за ежектором в залежності від зміни тиску за ним.
5. За допомогою розроблених матмоделей були проведені розрахунки відносно часу роботи ежектора в парі з компресором для досягнення заданого тиску за ежектором (у ГО) 1,72 бар. В результаті проведених розрахунків для визначення часу нагнітання в залежності від проектного тиску за ежектором визначено, що мінімальний час нагнітання дорівнює 3,09 години, що на 1,48 години (32,4 %) менше, ніж при наявних умовах. Оптимальним тиском за ежектором для його проектування є тиск 1,45 бар.
6. Проведено розрахунок часу нагнітання при встановлені на потоці повітря, що підсмоктується, обладнання для очищення потоку від пилу та вологи. Визначено, що врахування додаткового опору 0,2 бар збільшує час нагнітання на 5 %.
7. Зменшення часу проведення випробувань герметичності ГО дасть можливість підвищити виробіток електроенергії та заробити АЕС додатковий прибуток, який приблизно складе $1,48 \text{ год} \cdot 0,9 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot 0,6 \text{ грн./кВт год} = 799 \text{ тис. грн/рік}$.
8. При інших умовах можна передбачити, що зменшення часу нагнітання завдяки використанню ежектору складе біля 30 % від наявного часу.

РОЗДІЛ 3

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ВИТОКУ

3.1. Розробка методики проведення вимірів

Складність «абсолютного» методу та велика його тривалість приводять до пропозицій відносно спрощення або підвищення часу між випробуваннями [78]. Автори, враховуючи важливість забезпечення безпеки роботи АЕС та той факт, що з часом якість обладнання не покращується, вважають доцільним не підвищувати час між випробуваннями, а удосконалювати методи та засоби, які використовуються для підтвердження функціональності цієї дуже важливої системи безпеки.

В роботі для визначення інтегрального витоку (ІВ), як критерію герметичності СГО, пропонується компенсаційний метод визначення витоку (КМВВ) [66,67]. Останній дозволяє визначати ІВ прямим вимірюванням (на відміну від «абсолютного» методу) значно швидше і точніше. Далі наводиться схема та принцип використання КМВВ [79]. Треба зазначити, що до верифікації нового методу мають використовуватися два методи одночасно. Це викликає необхідність продовження часу стабілізації параметрів для методу «абсолютного тиску», що може бути компенсовано удосконаленням технічних засобів проведення випробувань не тільки при загальних випробуваннях СГО, а й при виявленні можливих місць локальних витоків.

За цим методом вимірюється витрата потоку повітря, яке витікає з контрольної ємності, а потім визначається ІВ з СГО за виразом:

$$L_{ГО} = L_{КЕ} \frac{V_{ГО}}{V_{КЕ}}, \quad (3.1)$$

де $L_{ГО}$, $L_{КЕ}$ – витік повітря з СГО та контрольної ємності відповідно;

$V_{ГО}$, $V_{КЕ}$ – об'єм СГО та контрольної ємності.

За компенсаційним методом інтегральний витік визначається урівноваженням

маси повітря, що втрачається з СГО через витік, та маси повітря, що нагнітається зовні. Ця рівновага відслідковується за зміною величини витоку із КЄ. У випадку, якщо витік з КЄ дорівнює нулю, то вважається, що витік та нагнітання середовища з та у СГО однакові. Значення витоку визначається показаннями витратоміра, який встановлюється на лінії подачі компенсаційного повітря до СГО. Задана похибка вимірювань досягається проведенням необхідної кількості вимірів та при необхідності використання декількох КЄ.

Зупинимося більш детально на цьому методі. Ідея методу полягає в тому, що з витоком середовища з СГО (навіть в дуже малих кількостях) обов'язково без затримки в часі відбувається відповідне зниження тиску в СГО [67]. Отже, коли водночас з витоком середовища з СГО забезпечити й подачу середовища до нього в наближеній кількості до очікуваного витоку, то можна очікувати компенсацію витоку в ті моменти часу, коли витік і подача середовища в СГО будуть однакові. Тобто, зниження тиску і його зростання при вимірюванні тиску будуть скомпенсовані, а тиск в СГО в момент заміру буде без змін. Підкреслимо, що це справедливим може бути тільки для відносно коротких інтервалів часу, коли процеси теплообміну в СГО не «встигають» за змінами тиску при «витоку-подачі» середовища в СГО.

Залишається проблемною реєстрація вкрай малих змін тиску в СГО протягом малих інтервалів часу. Тут виявляється слушним, що при зрівнянні дії «витоку-подачі» змін тиску в СГО немає! Отже, треба при малих змінах тиску в СГО визначати моменти відсутності перепаду тиску в певних локальних об'ємах СГО, а не вимірювати надто малі величини змін тиску. Виходячи з цього, як вказано у [71], на ЗАЕС був розроблений цей новий метод визначення ІВ з використанням нового приладу СІ-1 (індикатор відсутності перетікання середовища між локальними об'ємами СГО), більш детальна схема якого приведена на рис.3.1 [79].

За приведеною схемою пряме визначення ІВ із СГО (як компенсація витоку) проводиться ротаметром поз.5 в момент часу, коли відсутній перетік (в ту чи іншу сторону) повітря із СГО 1 в контрольну ємність 3 (чи зворотно) по лінії 2-11-18-6-2-7-19-15-13-3, що візуально визначається індикатором 2. Цей момент часу може визначатися при малому нагнітанні повітря в СГО. Площа діаграми під кривою зміни

в часі подачі повітря для визначення ІВ із СГО може служити основою для визначення загальної кількості повітря, яке було введено в СГО при пробній подачі.

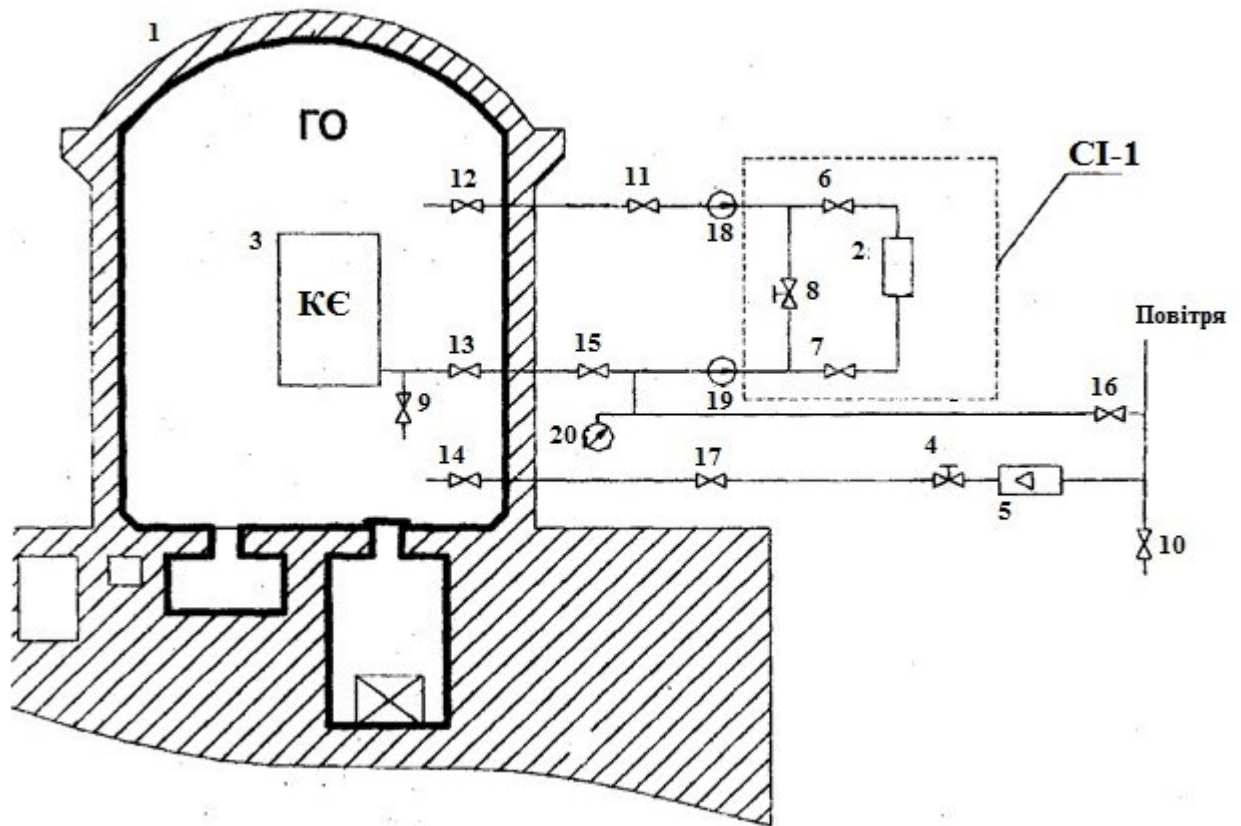


Рисунок 3.1 - Принципова схема визначення ІВ за компенсаційним методом приладом СІ-1:

1 – гермооб’єм (СГО); 2 – індикатор перетікання; 3 - контрольна ємність (КЄ); 4 – вентиль регулювання; 5 - ротаметр; 6,7,8,9,10,11,12,13, 14, 15, 16, 17 - вентилі; 18,19 - штуцери на індикаторі; 20 - манометр (6 кг/см²)

Зазначимо, що при подачі повітря в СГО порушується стабільність параметрів повітря в СГО за «абсолютним методом». Тобто пробна подача повітря в СГО по лінії 5÷14 на рис. 3.1 (навіть у відносно малий інтервал часу) для визначення ІВ із СГО порушує стабілізований стан параметрів повітря в СГО. Коли потрібні одночасні випробування СГО двома методами, необхідна буде додаткова стабілізація параметрів повітря в СГО (а це певна затримка в часі випробувань), або ж необхідна відповідна реконструкція технічних засобів, що потрібно передбачати на наступному етапі розробки цього методу.

Вимірювання здійснюються наступним чином. Відчиняється вентиль 4 і через трубопровід з компресору до СГО подається повітря. За допомогою манометра 20 здійснюється контроль тиску в СГО. Через індикатор 2 потоку, повітря заповнює і контрольну ємність (КЄ) 3. Водночас вторинний прилад індикатору демонструє наявність потоку газу з СГО 1 до КЄ 3. При досягненні випробуваного тиску вентиль 4 зачиняється, проводиться витримка, в процесі якої відбувається вирівнювання тиску між СГО і КЄ 3, що фіксується стабільними показаннями індикатора потоку 2.

При відсутності витоку з замкнутого об'єму 1 прилад 2 фіксуватиме відсутність перетікання повітря між СГО і КЄ. Якщо після вирівнювання тиску індикатор 2 потоку буде демонструвати перетікання з КЄ до СГО, це буде свідчити про наявність витоку з СГО. Для його вимірювання відкривається вентиль 4 і повітря подається в СГО через витратомір 5, який фіксує витрату повітря, що подається. З початком подачі повітря перепад тисків між СГО і КЄ і перетікання газу з КЄ 3 до СГО 1 почнуть зменшуватися. За допомогою вентиля 4 витрату газу, що подається, регулюють таким чином, щоб індикатор 2 потоку показав спочатку відсутність перетікання, а потім наявність зворотного перетікання з СГО до КЄ. Потім витрату зменшують так, щоб індикатор 2 потоку знову показав відсутність перетікання, а потім появу зворотного напрямку з контрольної ємності 5 в герметичну оболонку 1. За величину витоку приймають витрату повітря, що подається в СГО в періоди рівності тиску в СГО та контрольній ємності 3.

Чим менша величина витоку, тим більше часу потрібно на її вимір. Тиск в СГО змінюється повільно. Тоді буде повільний виток повітря з КЄ.

Кількість повітря, що подається, щоб скоротити час визначення реального витоку, має корелюватися з попередніми вимірами.

Визначимо кількість повітря, що має подаватися до СГО в процесі вимірювань. Для цього треба оцінити досягнутий рівень ІВ на блоці протягом останнього випробування. Так, наприклад, на 6-му блоці ЗАЕС інтегральний виток при передпускових випробуваннях склав 0,07 %. Це означає, що ІВ при періодичних випробуваннях має бути $L_k < 1,15$ $L_{кр} < 1,15$ $0,0007 \cdot 60000 < 48,3$ м³/доба = 2,01 м³/год = 33,5 л/хв. Враховуючи, що

$$\frac{IV_{KE}}{IV_{GO}} = \frac{V_{KE}}{V_{GO}}, \quad (3.2)$$

при об'ємі $V_{KE} = 1 \text{ м}^3$ та $V_{GO} = 60000 \text{ м}^3$ отримаємо, що при цих даних витік з КЄ має бути:

$$\begin{aligned} IV_{KE} &= 2,01 \cdot 1/60000 = 3,35 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{год} = 0,0335 \text{ л/год} = \\ &= 33,5 \text{ мл год} = 0,56 \text{ мл/хв}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

Це дуже мала витрата для ідентифікації витоку. При $V_{KE} = 2 \text{ м}^3$ IV_{KE} буде дорівнювати 1 мл/хв.

Таким чином, при збільшенні об'єму КЄ швидкість виходу повітря з КЄ підвищується, що свідчить про те, що для кращої ідентифікації малих течій об'єм КЄ треба підвищувати. За попередньою оцінкою було прийнято, що об'єм КЄ доцільно прийняти 5 м^3 . КЄ - це додаткове обладнання, яке має вноситися та виноситися з ГО при необхідності. Найпростішим засобом для цього є використання герметичного шлюзу. Тобто габаритні розміри КЄ мають бути такими, щоб його можна було занести в ГО через шлюз.

Було розглянуто вимірювання витоку безпосередньо на виході з КЄ. Для цього може бути використаний індикатор 2. У якості індикатора пропонується використання прозорої (скляної) трубки внутрішнім діаметром 2,5-2,8 мм, довжиною 500-600 мм з нанесеною шкалою (рис. 3.2). В центрі цієї трубки є дозатор, за допомогою якого в трубку подається крапля рідини (спирту). Переміщення краплі фіксується за шкалою та часом. Це надає можливість вимірювати маленьку витрату з великою точністю. Перерахувавши отримане значення на об'єм ГО за (3.1), отримаємо IV .

Розглянемо процес вимірювання на прикладі даних 6-го енергоблока ЗАЕС. При об'ємі КЄ 5 м^3 витрата з КЄ при прийнятому IV дорівнює $0,56 \times 5 = 2,8 \text{ мл/хв} = 46,6 \text{ мм}^3/\text{с}$. Об'єм трубки до мітки 100 мм і діаметром 2,5 мм дорівнює $3,14/4 \times 2,52 \times 100 = 490,6 \text{ мм}^3$. Таким чином крапля досягне мітки 10 см за

$$490,6/46,6=10,5 \text{ с.}$$

Це ї є час одного заміру. При необхідності зробити 10 вимірів для досягнення необхідної точності загальний час вимірювання складе біля двох хвилин.

Враховуючи реальне значення інтегрального витоку на кожному блоці можна підбирати діаметр і довжину трубки для отримання зручного часу одного вимірювання.

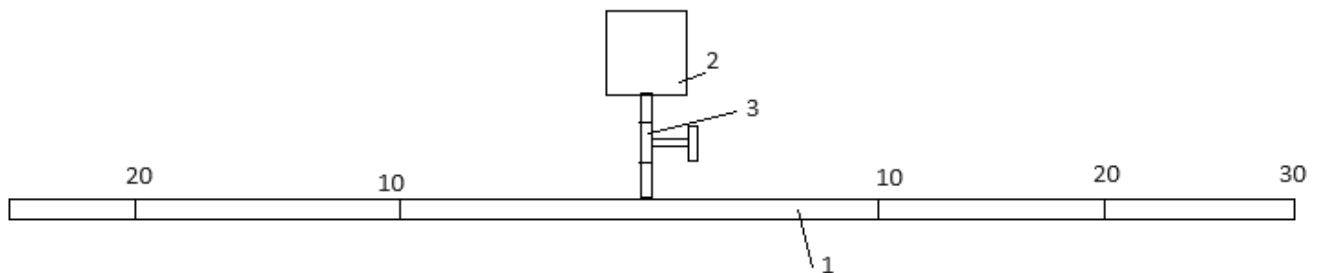


Рисунок 3.2 – Принципова схема індикатора для вимірювання інтегрального витоку

1 – прозора трубка зі шкалою, 2 – ємність з рідиною, 3 – вентиль для подачі рідини

З розглянутого методу вимірювання можна зробити висновок, що безпосереднє вимірювання витоку з КЄ значно простіше ніж вимірювання витрати повітря, яке треба подати до ГО, щоб компенсувати виток, що вимірюється.

3.2. Методика обробки вимірів

Для визначення значення витоку необхідно провести обробку результатів замірів за відповідною методикою [80,81]:

- 1) Проводиться n замірів інтегрального витоку (ІВ) x_i ;
- 2) Середнє значення (математичне оцінювання):

$$x_{\text{сеп}} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}; \quad (3.4)$$

- 3) Середнє квадратичне відхилення:

$$\delta_x = \sum \frac{x_i - x_{\text{сеп}}}{n}; \quad (3.5)$$

Часто замість δ_x використовують поняття дисперсії:

$D_x = \delta_x^2$ – середній квадрат відхилення випадкової величини від середнього значення.

- 4) Вірогідність задається у значенні 95%, тобто ймовірність отримання результату в заданому інтервалі.
- 5) Середня квадратична похибка середнього:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{сер})^2}{n - 1}}; \quad (3.6)$$

$$S_{n_{сер}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}}; \quad (3.7)$$

- 6) Кінцевий результат має бути представлений у вигляді:

$$x = x_{сер} \pm \Delta x; \quad (3.8)$$

Тобто інтегральний витік (ІВ) буде дорівнювати:

$$IB = IB_{сер} \pm \Delta IB; \quad (3.9)$$

$IB_{сер}$ – середнє значення замірів;

ΔIB – середньоквадратична похибка.

Похибка визначається наступним чином:

$$\Delta x = t_{p,f=n-1} \cdot S_{x_{сер}}; \quad (3.10)$$

де $t_{p,f} = n - 1$ – коефіцієнт Стюдента, визначається за таблицею, де $t_p = f(k, \alpha)$, де

k – кількість степенів волі $k = n - 1$;

α – вірогідність, $\alpha = 0,95$.

При кількості вимірів $n = 10, k = 9, \alpha = 0,95$ коефіцієнт Стюдента дорівнює табличному значенню $t_p = 2,26$ [81].

З підвищенням кількості вимірів t_p зменшується, таким чином похибка зменшується. Представляється, що для зменшення часу достатньо проведення 10 вимірів. Визначити інтегральний витік можливо, якщо Δx близька до точності приладу, яка визначається:

$$\Delta x^1 = \sqrt{\Delta x^2 + \left(\frac{K_p}{3} \cdot \delta\right)^2}, \quad (3.11)$$

де $K_p - t_p, \omega$ при $K = 1000, t_p = 1,96$;

δ – величина похибки приладу, % абс.

Підвищення кількості вимірювань знижує випадкові помилки. На систематичні помилки це не впливає.

Вимірювання проводяться витратоміром з точністю $\pm 3\%$.

3.3. Висновки до розділу

Описано принципову схему та розроблено методику проведення випробувань за компенсаційним методом, який дозволяє отримати результат через безпосереднє вимірювання витоку з контрольної ємності, а не непрямим методом, як за абсолютним методом, та за менший час.

За попередніми оцінками вимірювання витоку з КЄ може бути здійснено за 2 хвилини. Інтегральний виток визначається за визначеним витоком з КЄ та врахуванням відношення об'єму ГО та контрольної ємності.

Описана методика обробки результатів вимірів для отримання точності результату 95 %.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ

Вочевидь за рахунок збільшення продуктивності компресорного обладнання можна скоротити час етапу підвищення тиску, але не зрозуміло як це вплине на етап стабілізації параметрів. Тому, для детального розуміння механізму процесів що відбуваються в герметичному огороженні (ГО) та визначення певних залежностей необхідно розробити математичну модель процесів у середовищі ГО за умов випробувань.

Ціллю даного розділу є розробка математичної моделі процесів, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність, з метою визначення факторів, які впливають на тривалість випробувань, а саме на процес стабілізації параметрів [82,83].

4.1 Процеси, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність.

Насамперед визначимо, що вологість повітря в ГО не досягає 100% за весь час випробувань. Тобто, нема потреби розглядати процес утворення туману. Це пояснюється умовами до якості повітря, що нагнітається, а саме до вологості та вмісту пилу. Для цього на всмоктуванні компресору встановлено фільтр для очищення від пилу, а на виході - засіб для осушення повітря. Треба відмітити, що компресор має внутрішнє охолодження, що суттєво знижує теоретичну температуру повітря, яка б мала бути при стисненні повітря до визначеного тиску.

Для зручності розглянемо одразу етап нагнітання повітря в ГО (на інших етапах відбуватимуться фактично ті ж самі процеси). Так, повітря в ГО потрапляє від компресорної станції, де стискається до відповідного тиску, а потім охолоджується і осушується. Зауважимо, що охолоджене повітря має декілька вищу температуру, ніж температура у ГО. У зв'язку з цим, при нагнітанні повітря в ГО відбувається розігрів середовища не тільки за рахунок збільшення тиску. Збільшення різниці температур між атмосферою і поверхнями обладнання ГО спричиняє інтенсифікацію процесу

теплообміну між повітрям і конструкціями контейнменту. В свою чергу теплота, отримана поверхнею обладнання, розповсюджується у внутрішні шари матеріалу (пасивного «поглинача» тепла).

Кількість теплоти, що підводиться стисненим повітрям до атмосфери ГО, є практично сталою величиною, так як витрата і параметри середовища після компресора впродовж нагнітання змінюються на незначний відсоток (менше 1%) [75]. При цьому кількість теплоти, що поглинається обладнанням в ГО навпаки – є змінною величиною, яка залежить від різниці температур між повітрям і поверхнею її «поглиначів» тепла. Зокрема, на цю залежність мають вплив такі фактори як режим циркуляції повітря (природньої) вздовж поверхні «поглиначів» та теплофізичні властивості матеріалу «поглиначів». Відзначимо, що саме процес поглинання тепла обладнанням ГО має вирішальне значення на етапі стабілізації параметрів після вимкнення компресора.

Крім вище зазначеного, необхідно взяти до уваги наявність басейну витримки. Так, відкрита поверхня води, за умов відключеної системи вентиляції і кондиціювання, може впливати на стан атмосфери ГО, зокрема на вологість повітря.

Математичний опис процесу, що відбувається в ГО, проводиться при наступних припущеннях:

- всі процеси термодинамічно рівноважні;
- процес розглядається в нуль вимірному наближенні, тобто змінами характеристик пароповітряної суміші в просторі нехтуємо;
- всі пасивні поглиначі тепла на початку процесу рівномірно прогріті і мають однакову з повітрям температуру;
- пасивні поглиначі тепла одновимірні, тобто розповсюдження тепла відбувається тільки вглиб шарів матеріалу;
- пасивні поглиначі тепла умовно розділені на два типи:
- герметичне огороження, що складається з пофарбованого шару металевих облицювання (8 мм) та бетону,
- внутрішні будівельні конструкції складаються з пофарбованого бетону.

Розглянемо процеси, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність використовуючи 1) енергетичний баланс, 2) матеріальний баланс, 3) нестационарну теплопровідність.

1. Швидкість зміни маси ($M_{ГО}$) пароповітряної суміші в ГО опишемо наступним рівнянням:

$$\frac{dM_{ГО}}{dt} = G_{Г.вх} - G_{П.вих} + G_{П.вх} + G_{П.БВ} - G_{П.вих} - G_{П.конд}, \quad (4.1)$$

де $G_{Г.вх}$ – витрата повітря, що надходить в ГО;

$G_{П.вих}$ – витрата повітря, що виходить з ГО;

$G_{П.вх}$ – витрата пари, що надходить в ГО;

$G_{П.вих}$ – витрата пари, що виходить з ГО;

$G_{П.БВ}$ – витрата пари що утворюється на поверхні басейну витримки (БВ);

$G_{П.конд}$ – витрата пари, що конденсується на стінках та обладнанні ГО.

2. Швидкість зміни кількості енергії ($Q_{ГО}$) пароповітряної суміші в ГО описується наступним співвідношенням:

$$\frac{dQ_{ГО}}{dt} = Q_{П.вх} + Q_{Г.вх} + Q_{П.БВ} - Q_{П.вих} - Q_{Г.вих} - Q_{П.к} - Q_{Т.О.}, \quad (4.2)$$

де $Q_{П.вх} = G_{П.вх} \cdot i_{П.вх}$ – енергія, що надходить від компресора в ГО за одиницю часу з парою;

$Q_{Г.вх} = G_{Г.вх} \cdot i_{Г.вх}$ – енергія, що надходить від компресора в ГО за одиницю часу з повітрям;

$Q_{П.БВ} = G_{П.БВ} \cdot i_{П.БВ}$ – енергія, що надходить в ГО за одиницю часу з парою, яка утворилась на поверхні БВ;

$Q_{П.вих} = G_{П.вих} \cdot i_{П.вих}$ – енергія, що забирається з ГО за одиницю часу парою, яка виходить через нещільність;

$Q_{Г.вих} = G_{Г.вих} \cdot i_{Г.вих}$ – енергія, що забирається з ГО за одиницю часу повітрям, яке виходить через нещільність;

$Q_{п,к}$ – енергія, що забирається з ГО за одиницю часу парою, яка конденсується на стінах та обладнанні;

$Q_{т,о}$ – енергія, що забирається/підводиться з ГО за одиницю часу за рахунок теплообміну середовища зі стінами та обладнанням ГО, тобто витрачається пароповітряною сумішшю на нагрів стін та обладнання ГО;

i – ентальпія пари/повітря відповідно до параметрів.

3. Зміна температури (T) в часі (τ) за шарами (x) матеріалу пасивних поглиначів теплоти при нестационарній теплопровідності описується одновимірним рівнянням [84,85]:

$$\frac{dT}{dx} = a \frac{\delta^2 T}{dx^2}, \quad (4.3)$$

де $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

c – теплоємність;

ρ – густина

При розв'язанні диференційного рівняння використано наступні граничні умови (умови однозначності) [84,85]:

- для поверхонь, що контактують з атмосферою ГО – третього роду, де коефіцієнт тепловіддачі ($\alpha_{т.в.}$) розраховувався за умов природньої циркуляції повітря вздовж плоскої поверхні;
- для глибинного (не поверхневого) шару ГО – першого роду;

Вибір граничної умови для ГО потребує певних пояснень. На перший погляд контейнмент з зовнішньої сторони мав би контактувати з навколишнім середовищем, але це не стосується усієї конструкції. До того ж, більша частина контейнменту з зовнішньої сторони знаходиться в додатковій будівлі реакторного відділення, де в приміщеннях підтримується комфортна для роботи персоналу температура. Крім того, в стінці та куполі захисної оболонки розміщені попередньо напружені сталеві троси, які проходять у спеціальних каналах [79, 86]. Зазначені канали беруть початок в допоміжній будівлі, і, відповідно, в середині них проходить повітря з

температурою середовища цієї допоміжної будівлі. Тобто, можна стверджувати, що в глибинному шарі захисної оболонки підтримується майже не змінна температура.

Зазначимо, що в якості пасивних поглиначів тепла розглядалися тільки будівельні конструкції. При цьому окремо розраховувались контейнмент і бетонні перегородки, які формують приміщення ГО. Впливом іншого обладнання ГО можна було знехтувати, так як майже все теплотехнічне обладнання обгорнуте теплоізоляцією з алюмінієвим облицюванням, яке споживає/віддає замало тепла у порівнянні з будівельними конструкціями.

Зв'язок між рівняннями (4.2) і (4.3) забезпечується величиною $Q_{т.а}$, яка визначається за допомогою рівняння Ньютона-Ріхмана [84]:

$$\frac{Q_{т.о.}}{F} = q = \alpha_{т.в.}(T_{г} - T_{ст}), \quad (4.4)$$

де q – щільність теплового потоку на поверхні теплообміну;

F – площа поверхні теплообміну;

T_i – температура пароповітряної суміші;

$T_{ст}$ – температура поверхні поглинача тепла, розраховується рівнянням (4.3).

Слід зауважити, що рівняння (4.4) наведене у загальному вигляді. Тобто, для кожного пасивного поглинача тепла величина $Q_{т.о.}$ розраховується окремо, а в рівнянні (2) використовується їх сума.

Останнім чинником, який враховується в моделі є випаровування пари з басейну витримки. Виділення вологи ($G_{п.бв}$) з поверхні води згідно методики Danterm [87] враховують за рівнянням:

$$G_{п.бв} = e \cdot S(P_{нас} - P_{вст}), \quad (4.5)$$

де $P_{нас}$ – тиск водяних парів насиченого повітря при заданій температурі води в басейні;

$P_{вст}$ – парціальний тиск водяних парів при заданих вологості і температурі;

S – площа поверхні води в басейні;

e – емпіричний коефіцієнт, залежить від стану поверхні води (спокій, хвилі тощо).

Зазначимо, що наведене вище рівняння (1) є загальним для пароповітряної

суміші. Тому, для проведення розрахунку воно було розділено на два окремих рівняння – для пари і повітря (згідно виразу $\frac{dM_{Г0}}{dt} = \frac{dM_{Г}}{dt} = \frac{dM_{П}}{dt}$). В подальшому з (4.1) та (4.2) було отримано систему рівнянь відносно трьох параметрів:

T_I – температури пароповітряної суміші (температура пари дорівнює температурі повітря);

P_I – парціального тиску газової складової повітря;

$P_{П}$ – парціального тиску пари.

В загальному вигляді система рівнянь відповідає наступному виразу

$$\begin{pmatrix} a_{1.1} & a_{2.1} & a_{3.1} \\ a_{1.2} & a_{2.2} & a_{3.2} \\ a_{1.3} & a_{2.3} & a_{3.3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dT_{Г}}{dt} \\ \frac{dP_{Г}}{dt} \\ \frac{dP_{П}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

де $a_{i,j}$ – коефіцієнти при відповідних невідомих;

b_i – вільні члени рівнянь.

Методи вирішення системи диференціальних рівнянь.

Рішення системи диференціальних рівнянь (5) методом Рунге-Кута-Фельберга [88] дозволило уникнути осциляцій, оскільки у метод закладено автоматичний вибір кроку. Попередньо задається максимальне значення кроку, яке при автоматичному виборі не перевищується. У кожній точці аргументу (часу) робиться подвійний прорахунок значення функції, спочатку з повним кроком, потім із половиною кроку. Якщо отримані при цьому значення функції різняться в межах допустимої точності, то крок для наступної точки подвоюється (повернення до повного кроку). Зазначимо, що попередньо виконувалась обробка матриці методом Гауса [89].

Рівняння (3) вирішувалось за явною схемою рішення рівнянь другого порядку в часткових похідних методом кінцевих різниць [89,90].

Аналіз отриманих результатів і порівняння їх з експериментальними даними.

За експериментальні дані прийняті результати вимірів основних параметрів газового середовища ГО енергоблока РАЕС в процесі проведення випробування на

герметичність ГО від 24.01.2022. Судячи з наведених даних, перші півтори години випробувань виконувалось прогрівання, опробування і налаштування обладнання компресорної станції, тому в якості початкових значень для розрахунку вибрано параметри середовища, які відповідають значенням на цей момент часу (1.5 години від початку натурних випробувань). Зазначимо, що крім дій у перші півтори години невизначеною також є температура повітря від компресора на вході в ГО. Але, ці та інші невизначеності були усунуті шляхом підбору вхідних даних та налаштування моделі.

В результаті розрахунку отримано динаміку зміни тиску (рис. 4.1) і температури (рис. 4.2) пароповітряної суміші в ГО. Як видно з наведених даних, розрахункові і експериментальні параметри мають не значні відмінності, що дозволяє стверджувати про коректність розробленої моделі.

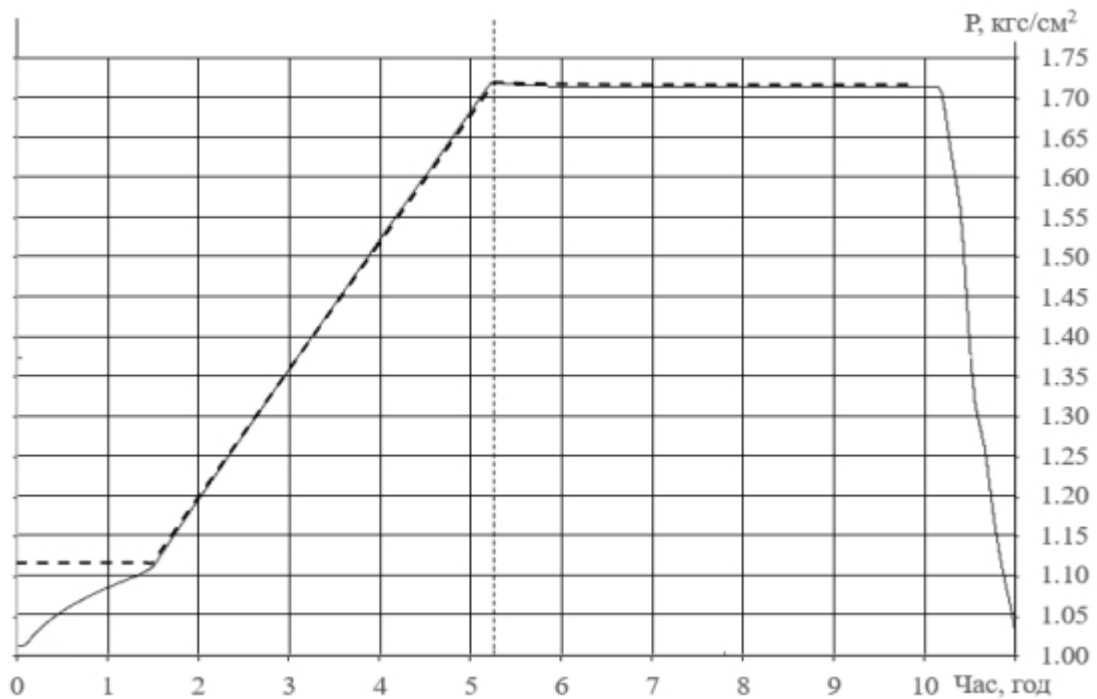


Рисунок 4.1 – Динаміка зміни тиску пароповітряної суміші в ГО
протягом випробувань на герметичність
—— натурні випробування, ----- моделювання

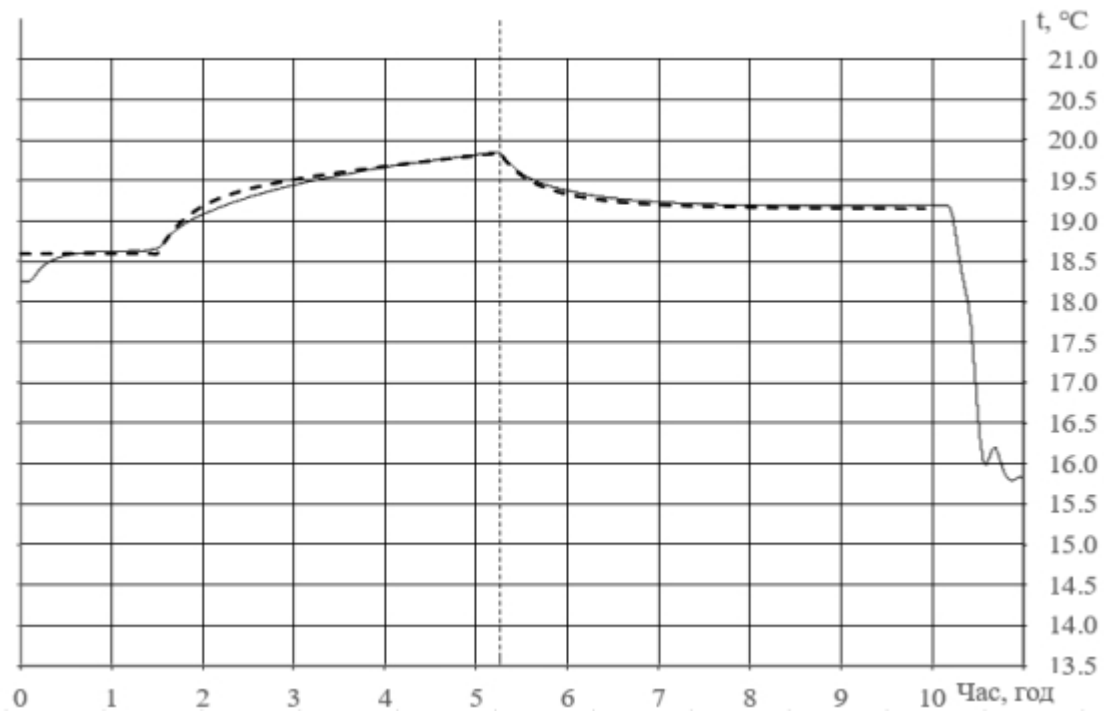


Рисунок 4.2 – Динаміка зміни температури пароповітряної суміші в ГО протягом випробувань на герметичність

— натурні випробування, - - - - - моделювання

Крім зазначених показників найважливішим є показник швидкості зміни температури (рис. 4.3), так як саме цей параметр слугує критерієм стабілізації. Так, при досягненні швидкості зміни температури значень від $-0,02$ до $0,02$ °C/год починає проводитися вимір інтегрального витоку. Відповідно, чим швидше відбувається досягнення зазначеного діапазону, тим менше часу витрачається на випробування в цілому. Досягнути повного відтворення моделлю зазначеного показника не вдалось у зв'язку з тим, що в моделі не враховуються зміни характеристик пароповітряної суміші в просторі (процес розглядається в нуль вимірному наближенні), а також є певні невизначеності початкового стану (температурного поля в матеріалі) поглиначів тепла. Загалом, це стосується тільки етапу нагнітання повітря до контрольного тиску. В процесі стабілізації параметрів швидкість зміни температури близька до натурних даних.

Вочевидь одним із шляхів скорочення терміну проведення випробувань є регулювання температури повітря на вході в ГО. За можливості її регулювання треба

забезпечити, щоб температура повітря від компресора дорівнювала температурі середовища в ГО (температурі обладнання). Це надає можливість пришвидшити досягання критерію стабілізації.

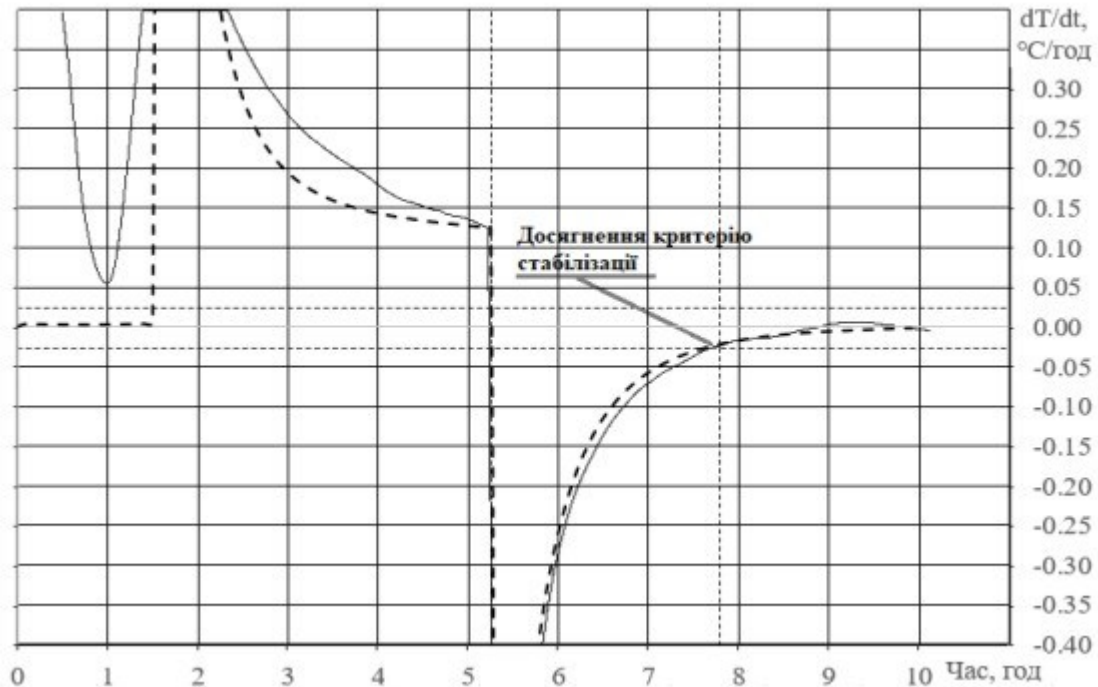


Рисунок 4.3 – Швидкість зміни температури пароповітряної суміші в ГО

— натурні випробування, ----- моделювання

На рис. 4.4 наведено результати розрахунку зміни температури в ГО при умові перевищення температури повітря, що нагнітається, над температурою в ГО на 0,5 °C, на 1 °C та на 2 °C. З аналізу наведених даних можна зробити висновок, що критерій стабілізації при $\Delta t = 0,5$ °C досягається за 0,5 години, при $\Delta t = 1$ °C термін етапу стабілізації дорівнює 1 годину, при $\Delta t = 2$ °C — 1,5 год. В той час, коли за результатами випробувань стабілізація настала через 2,6 години. Тобто, регулювання температури повітря на виході компресору може дати в даному випадку скорочення часу випробувань на 2,1 години.

Цей захід можна реалізувати шляхом домішування більш прохолодного повітря до основного потоку, наприклад встановив ежектор в напірному повітропроводі. Тоді до потоку буде додаватися деякий об'єм повітря, що сприятиме більш швидкому досягненню контрольного тиску в ГО, за яким настає етап стабілізації параметрів.

Зауважимо, що збільшення вологості потоку на вході в ГО не має значного впливу на перебіг процесу в цілому, але додає питання щодо «випадіння» вологи в частині повітропроводу за ділянкою, де домішується холодне повітря. Крім цього, необхідно вирішити питання чистоти повітря, яке додається. Обидві задачі можуть бути вирішені інженерними заходами.

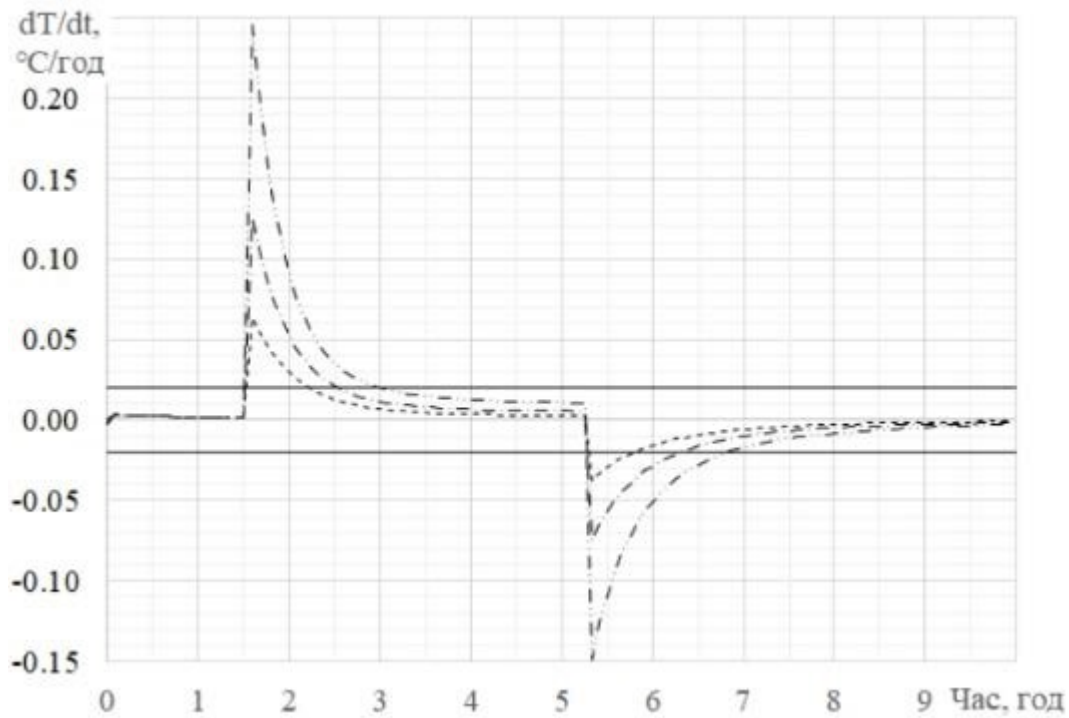


Рисунок 4.4 – Швидкість зміни температури пароповітряної суміші в ГО за умов зменшення різниці температур (Δt) між обладнанням ГО і повітрям, що нагнітається

— - межа критерію досягнення стабілізації;
 --- $\Delta t = 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; - · - $\Delta t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; - · · - $\Delta t = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.2 Висновки до розділу 4

Розроблено математичну модель процесів, що відбуваються в ГО під час випробувань на щільність та підтверджена її коректність. Дана модель дозволяє проводити перевірку ефективності заходів щодо скорочення часу випробувань.

Розрахунково показано, що ефективним методом скорочення етапу стабілізації параметрів подача в СГО повітря з температурою, наближеною до температури в

СГО. Це досягається регулюванням температури повітря, яке нагнітається компресором в СГО через регулювання витрати охолоджуючої води через повітроохолоджувач.

РОЗДІЛ 5

ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЧАСУ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ СГО НА ГЕРМЕТИЧНІСТЬ

Що ж є головними причинами великої втрати часу при випробуваннях герметичності СГО та елементів СЛА на АЕС? Окрім зміни параметрів повітря в СГО це й різні температури приміщень та обладнання в СГО, не завершені процеси теплообміну переважно в повітрі і в середовищах СГО в різні періоди року як поза, так і в середині. Це й різний ступінь охолодження обладнання при попередніх до випробувань роботах, це й наявність проливів води, це й відкриті об'єми великих ємностей та інше. Різна температура охолоджуючої води, яка подається на вузли охолодження компресору нагнітання і різна температура навколишнього середовища також дають різні варіації температур повітря, яке подається в СГО. Треба відмітити, що повітря для нагнітання береться з приміщення, яке обігрівається взимку, але враховуючи великий об'єм необхідного для нагнітання повітря, треба констатувати вплив температури навколишнього середовища на температуру повітря на вході в компресор.

Аналіз наведених етапів проведення випробування на герметичність та їх часу показує, що найбільший інтервал часу приходить на етапи нагнітання повітря, стабілізації та саме вимірювань.

Першим етапом випробувань є вакуумування. Метою цього етапу є виявлення місць великої нещільності за допомогою в основному акустичного методу та усунення виявлених дефектів. В сьогоденному стані нещільності при вакуумуванні не виявляються через якісний ремонт при попередніх випробуваннях. Тому фахівці АЕС, відповідні за проведення випробувань, пропонують при відсутності необхідності відмовитися від цього етапу [91]. Потреба в проведенні вакуумування може бути визначена при нагнітанні повітря. Якщо графік набирання тиску в СГО відповідає графіку минулих випробувань при нагнітання у щільне СГО, це означає етап вакуумування непотрібний. Якщо час досягнення відповідного тиску має запізнення відносно еталонного графіку, це означає, що нагнітання треба зупинити

та провести вакуумування для усунення нещільності.

Після перевірки щільності вакуумуванням починається етап нагнітання повітря до досягнення надлишкового тиску $0,72 \text{ кгс/см}^2$. Для скорочення цього процесу було запропоновано використання ежектору [75]. За проведеним аналізом визначено, що використання ежектору для підвищення витрати повітря до СГО підсмоктуванням навколишнього повітря дає можливість знизити час нагнітання на приблизно 30 %. Мінімальний час нагнітання, враховуючи обмеження за швидкістю підвищення тиску [74], дорівнює $0,72/0,4=1,8$ год.

Слід зауважити, що в деяких випадках є проблеми і зі скиданням тиску після випробувань. Максимальна швидкість скидання тиску згідно [74] дорівнює $1,0 \text{ (кгс/см}^2\text{)/год}$. Тобто мінімальний час етапу скидання тиску в СГО дорівнює $0,72/1 = 0,72$ год. Це практично в два рази швидше, ніж показує практика випробувань. Таким чином тільки при удосконаленні процесів нагнітання та скиду тиску можна зекономити $(8-1,8+1,5-0,72)=6,95$ години, тобто $6,96/26*100=26,7$ % наявного часу.

Вимірювання параметрів виконують після завершення етапу стабілізації параметрів. Умовою досягнення критерію стабілізації параметрів, а саме температури повітря в різних місцях СГО, є зміна середньої температури в СГО не більш $0,025$ $^{\circ}\text{C/год}$. Уявляється, що період стабілізації може бути суттєво скорочений через подачу повітря від компресора з температурою, близькою до температури середовища у ГО. Це може бути досягнуто через регулювання витрати охолоджуючої води через повітроохолоджувач.

За результатами досліджень, проведених на Рівненській АЕС [91] отримано, що величина інтегрального витоку, розрахованого за результатами вимірів протягом стабілізації параметрів, є більшою, ніж значення ІВ, яке отримано в результаті обробки даних, отриманих після завершення етапу стабілізації. Це означає, що якщо значення ІВ, розраховане відразу після закінчення нагнітання, задовольняє критерію завершення випробувань, можна закінчувати випробування, тому що отримане значення є консервативним та перебільшує значення ІВ, яке буде отримане після стабілізації параметрів. На цій основі можна об'єднати етапи стабілізації та

вимірювання.

Використання компенсаційного методу дозволяє принципово відмовитися від етапу стабілізації параметрів та зменшити час вимірювання з восьми годин до максимум 10 хвилин (0,17 години).

Провівши аналіз наведених пропозицій, а саме:

- відказ від етапу вакуумування при відсутності необхідності;
- використання ежектору для підвищення витрати повітря, що нагнітається;
- скорочення часу стабілізації параметрів через регулювання температури повітря, що нагнітається (чи повністю відмовитися від етапу стабілізації при використанні компенсаційного методу вимірювання);
- використання компенсаційного методу для визначення інтегрального витоку,

можна зробити висновок, що загальний час випробувань в перспективі може скласти:

- вакуумування	0 год.;
- нагнітання	$8 \cdot 0,7 = 5,6$ год.;
- стабілізація параметрів	0 год.;
- вимірювання	0,17 год.;
- скидання тиску	0,72 год.
Загалом:	6,5 год.

Таким чином при зменшенні часу нагнітання, стабілізації та випробувань загальний час випробувань може бути скорочений на 23 год., тобто на $(29,5 - 6,5) / 29,5 \times 100 = 78\%$. Треба відміти, що при повному переході від «абсолютного» методу до компенсаційного можна буде повністю відмовитися від етапу стабілізації, тому що тиск в СГО стабілізується практично одночасно. Витримка потрібна для стабілізації температури, що при безпосередньому вимірюванні інтегрального витоку не має значення.

Зменшення часу проведення випробувань герметичності СГО дасть можливість підвищити виробіток електроенергії та заробити АЕС додатковий прибуток, який приблизно при додатковій роботі енергоблоку протягом 19,78 год. складе:

$$23 \cdot \text{год.} \cdot 10^6 \text{ кВт} = 23 \text{ млн. кВт} \cdot \text{год.}$$

Це відповідає додатковому заробітку атомної станції

$$23 \cdot \text{год.} \cdot 10^6 \cdot 0,7 \text{ грн./}(\text{кВт} \cdot \text{год}) = 16,1 \text{ млн. грн/рік.}$$

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та отримані автором результати вирішення актуальної науково-практичної задачі підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності АЕС України за рахунок зменшення часу випробувань на герметичність системи герметичного огороження, що є останнім бар'єром безпеки на шляху виходу радіоактивних продуктів ділення ядерного пального в навколишнє середовище при аварії.

У представлений до захисту дисертаційній роботі отримано такі наукові та практичні результати:

1. Проведено аналіз методу проведення випробувань на герметичність, що наразі використовується на АЕС України. Це «абсолютний» метод, який має такі недоліки, як велика тривалість та те, що визначення інтегрального витоку здійснюється через розрахунок за рівнянням ідеального газу, тобто непрямим способом. Випробування герметичності системи герметичного огороження потребують більше доби часу, що негативно впливає на техніко-економічні показники АЕС. Випробування на герметичність проводяться у п'ять етапів. Найбільший час займають етапи нагнітання повітря, стабілізації параметрів та саме вимірювання. Зменшенню тривалості цих етапів і присвячується ця робота.
2. Вперше запропоновано для зменшення часу етапу нагнітання повітря використовувати ежектор. Розроблено математичну модель газоструминного ежектору, що дозволило визначити оптимальну конструкцію, за допомогою якої час нагнітання повітря до гермооболонки до тиску 0,172 МПа (абс.) може бути знижено на 30 %.
3. Проведено аналіз компенсаційного метода визначення ІВ. При цьому методі ІВ визначається безпосереднім вимірюванням та за менший час. За попередньою оцінкою час проведення вимірювань за компенсаційним методом має зайняти 10 хвилин. Розроблено методику проведення вимірювання та обробки результатів

вимірів для отримання похибки з вірогідністю 95 %.

4. Розроблено математичну модель середовища у системі герметичного огороження (СГО) для визначення факторів, зменшують час етапу стабілізації параметрів. Розроблено рекомендацію, щодо подавання до гермоогороження повітря з температурою, близькою до температури повітря в СГО. Це може бути досягнуто використанням ежектору для підмішування холодного газу, а також через регулювання витрати охолоджуючої води через повітроохолоджувач.
5. Проведено оцінку зменшення часу проведення випробувань на герметичність у перспективі через: відсутність етапу вакуумування (при відсутності наявності крупних нещільностей СГО); використання ежектору для зменшення часу нагнітання повітря; регулювання температури повітря, що подається, для зниження часу стабілізації; використання компенсаційного методу визначення інтегрального витоку. Отримано, що час випробувань може бути зменшений на 23 годин (на 78 %). Це дасть можливість енергоблоку виробити додатково 23000 МВт·год. електроенергії за рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Видання НТСЕУ «ЕНЕРГОІНФОРМ-ИНФОРМЕНЕРГО» № 592 Про основні показники роботи ПЕК України за 2020 рік. <https://www.ntseu.net.ua/docs/review592-202101.pdf>
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 березня 2017 року № 605-р.
3. Конференція ООН з питань клімату 2015.
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F_%D0%9E%D0%9E%D0%9D_%D0%B7_%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%8C_%D0%B%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B0%D1%82%D1%83_2015
4. МАГАТЕ випустило звіт «Ядерна енергія для безвуглецевого світу» напередодні саміту з питань клімату COP26. Режим доступу:
http://atomforum.org.ua/news/2021/magate_vipustilo_zvit_yaderna_energiya_dlya_bezvugleceвого_svitu_naperedodni_samitu_pitan_klimatu_cop26
5. Широков С.В. Ядерні енергетичні реактори. (рос.)– К., 1997. – 282 с.
6. Четверте покоління. Режим доступу: <https://habr.com/ru/articles/368653/>
7. Добудова енергоблоків №3 і №4 Хмельницької АЕС. Режим доступу:
<https://kiep.ua/uk/news/dobudova-energoblokiv-no3-i-no4-hmelnickoi-aes.html>
8. "Енергоатом" і Westinghouse Electric підписали меморандум про будівництво п'яти блоків АЕС в Україні на суму до \$30 млрд. Режим доступу:
<https://interfax.com.ua/news/economic/765133.html>
9. Меморандум з Westinghouse передбачає будівництво дев'яти атомних енергоблоків – Галущенко. Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3672742-memorandum-z-westinghouse-peredbae-budivnictvo-devati-atomnih-energoblokiv-galusenko.html>
10. Україна планує побудувати 20 ММР замість енергоблоків ТЕС - глава

Міненерго. Режим доступу: <https://interfax.com.ua/news/economic/898152.html>

11. Про затвердження Загальних положень безпеки атомних станцій. 2021. Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/RE14747?an=707>
12. КВВП в ОЕС України. Режим доступу: <https://uaea.com.ua/dysp/icuf.html>
13. Стерман Л. С., Шарков А.Т., Тевлін С.А. Теплові та атомні електростанції. – М., 1975. - 496 с.
14. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции. М., 1994. - 289 с.
15. Скалозубов, В. И. Методические аспекты ремонта по техническому состоянию оборудования АЭС Украины / В. И. Скалозубов, Ю. А. Комаров, Н. Н. Шендрик// Ядерна та радіаційна безпека. - 2014. - № 2 (62). - С. 32-36.
16. Тевлин С. А. Атомные электрические станции с реакторами ВВЭР-1000. М., 2008. – 358 с.
17. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС. С.П., 1994. – 384 с.
18. Nuclear containments: state-of-art report. — Stuttgart: Fédération internationale du béton, 2001. —117 p.
https://en.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9d%C3%A9ration_internationale_du_b%C3%A9ton
19. Верхівкер Г. П., Кравченко В. П. Основи розрахунку та конструювання ядерних енергетичних реакторів. – Одеса: ТЕС, 2008. – 409 с.
20. П. З. Луговой, В. Б. Крицкий, Н. И. Крицкая. Анализ динамического поведения и напряженнодеформированного состояния защитной оболочки реакторного отделения АЭС при нестационарных воздействиях. Ядерна та радіаційна безпека, № 3(71). 2016. С. 38-47.
21. №1.РЦ.1996.ИЭ-05. Инструкция по эксплуатации железобетонных ограждающих конструкций системы герметичного ограждения блока №1 ХАЭС
22. ПНАЭ Г-10-007-89. Норми проектування залізобетонних споруд локалізуючих систем безпеки атомних станцій.
23. ТУ У 33.2-19045985.007-2007. Система дистанційного контролю зусиль. Система дистанционного контроля усилий. СДКУ-1000. Технічні умови
24. ИН-Т.0.03.187-08. Типовая инструкция по техническому обслуживанию

систем напруги захисних оболонок АЭС с унифицированными энергоблоками ВВЭР-1000 с РУ типа В-320.

25. ММ-П.0.03.024-17. Методика ведомственной поверки. Система дистанционного контроля усилий СДКУ-1000. Измерительные каналы.
26. МТ-Т.0.03.337-14. Методика мониторинга усилий в армоканатах систем преднапряжения защитных оболочек по показаниям СДКУ-1000 на энергоблоках ВВЭР-1000 с реакторными установками типа В-320.
27. 1.ЦН.7177.ИЭ-19. Система ХА. Инструкция по эксплуатации системы дистанционного контроля усилий.
28. НП 306.2.145-2008. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском. Затверджено наказом Держатомрегулювання України від 15.04.2008 № 73.
29. Програма проведення періодичних випробувань системи герметичного огороження на герметичність. 123456.РО.ХА.ПМ.27-19. Запорізька АЕС. 2019. 140 с.
30. Локалізуючі системи безпеки блоку №1. Інструкція по експлуатації. №1.РЦ.0149.ИЭ-13. Хмельницька АЕС. 2013. 104 с.
31. Навчальний посібник загального призначення. Система герметичного огороження (ХА), "Експлуатація обладнання та технологічних систем реакторного відділення", 00.УЦ.РО.Пс.250
32. НП 306.2.218. Правила улаштування та безпечної експлуатації локалізуючих систем безпеки. Офіційний вісник України. 2018. №40. С. 187-199.
33. Програма «Випробування на герметичність. Система герметичного огороження. Локалізуюча система безпеки. Блок №2», 141-50/2-ПР-СНІО. Запорізька АЕС.
34. Інструкція з експлуатації. Локалізуючі системи безпеки блоку №1. №1.РЦ.0149.ИЭ-13. ХАЕС, 2013. 104 с.
35. Курзин М. Є., Якушев М.К. Пристрій для контролю герметичності виробів. Патент України 12590 А (UA) 28.02.1997, бюл. № 1.
36. Патент України на винахід 24619 А. Конюхов С.М., Волошин О.І.; Котелевець М.С.; Крюков Г.О. Спосіб контролю герметичності виробів. 30.10.1998, бюл. №

5.

37. UA 42390. Спосіб контролю герметичності виробів. Сергійчук Б.В., Волошин О.І., Потапов О.М., Кошкін М.І., Дорогорський В.А., Кочусов Ю.О., Чумак В.А., Пономаренко С.М.
38. UA44083. Спосіб контролю герметичності виробу. 25.09.2009, Бюл. № 18, 2009 р.
39. UA53718. 17.02.2003.Бюлл. №2 2003. UA56229C2. Спосіб контролю герметичності. 15.05.2003. Бюлл. №5. 2003.
40. UA66179A. Спосіб діагностування тріщин по об'єму їхнього розкриття на працюючому устаткуванні. 15.04.2004. Бюлл. №4.
41. UA73683U. 10.10.2012. Бюл. №19. Спосіб контролю герметичності виробів.
42. UA76961C2. 16.10.2006, Бюл. № 10, Спосіб контролювання цілісності компонентів та структур і пристрій для його здійснення.
43. UA78607CA. 10.04.2007, Бюл. № 4. Спосіб контролю герметичності виробу.
44. UA792660U. 11.05.2010, Бюл. № 9. Пристрій для контролю герметичності виробів і виміру величини витоку.
45. UA82125C2. CN 1544902, 10.11.2004. Спосіб визначення величини негерметичності виробів.
46. UA99103C2. 25.07.2012, Бюл.№ 14. Стенд для виміру величини витоку у виробках, призначених для роботи із двома напрямками витрати робочого середовища (арматури)
47. US010222289B2. Патент США Matsukawa et al. №: 10222289 B2. 5 марта 2015 г.
48. Oh Chsing-Book, Yu Byung-Ju, Park Jong-Soo, Kwon Hyuk-Hwan, Ham Myung-In, Heo Hyung-Seok WO2014171571 (A1) Differential Pressure-Type Leakage Examining Device and Leakage Examining Method. Published as: KR101489789 (B1)
49. Течешукач для перевірки герметичності об'єкта, що перевіряється. FR3072774 A1. 2019-04-26. G01M 3/02. Coulomb Julien.
50. Спосіб виявлення витоку з порожнистої частини та установка для реалізації такого методу. FR3068781 A1. 2019-01-11. G01M 3/02, G01M 3/20. Regef Jean Luc
51. Пристрій для виявлення витоку з використанням водню як індикаторного газу.

- FR2969287 A1. 2012-06-22. G01M 3/02. Alcatel Lucent, Patel Ketan
52. Пристрій для проведення випробувань принаймні однієї рідинної мережі літака.
FR2965052 A1. 2012-03-23. G01M 3/02. Airbus Operations. Mateo Stephane
 53. Метод випробування шляхом герметизації корпусу. FR2914418 A1. 2008-10-03.
G01M 3/02, G01N 3/00. Technip France. Soutif Etienne.
 54. Пристрій для виявлення витоків однієї з рідин через засоби їх розділення в резервуарі під тиском. FR2635870 A1. 1990-03-02. F15B 1/10, G01M 3/02. Durand Benoit.
 55. Метод випробування на герметичність та використання в басейнах АЕС.
FR2587486 A1. 1987-03-20. G01M 3/02, G21C 17/00. Acquier Bernard, Berhault Michel.
 56. Vacuum leak testing, №10,401,255, USA, G01M3/26
 57. Large volume test apparatuses and methods for detection of small defects,
№10,317,307, USA, G01M3/26
 58. Systems and methods for detecting and controlling leaks, № 10,317,306, USA,
G01M3/26
 59. System and method for determining leaks in a complex system, № 9.207.143. USA,
G01M3/26
 60. System and method for a benchmark pressure test. № 10,301,930, USA, G01M3/26
 61. System and method for a benchmark pressure test. № 10,161,243, USA, G01M3/26
 62. IAEA-EBP-WWER-05. Проблемы безопасности атомных электростанций с
реакторами ВВЭР-1000/320 и их категории. 1997. – 255 с.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/011/30011318.pdf?r=1&r=1
 63. Prandorfy M. "Local and Individual Test of Hermetic Compartments of VVER 440
NPPs conducted by VÚEZ Levice", Review of The Methods Used for Leak Rate
Measurements for VVER 440/230 Confinements and VVER 440/213 Containments,
IAEA Viena, May 1995.
 64. Baláž P. "Integrated Tests of VVER 440 Hermetic Zones ", Review of The Methods
Used for Leak Rate Measurements for VVER 440/230 Confinements and VVER

- 440/213 Containments, IAEA Viena, May 1995.
65. Baláz P., Csekey L., Hámornýíková J. "Study of Aspects Related to Ageing of VVER 440 NPP Safety Structures", Life Prediction and Management of Concrete Structures, Bratislava, Slovakia, July 1999.
 66. Кравченко В.П., Власов А.П., Власов Д.А., Поляшов С.В., Литвинов Б.А. Аналіз заходів та засобів вимірювання інтегрального витоку з захисної оболонки АЕС. Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-практичної конференція «Технічне регулювання, методологія, інформаційні та транспортні технології». Одеса, 14-15 листопада 2019. С. 56-63.
 67. А. с. 1603945 СССР, МПК G01M 3/26. Способ измерения интегральной утечки из замкнутого объема / Д.А. Хлесткин, А.П. Власов, А.Н. Царев – № 4406857/28; заявл. 08.02.1988; опубл. 20.05.1996.
 68. основополагающие стандарты в области метрологии. ГОСТ 8.207-76, М. 1986
 69. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 351 с.
 70. Kazachkov I.V. Modeling and Numerical Simulation of the Turbulent Two-Phase Jet Confined in the Cylindrical Channel. WSEAS TRANSACTIONS on HEAT and MASS TRANSFER. 2020. Vol. 15. P.151-162. DOI: 10.37394/232012.2020.15.1
 71. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию «Расчет эжектора» для студентов специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент» / Сост. Р.Г. Акмен, А.П. Желтоноженко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 20 с. Рус. яз.
 72. Буляндра, О. Ф. Технічна термодинаміка : підруч. для студентів енерг. спец. вищ. навч. закладів / О. Ф. Буляндра. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.
<https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/853>
 73. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкін А.Е. Парові та газові турбіни для електростанцій. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 526 с.
 74. Програма. Випробування на герметичність. Система герметичного огороження. Локалізуюча система безпеки. ОП Рівненська АЕС, 2016. 38 с.
 75. Кравченко В., Власов А., Андрющенко А., Власов Д., Головченко А., Гаврилов

- П. Зменшення часу нагнітання повітря при випробуваннях герметичності захисної оболонки АЕС через використання ежектору. Праці Одеського політехнічного університету. 2022. Вип. 1(65). С. 62-69.
76. Інструкція з експлуатації компресорної станції пневмовипробувань гермооб'єму. Система нормальної експлуатації. РАЕС, Блок 3,4. 121-31-Е-РЦ-2. 2021. 83 с.
 77. Ваняшов А. Д. Применение методов перерасчета газодинамических характеристик многоступенчатых и многосекционных турбокомпрессоров на другие условия работы в различных технологических установках. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-42-52
 78. Ю. А. Комаров, С. И. Косенко, В. И. Скалозубов, И. М. Фольтов. Методы оптимизации испытаний на герметичность системы гермооболочки реакторной установки в период ремонтных кампаний АЭС С ВВЭР-1000. Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. Вип. 9. 2008. С. 15-22
 79. Кравченко В.П. Власов А.П., Головченко А.М., Мазуренко А.С., Дубковський В.О., Чулкін О.О. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність /Ядерна та радіаційна безпека. 2(98)2023. С. 53-60.
 80. Теорія похибок і обробка результатів вимірювань у фізичній лабораторії (Дата посилання 17.03.2022)
<https://kzf.kpi.ua/wp-content/uploads/2021/09/TheorOfErrors.pdf>
 81. Б.А. Сусь, А.І. Лад. Фізичні вимірювання і обробка їх результатів. Навчальний посібник для самостійної роботи курсантів і студентів. – Київ: ВІТІ, 2017 (Дата посилання 15.02.2022) <https://www.viti.edu.ua/files/other/pohibki.pdf>
 82. А. М. Головченко , В. В. Запорожан , І. В. Запорожан , В. П. Кравченко. Моделювання процесів у герметичному огороженні реакторної установки з ВВЕР-1000 під час випробувань на герметичність /Ядерна енергетика та довкілля. № 3 (28) 2023. С. 3-9.
 83. Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Математичне моделювання випробувань на герметичність контейнеру з ВВЕР-1000. Збірник праць XII International scientific and practical conference «Scientific

Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. P. 291-293

84. Юшко С.В., Борщ О.Є., Токар Г.І. Нестационарна теплопровідність: навч. посіб. – Х. : НТУ «ХП». 2012. 112 с.
85. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1977, – 352 с.
86. Луговой П. З., Крицкий В. Б., Крицкая Н. И. Анализ динамического поведения и напряженно-деформированного состояния защитной оболочки реакторного отделения АЭС. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2016. № 3(71). С. 38-47. Doi: 10.32918/nrs.2016.3(71).08.
87. VDI 2089. Building services in swimming baths. Verein deutscher ingenieure. 2011.
88. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1989. – 304 с.
89. Киреев В.И. Численные методы в примерах и задачах: Учеб. Пособие / В.И. Киреев, А.В. Пантелеев. – 2-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 2006, – 480 с.; ил.
90. Тимейчук О.Ю. Математичні моделі та оптимізація тепломасообміну: Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2010. -50 с.
91. Ковтанюк П.І. Стан реалізації концептуального технічного рішення «О модификации метода испытаний ЛСБ-СГО на герметичность пониженным давлением для энергоблоков с РУ ВВЭР-1000» КТР-М.1234.03-227.14. Доповідь на зборах головних інженерів АЕС.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Кравченко В., Власов А., Андрющенко А., Власов Д., Головченко А., Гаврилов П. Зменшення часу нагнітання повітря при випробуваннях герметичності захисної оболонки АЕС через використання ежектору. Праці Одеського політехнічного університету. 2022. Вип. 1(65). С. 62-69.

<https://pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1660041533.pdf>

Журнал

реферується в зарубіжних базах даних «Україніка наукова», Ulrich's periodicals directory (США), Index Copernicus.

2. Кравченко В.П. Власов А.П., Головченко А.М., Мазуренко А.С., Дубковський В.О., Чулкін О.О. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність /Ядерна та радіаційна безпека. 2(98)2023. С. 53-60. Doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05) Журнал входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus

3. А. М. Головченко , В. В. Запорожан , І. В. Запорожан , В. П. Кравченко. Моделювання процесів у герметичному огороженні реакторної установки з ВВЕР-1000 під час випробувань на герметичність /Ядерна енергетика та довкілля. № 3 (28) 2023. С. 3-9. doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.1. Індексується в базах даних Index Copernicus, Google Scholar, INIS, ResearchBib.

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

– Кравченко В.П., Головченко А.М. Зменшення часу випробувань на герметичність захисної оболонки через використання ежектору / XVI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики», Нетішин, 16-18 листопада 2022 р.

– Доповідь на робочій зустрічі на Південноукраїнській АЕС про стан та перспективи зменшення часу випробувань на герметичність захисної оболонки АЕС з ВВЕР-1000. Южноукраїнськ. 17 квітня 2023 р.

– Кравченко В.П. Власов А.П., Головченко А.М., Мазуренко А.С., Дубковський В.О., Чулкін О.О. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність / V Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», Київ, 28-29 вересня 2023 р.

– Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Математичне моделювання випробувань на герметичність контейнменту з ВВЕР-1000. Збірник праць XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. P. 291-293.

[https://isu-conference.com/wp-](https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf)

[content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf](https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf)

ДОДАТОК Б. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Національного університету
«Одеська політехніка»
професор, д.т.н.
С.А. Нестеренко
05 березня 2024 року



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цей акт є підтвердженням того, що результати дисертаційного дослідження аспіранта Національного університету «Одеська політехніка» Андрія Михайловича Головченка, виконаного на тему «Удосконалення методики випробувань на герметичність системи герметичного огороження блоку АЕС з ВВЕР-100» впроваджені в навчальний процес кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка», а саме:

- в методичні матеріали наступних дисциплін «Ядерні енергетичні реактори. Частина 1», «Атомні електростанції», «Експлуатація АЕС», «Безпека та надійність АЕС, за результатами вказаної дисертації внесені доповнення в частині розгляду систем безпеки АЕС;

- при виконанні кваліфікаційних робіт:

- бакалавра на тему «Розробка методу контролю герметичності захисної оболонки реакторного відділення з реактором ВВЕР-1000» ст. гр. ТЯ-1604 Литвинов Б.А.,
- магістра на тему «Зменшення часу контролю герметичності захисної оболонки реакторного відділення енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000» ст. гр. ТЯ-1804 Новосколькоцев М.С.,
- магістра на тему «Удосконалення випробувань гермооболонки ВВЕР-1000 на герметичність» ст. гр. ПТЯ-192зм Черевань В.Ю.;

Заступник завідувача кафедри АЕС
доцент, к.т.н.

 Ю.І. Висоцький

ДОДАТОК В
РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ЛСБ СГО ЕНЕРГОБЛОКІВ ЗАЕС

Блок 1

Дата	Час початку	Час закінчення	Тривалість випробування	Значення витоку	№ акту (протоколу)	Дефекти	Примітки
1990	21-35 29.10.90	11-35 30.10.90	14 год.	$0,14 \pm 0,02$ при 0,76000 кгс/см ²	01.3Н.ХА.Ак.80 3 від 11.11.90	1. Теча через стик ущільнення у верхній частині внутрішніх дверей шлюзу основного. 2. Теча через пробку-заглушку шлюзу аварійного з боку гермозони. 3. Теча по штоку локалізуючої арматури US60S22.	Дефекти виявлені на етапі вакуумування. Усунені в ході випробувань.
1991	04-15 01.12.91	19-00 01.12.91	14 год. 45 хв.	$0,15 \pm 0,01$ при 0,70315 кгс/см ²	01.РО.ХА.Ак.9 81 від 05.12.91	—	—
1993	06-30 02.01.93	18-30 02.01.93	12 год.	$0,14 \pm 0,01$ при 0,71065 кгс/см ²	01.ЭТ.ХА.Ак.11 .65 від 06.07.93	—	—
1994	12-00 08.06.94	21-55 08.06.94	9 год. 55 хв.	$0,13 \pm 0,01$ при 71,945 кПа	01.ЭТ.ХА.Пр.58 7 від 08.06.94	Теча повітря по збросу TZ42S05.	Виявлено на етапі наддуву. Усунено методом ревізії і

							закриття арматури TZ42S05 в ході випробувань
1995	05-41 20.09.95	13-47 20.09.95	8 год. 6 хв.	$0,02 \pm 0,01$ при 0,71326 кгс/см ²	01.ЭТ.ХА.Пр.69 1 від 20.09.95	Теча повітря через ізолятор струмопроводу по проходці ВГУ № 88.	Виявлено на етапі наддуву. Усунуто під час випробувань.
1996	09-00 12.10.96	17-35 12.10.96	8 год. 35 хв.	$0,10 \pm 0,01$ при 0,69738 кгс/см ²	01.ЭТ.ХА.Пр.77 2 від 14.10.96	Негерметичність ізолюючої арматури TZ40S01,02,03	Виявлено на етапі наддуву. Усунуто під час випробув.
1997	13-24 30.11.97	21-44 30.11.97	8 год. 20 хв.	$0,08 \pm 0,01$ при 71,945 кПа	01.РО.ХА.Пр.8 90 від 01.12.97	—	—
1998	10-03 22.11.98	18-20 22.11.98	8 год. 17 хв.	$0,08 \pm 0,01$ при 71,824 кПа	01.РО.ХА.Пр.9 89 від 22.11.98	Теча повітря через гумову прокладку лівого верхнього стопора гермопроходки ПГКК № 179.	Виявлено на етапі наддуву. Усунуто під час випробувань.
2000	02-24 14.06.00	10-48 14.06.00	8 год. 24 хв.	$0,08 \pm 0,01$ при 72,324 кПа	01.РО.ХА.Пр.1 096 від 14.06.00	—	—
2001	10-43 04.07.01	19-42 04.07.01	8 год. 59хв.	$0,09 \pm 0,01$ при 70,716 кПа	01.РО.ХА.Пр.1 184 від 05.07.01	—	—

Дата	Час початку	Час закінчення	Тривалість випробування	Значення витоку	№ акту (протоколу)	Дефекти	Примітки
2002	22-38 25.06.02	08-38 26.06.02	10 год.	0,15±0,01 при 70,104 кПа	01.РО.ХА.10.1.Пр.13 07 від 26.06.02	—	—
2003	02-50 27.06.03	10-50 27.06.03	8 год.	0,14±0,01 при 71,277 кПа	01.РО.ХА.10.1.Пр.14 10 від 27.06.03	—	—
2004	01-05 05.06.04	09-05 05.06.04	8 год.	0,15±0,01 при 71,295 кПа	01.РО.ХА.10.1.Пр.15 11 від 07.06.04	—	—
2005	11-46 03.06.05	19-46 03.06.05	8 год.	0,12±0,01 при 69,735 кПа	01.РО.ХА.10.1.Пр.15 71 від 06.06.05	—	—
2006	16-10 13.06.06	00-10 14.06.06	8 год.	0,14±0,02 при 71,230 кПа	01.РО.ХА.10.1.Пр.15 92 від 14.06.06	—	—

Блок 2

[illegible]

1995	17-02 01.01.95	02-40 02.01.95	9 год., 38 хв.	$0,15 \pm 0,01$ при 0,68789 кгс/см ²	02.ЭТ.ХА.Пр.648 від 03.01.95	1. Теча повітря по ел. проходках зовнішніх дверей шлюзу основного. 2. Теча повітря по штоку приводу зовнішніх дверей шлюзу основного.	Виявлено на етапі вакуумування. Виявлено на етапі наддуву. Дефекти усунуто під час випробувань.
1996	13-55 17.05.96	22-21 17.05.96	8 год., 26 хв.	$0,16 \pm 0,02$ при 0,68859 кгс/см ²	02.ЭТ.ХА.Пр.745 від 21.05.96	1. Теча повітря по ел. проходках зовнішніх дверей шлюзу основного. 2. Теча повітря по проходці ВГУ № 110.	Виявлено на етапі вакуумування. Виявлено на етапі наддуву. Дефекти усунуто під час випробувань
1997	15-16 02.04.97	00-04 03.04.97	8 год., 48 хв.	$0,16 \pm 0,02$ при 72,278 кПа	02.РО.ХА.Пр.825 від 04.04.97	—	—
1998	02-30 08.06.98	07-32 09.09.98	3 міс., 1 д., 5 год., 2 хв.	$0,16 \pm 0,01$ при 72,130 кПа	02.РО.ХА.Пр.950 від 16.06.98	—	—

1999	09-51 10.08.99	15-03 11.08.99	29 год., 12 хв.	$0,15 \pm 0,02$ при 72,854 кПа	02.РО.ХА.Пр. 1043 від 13.08.99	—	—
2000	21-20 13.09.00	19-42 14.09.00	22 год., 22 хв.	$0,15 \pm 0,01$ при 71,618 кПа	02.РО.ХА.Пр.1114 від 15.09.00	—	—
2001	19-05 13.09.01	21-16 14.09.01	26 год., 11 хв.	$0,15 \pm 0,01$ при 72,619 кПа	02.РО.ХА.Пр.1220 від 18.09.01	—	—
2002	09-38 04.09.02	08-08 05.09.02	22 год., 30 хв.	$0,16 \pm 0,01$ при 72,471 кПа	02.РО.ХА.Пр.1335 від 05.09.02	—	—
2003	11-02 23.08.03	08-08 24.08.03	21 год., 6 хв.	$0,17 \pm 0,01$ при 69,136 кПа	02.РО.ХА.Пр.1429 від 26.08.03	—	—
2004	16-30 01.08.04	00-30 02.08.04	8 год.	$0,16 \pm 0,01$ при 70,600 кПа	02.РО.ХА.Пр.1530 від 03.08.04	—	—
2005	11-55 28.07.05	19-55 28.07.05	8 год.	$0,17 \pm 0,01$ при 73,902 кПа	02.РО.ХА.Пр.1574 від 29.07.05	—	—

Блок 3

Дата	Час початку	Час закінчення	Тривалість випробування	Значення витоку	№ акту (протоколу)	Дефекти	Примітки
1990	11-45 25.08.90	21-55 25.08.90	10 год., 10 хв.	$0,11 \pm 0,01$ при $0,74720$ кгс/см ²	03.ЗН.ХА.Ак.365А від 02.09.90	Не заглушено проходку телевізійного кабелю в кабельній шахті на відм. 41.0 м	Виявлено на етапі вакуумування. Усунуто під час випробувань.
1992	06-45 01.05.92	16-30 01.05.92	9 год., 45 хв.	$0,11 \pm 0,01$ при $0,70235$ кгс/см ²	03.РО.ХА.Ак.479 від 05.05.92	—	—
1993	05-33 26.04.93	13-00 26.04.93	7 год., 27 хв.	$0,11 \pm 0,01$ при $0,73349$ кгс/см ²	03.ЭР.ХА.Ак.594 від 28.04.93	—	—
1994	07-07 30.07.94	19-35 30.07.94	12 год., 38 хв.	$0,10 \pm 0,01$ при $0,70008$ кгс/см ²	03.ЭТ.ХА.Пр.598 від 02.08.94	1. Теча повітря по гумовому ущільненню люка транспортного. 2. Теча повітря по електричній проходці шлюзу основного.	Дефекти виявлено на етапі вакуумування. Усунуто під час випробувань.
1995	13-07 22.12.95	21-21 22.12.95	8 год., 14 хв.	$0,09 \pm 0,01$ при $0,69266$ кгс/см ²	03.ЭТ.ХА.Пр.689 від 25.12.95	—	—
1996	10-45 3.11.96	19-56 3.11.96	9 год., 11 хв.	$0,10 \pm 0,01$ при $73,055$ кПа	03.РО.ХА.Пр.776 від 05.11.96	—	—

1997	00-45 08.12.97	07-37 09.12.97	30 год., 52 хв.	0,09±0,01 при 72,061 кПа	03.РО.ХА.Пр.897 від 12.12.97	—	—
1998	10-55 31.12.98	18-10 01.01.99	31 год., 15 хв.	0,09±0,01 при 72,221 кПа	03.РО.ХА.Пр.997 від 01.01.99	—	—
1999	10-57 29.12.99	12-50 30.12.99	25 год., 53 хв.	0,09±0,01 при 71,148 кПа	03.РО.ХА.Пр.1066 від 30.12.99	—	—
2000	15-47 11.12.00	19-00 12.12.00	27 год., 13 хв.	0,10±0,01 при 70,655 кПа	03.РО.ХА.Пр.1133 від 13.12.00	—	—
2001	04-50 02.12.01	08-45 03.12.01	27 год., 55 хв.	0,10±0,01 при 71,765 кПа	03.РО.ХА.Пр.1244 від 06.12.01	—	—
2002	10-14 20.11.02	10-04 21.11.02	23 год, 50 хв.	0,09±0,01 при 69,809 кПа	03.РО.ХА.Пр.1355 від 22.11.02	—	—
2003	12-45 31.10.03	09-43 01.11.03	20 год., 58 хв.	0,09±0,01 при 71,320 кПа	03.РО.ХА.Пр.1460 від 03.11.03	—	—
2004	03-08 11.11.04	11-08 11.11.04	8 год.	0,10±0,01 при 70,530 кПа	03.РО.ХА.Пр.1544 від 11.11.04	—	—
2005	15-09 19.11.05	23-09 19.11.05	8 год.	0,10±0,01 при 71,000 кПа	03.РО.ХА.Пр.1579 від 21.11.05	—	—

Блок 4

Дата	Час початку	Час закінчення	Тривалість випробування	Значення витоку	№ акту (протоколу)	Дефекти	Примітки
1990	20-15 17.11.90	11-45 18.11.90	15 год., 30 хв.	$0,10 \pm 0,01$ при 0,78320 кгс/см ²	04.РЦ.ХА.Ак.261 від 23.11.90	Не заглушено проходку телевізійного кабелю в кабельній шахті на відм. 41.0 м	Виявлено на етапі вакуумування. Усунуто під час випробувань.
1991	06-00 24.08.91	16-00 24.08.91	10 год.	$0,08 \pm 0,04$ при 0,75062 кгс/см ²	04.РО.ХА.Ак.425 від 27.08.91	—	—
1992	14-40 11.09.92	00-00 12.09.92	9 год., 20 хв.	$0,10 \pm 0,01$ при 69,752 кПа	04.РО.ХА.Ак.522 від 15.09.92	—	—
1993	18-15 05.09.93	02-15 06.09.93	8 год.	$0,08 \pm 0,01$ при 72,358 кПа	04.ЭТ.ХА.Ак.654 від 08.09.93	1. Теча повітря по гумовому ущільненню люка транспортного. 2. Теча повітря по електричній проходці шлюзу основного.	Дефекти виявлено на етапі вакуумування. Усунуто під час випробувань.
1994	16-00 26.09.94	01-45 27.09.94	9 год., 45 хв.	$0,09 \pm 0,01$ при 0,71410 кгс/см ²	04.ЭТ.ХА.Пр.610 від 29.09.94	—	—

1995	12-12 27.10.95	20-30 27.10.95	8 год., 18 хв.	$0,08 \pm 0,01$ при 0,69738 кгс/см ²	04.ЭТ.ХА.Пр.702 від 30.10.95	—	—
1996	19-05 20.10.96	03-30 21.10.96	8 год., 25 хв.	$0,05 \pm 0,01$ при 0,71309 кгс/см ²	04.РО.ХА.Пр.774 від 21.10.96	—	—
1997	09-50 06.09.97	18-35 06.09.97	8 год., 45 хв.	$0,07 \pm 0,01$ при 70,809 кПа	04.РО.ХА.Пр.862 від 08.09.97	—	—
1998	09-30 23.08.98	18-30 23.08.98	9 год.	$0,07 \pm 0,01$ при 72,128 кПа	04.РО.ХА.Пр.967 від 25.08.98	—	—
1999	05-29 26.12.99	15-00 26.12.99	9 год., 31 хв.	$0,07 \pm 0,01$ при 71,01 кПа	04.РО.ХА.Пр.1063 від 27.12.99	—	—
2000	10-52 10.01.01	18-55 10.01.01	8 год., 3 хв.	$0,09 \pm 0,01$ при 71,49 кПа	04.РО.ХА.Пр.1137 від 11.01.01	—	—
2001	09-53 17.02.02	17-53 17.02.02	8 год.	$0,09 \pm 0,01$ при 70,736 кПа	04.РО.ХА.10.1.Пр.1268 від 18.02.02	—	—
2002	20-30 01.02.03	00-00 02.02.03	3 год. 30 хв.	$0,08 \pm 0,01$ при 71,138 кПа	04.РО.ХА.10.1.Пр.1370 від 03.02.03	—	—
2003	16-16 02.02.04	00-16 03.02.04	8 год.	$0,11 \pm 0,01$ при 71,18 кПа	04.РО.ХА.10.1.Пр.1482 від 03.02.04	—	—

2004	02-22 14.02.05	10-22 14.02.05	8 год.	0,10±0,01 при 70,245 кПа	04.РО.ХА.10.1.Пр.1554 від 14.02.05	—	—
2005	17-43 11.02.06	01-43 12.02.06	8 год.	0,10±0,01 при 71,714 кПа	04.РО.ХА.10.1.Пр.1585 від 13.02.06	—	—

Блок 5

Дата	Час початку	Час закінчення	Тривалість випробування	Значення витоку	№ акту (протоколу)	Дефекти	Примітки
1988	11-00 19.10.88	18-00 19.10.88	7 год.	0,10±0,10 при 0,70550 кгс/см ²	05.РЦ.ХА.ХГО. 83 від 11.12.90	—	—
1990	15-20 07.12.90	01-20 08.12.90	10 год.	0,07±0,01 при 0,76307 кгс/см ²	05.ЗН.ХА.Ак.063 від 11.12.90	Теча по дренажному болту конденсатозбірника імпульсної лінії TQ30P05R1	Виявлено на етапі наддуву. Усунуто під час випробувань.
1991	21-28 26.12.91	07-30 27.12.91	10 год., 2 хв.	0,09±0,01 при 0,70481 кгс/см ²	05.РО.ХА.Ак.159 від 29.12.91	—	—
1992	17-48 06.11.92	04-30 07.11.92	10 год., 42 хв.	0,07±0,01 при	05.РО.ХА.Ак.260 від 10.11.92	—	—

				0,69886 кгс/см ²			
1993	17-55 04.07.93	02-35 05.07.93	8 год., 40 хв.	0,07±0,01 при 0,70470 кгс/см ²	05.ЭТ.ХА.Ак.375 від 07.07.93	—	—
1994	8-31 14.10.94	16-48 14.10.94	8 год., 17 хв.	0,07±0,01 при 0,69361 кгс/см ²	05.ЭТ.ХА.Пр.615 від 15.10.94	Теча повітря по штоку приводу зовнішніх дверей шлюзу основного.	Виявлено на етапі вакуумування. Усунуто під час випробувань.
1995	17-02 20.09.95	01-57 21.09.95	8 год., 55 хв.	0,08±0,01 при 0,69238 кгс/см ²	05.РО.ХА.Пр.690 від 21.09.95	—	—
1996	19-00 15.07.96	04-22 16.07.96	9 год., 22 хв.	0,07±0,01 при 0,68262 кгс/см ²	05.РО.ХА.Пр.757 від 16.07.96	—	—
1997	12-10 15.06.97	20-15 15.06.97	8 год., 5 хв.	0,08±0,01 при 69,594 кПа	05.РО.ХА.Пр.842 від 15.06.97	—	—
1998	12-10 27.07.98	20-30 27.07.98	8 год., 20 хв.	0,08±0,01 при 72,89 кПа	05.РО.ХА.Пр.959 від 28.07.98	—	—

1999	03-07 17.09.99	12-40 17.09.99	9 год., 33 хв.	0,08±0,01 при 71,63 кПа	05.РО.ХА.Пр.1050 від 20.09.99	—	—
2000	08-05 22.09.00	16-05 22.09.00	8 год.	0,08±0,01 при 70,246 кПа	05.РО.ХА.Пр.1116 від 25.09.00	—	—
2001	10-22 11.10.01	19-00 11.10.01	8 год., 38 хв.	0,07±0,01 при 71,338 кПа	05.РО.ХА.10.1.Пр.1225 від 12.10.01	—	—
2002	05-44 01.10.02	13-44 01.10.02	8 год.	0,06±0,01 при 73,608 кПа	05.РО.ХА.10.1.Пр.1341 від 02.10.02	—	—
2003	01-10 26.09.03	09-10 26.09.03	8 год.	0,06±0,01 при 72,569 кПа	05.РО.ХА.10.1.Пр.1445 від 26.09.03	—	—
2004	06-47 13.09.04	14-47 13.09.04	8 год.	0,09±0,02 при 73,401 кПа	05.РО.ХА.10.1.Пр.1539 від 14.09.04	—	—
2005	11-42 22.09.05	19-42 22.09.05	8 год.	0,09±0,02 при 73,401 кПа	05.РО.ХА.10.1.Пр.1577 від 26.09.05	—	—

Блок 6

Дата	Час початку	Час закінчення	Тривалість випробування	Значення витоку	№ акту (протоколу)	Дефекти	Примітки
1994	10-28 17.03.94	06-51 18.03.94	20 год., 23 хв.	0,07±0,01 при 70,805 кПа	06.ЭТ.ХА.Пр.570 від 01.04.94	—	—
1995	14-05 12.09.95	23-18 12.09.95	9 год., 15 хв.	0,07±0,01 при 0,6925 кгс/см ²	06.ЭТ.ХА.1.18. ФП від 14.09.95	—	—
1996	Технічний огляд перенесено на грудень 96 і проведено з 25.12.96 по 26.02.97						
1997	21-24 22.02.97	05-33 23.02.97	8 год., 9 хв.	0,07±0,01 при 71,272 кПа	06.РО.ХА.Пр.810 від 24.02.97	—	—
1998	12-10 09.03.98	20-15 09.03.98	8 год., 5 хв.	0,06±0,01 при 73,163 кПа	06.РО.ХА.Пр.918 від 10.03.98	—	—
1999	12-33 24.04.99	20-40 24.04.99	8 год., 7 хв.	0,07±0,01 при 70,585 кПа	06.РО.ХА.Пр.1022 від 26.04.99	—	—
2000	11-05 30.05.00	19-32 30.05.00	8 год., 27 хв.	0,06±0,01 при 70,585 кПа	06.РО.ХА.Пр. 1094 від 31.05.00	—	—
2001	21-30 26.06.01	06-32 27.06.01	9 год., 3 хв.	0,07±0,01 при 71,185 кПа	06.РО.ХА.Пр.1181 від 27.06.01	—	—

2002	11-35 26.04.02	19-35 26.04.02	8 год.	$0,06 \pm 0,01$ при 70,655 кПа	06.РО.ХА.10.1.Пр.1292 від 29.04.02	—	—
2003	00-13 29.04.03	08-13 29.04.03	8 год.	$0,06 \pm 0,01$ при 71,534 кПа	06.РО.ХА.10.1.Пр.1391 від 29.04.03	—	—
2004	14-41 23.03.04	22-41 23.03.04	8 год.	$0,07 \pm 0,01$ при 71,491 кПа	06.РО.ХА.10.1.Пр.1496 від 23.03.04	—	—
2005	21-45 09.04.05	05-45 10.04.05	8 год.	$0,07 \pm 0,01$ при 69,637 кПа	06.РО.ХА.10.1.Пр.1562 від 11.04.05	—	—
2006	03-00 02.05.06	11-00 02.05.06	8 год.	$0,07 \pm 0,01$ при 71,589 кПа	06.РО.ХА.10.1.Пр.1589 від 03.05.06	—	—

* В таблицях указана дата (рік) проведення контрольних вимірів параметрів парогазової середовища для розрахунку інтегрального витоку при випробуваннях ЛСБ-СГО на герметичність $P_H=0,7 \text{ кгс/см}^2$.

ДОДАТОК Г

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ЕЖЕКТОРУ ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ КІНЦЕВОГО ТИСКУ В ГО

Кінцевий тиск 1,35 бар

Робоче повітря

k = 1,40

Pr, МПа

0,68

tr, °C

20,00

Gr, т/ч

10,21

tr, нм³/ч

8000

Gr, кг/с

2,84

Вихідні дані:

Інжектуюме повітря

R, 287,00 Дж/(кг·К)

Pн, МПа

0,1

th, °C

20

Прийнято за рекомендаціями

Швидкість повітря в трубопров. w, 30 м/с

Коефіцієнт швидкості активного сопла j1

0,950

Коефіцієнт швидкості камери змішення (КЗ) j2

0,975

Коефіцієнт швидкості дифузора j3

0,900

Коефіцієнт швидкості вхідної ділянки КЗ j4

0,925

Кут між утворюючою входу в КЗ та віссю апарату, b

45,00

Задано:

u = 1,20

lсз = 0,68

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ $\lambda_{сз}$

0,68

 p_c/p_n

1,352

 $(p_c/p_n)_{пр}$

1,644

Тиск на виході pc =

0,13523

МПа

Ентальпія середі на виході hc =

294

Дж/кг

Діаметр входного. сеч. раб. сопла

dp =

120,25

мм

Діам. мін. перерізу робочого сопла

dp* =

46,74

мм

Діаметр вих. пер. робочого сопла d_{p2} =

58,96

мм

Діаметр циліндричної КЗ d₃ =

168,36

мм

Діаметр вихідного пер. дифузора dc =

405,81

мм

Діаметр патрубка пасивной середі dn =

348,53

мм

Відстань роб. сопла від входу. в КЗ lc =

296,84

мм

Довжина цил. камери змішення l_к^{MIN} =

1010,16

мм

Довжина цил. камери змішення l_к^{MAX} =

1683,59

мм

Длина диффузора ld^{MIN} =

1424,70

мм

Длина диффузора ld^{MAX} =

1662,15

мм

Розрахункова витрата повітря на виході ежектору при абс.

тиску 1,35 бар складає **17601** нм³/год

Кінцевий тиск 1,706 бар

Вихідні дані:

Робоче повітря	Ежектуюче повітря		
$k =$	1,40	$k =$	1,40
$R, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	287,00	$R, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	287,00
$P_p, \text{МПа}$	0,68	$P_n, \text{МПа}$	0,1
$t_p, ^\circ\text{C}$	20,00	$t_n, ^\circ\text{C}$	20,00
$G_p, \text{т/год}$	10,21		
$V_t, \text{м}^3/\text{год}$	8000	Швидкість повітря в трубопров. $w, \text{м/с}$	30
$G_p, \text{кг/с}$	2,84		

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУПри $u = 0,55$

IC3	p_c/p_n	$(p_c/p_n)_{пр2}$
0,75	1,706	1,930

Тиск середи на виході $p_c = 0,17062 \text{ МПа}$ Ентальпія середи на виході $h_c = 294 \text{ Дж/кг}$ Діаметр вхідного. перер. роб. сопла $d_p = 120,25 \text{ мм}$ Діаметр мін. перер. робочого сопла $d_p^* = 46,74 \text{ мм}$ Діаметр вих. пер. робочого сопла $d_{p2} = 58,96 \text{ мм}$ Діаметр циліндричної КС $d_3 = 122,96 \text{ мм}$ Діаметр вихідного пер. дифузора $d_c = 303,25 \text{ мм}$ Діаметр патрубка пасивної середи $d_n = 235,96 \text{ мм}$ Відстань роб. сопла від входу в КС $l_c = 173,71 \text{ мм}$ Довжина цил. камери змішення $l_k^{\text{MIN}} = 737,79 \text{ мм}$ Довжина цил. камери змішення $l_k^{\text{MAX}} = 1229,65 \text{ мм}$ Довжина дифузору $l_d^{\text{MIN}} = 1081,72 \text{ мм}$ Довжина дифузору $l_d^{\text{MAX}} = 1262,00 \text{ мм}$

Розрахункова витрата повітря на виході ежектору при абс. тиску **1,71 бар**, складає $12401 \text{ м}^3/\text{год}$.

Кінцевий тиск 1,42 бар

Вихідні дані

Робоче повітря

 $k = 1,4$ $R, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) = 287$ $P_p, \text{МПа} = 0,68$ $t_p, ^\circ\text{C} = 20$ $G_p, \text{т/год} = 8,16$ $V_{\text{тр}}, \text{нм}^3/\text{год} = 8000$ $G_p, \text{кг/с} = 2,27$ Швидкість повітря в трубопров. $w, 30 \text{ м/с}$

Ежектуєме повітря

 $k =$

1,40

 $R, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$

287,00

 $P_n, \text{МПа}$

0,1

 $t_n, ^\circ\text{C}$

20,00

Задано:

 $u = 1$

Задано:

 $\lambda_{c3} = 0,74$ **РЕЗУЛЬТАТИ РОЗУРАХУНКУ**При $u = 1,00$ λ_{c3}

0,74

 p_c/p_n

1,420

 $(p_c/p_n)_{\text{пр2}}$

1,639

Тиск середі на виході $p_\chi =$

0,14200

МПа

Ентальпія середі на виході $h_c =$

294

Дж/кг

Діаметр вхідного. перер. роб. сопла $d_\pi =$

109,07

мм

Діаметр мін. перер. робочого сопла $d_\pi^* =$

42,40

мм

Діаметр вих. пер. робочого сопла $d_{\pi 2} =$

53,08

мм

Діаметр циліндричної КС $d_3 =$

136,87

мм

Діаметр вихідного пер. дифузора $d =$

337,55

мм

Діаметр патрубку пасивної середі $d_n =$

284,42

мм

Відстань роб. сопла від входу в КС $l_\chi =$

234,20

мм

Довжина цил. камери змішення $l_k^{\text{MIN}} =$

821,23

мм

Довжина цил. камери змішення $l_k^{\text{MAX}} =$

1368,71

мм

Длина диффузора $l_d^{\text{MIN}} =$

1204,05

мм

Длина диффузора $l_d^{\text{MAX}} =$

1404,72

мм

Розрахункова витрата повітря на виході 1,42 бар

ежектору при абс. тиску складе $12787 \text{ нм}^3/\text{год}$

ДОДАТОК Д

Характеристика ежекторів, що спроектовані на різний кінцевий тиск

Таблиця Д.1 - Характеристика ежектора, що розрахований на тиск 1,42 бар

рс, МПа	и	Vtc, нм³/год
0,1854	0,0000	6393
0,1919	0,1000	7033
0,1883	0,2000	7672
0,1846	0,3000	8311
0,1842	0,4000	8951
0,1727	0,5000	9590
0,1701	0,6000	10230
0,1635	0,7000	10869
0,1600	0,8000	11508
0,1500	0,9000	12148
0,1400	1,0000	12787
0,1300	1,1000	13426
0,1200	1,2000	14066
0,1100	1,2049	14097
0,1000	1,2049	14097
0,0500	1,2049	14097

Таблиця Д.2 - Характеристика ежектора, що розрахований на тиск 1,71 бар

рс , МПа	u	Vtc, нм³/год
0,1920	0,0000	8000
0,1873	0,1000	8800
0,1822	0,2000	9601
0,1799	0,3000	10401
0,1699	0,4000	11150
0,1620	0,4386	11305
0,1	0,4386	11509

Таблиця Д.3 - Характеристика ежектора, що розрахований на тиск 1,25 бар

рс , МПа	u	Vtc, нм³/год
0,1448	0,0000	8000
0,1429	0,1000	8800
0,1419	0,2000	9601
0,1408	0,3000	10401
0,1397	0,4000	11201
0,1339	0,5000	12001
0,1370	0,6000	12801
0,1361	0,7000	13601
0,1347	0,8000	14401
0,1347	0,9000	15201
0,1317	1,0000	16001
0,1299	1,1000	16801
0,1278	1,2000	17601
0,1251	1,3000	18401
0,1226	1,4000	19201
0,1184	1,4030	19225

Таблиця Д.4 - Характеристика ежектора, що розрахований на тиск 1,56 бар

рс , МПа	и	Vs, нм³/год
0,1669	0,0000	8000
0,1732	0,1000	8800
0,1700	0,2000	9601
0,1665	0,3000	10401
0,1629	0,4000	11201
0,1583	0,5000	12001
0,1529	0,6000	12801
0,1470	0,6171	12938
0,1000	0,6171	12938

ДОДАТОК Е

Визначення характеристики компресора ЦК-135/8

Таблиця Е.1 - Характеристика компресора ЦК-135/8 [77]

Q, м ³ /хв	Кінцевий тиск Р, МПа
110	0,81
120	0,791
130	0,77
140	0,68
145	0,6
150	0,47

За приведеними даними було отримано апроксимаційний вираз залежності $P=f(Q)$:

$$y = -3,14880E-08x^4 + 6,20028E-06x^3 + 4,67078E-04x^2 - 1,63487E-01x + 9,49937 ,$$

за яким було розраховано екстраполяційні дані, які відповідають низьким кінцевим тискам (таблиця Е.2).

Таблиця Е.2 – Характеристика компресора при низьких кінцевих тисках

Q, м ³ /хв	Кінцевий тиск Р, МПа
151	0,438817
152	0,405795
153	0,370631
155	0,293566
156	0,251506
157	0,206988
158	0,159931
159	0,110253

Побудований графік за цими даними (рисунок Е.1) свідчить про те, що права частина газодинамічної характеристики (ГДХ) при підвищенні витрати (при зниженні протитиску) може бути апроксимована прямою лінією. При малих тисках витрата буде наближатися до 160 м³/хв.

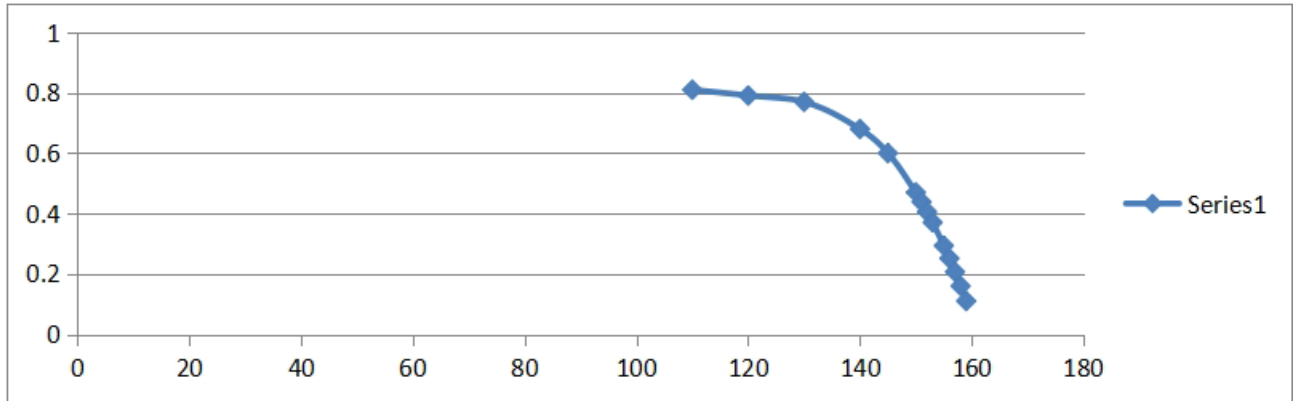


Рисунок Е.1 – Апроксимована характеристика компресору ЦК-135/8

Практично у всьому діапазоні від 1 до 1,72 атм (<0,2 МПа) має місце лінійна залежність:

$$Q = -21,785 \cdot P + 161,45$$