

УДК 621.039.586:621.65:621.51

аспірант **Сергій Цибитовський**,

serhii.uaror@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1313-9988

Київський національний університет будівництва і архітектури

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.131-152>

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЖЕКТОРА В СИСТЕМІ ВИПРОБУВАННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Анотація. Розвиток ядерної енергетики ґрунтується на трьох основних принципах: безпека, економічність та ставлення суспільства. Одним з важливих ступенів захисту є локалізаційні системи безпеки, які призначені для утримання радіоактивних речовин у межах енергоблоку та для запобігання їхнього вивільнення до навколишнього середовища. Актуальним є завдання ефективного функціонування захисту, зокрема випробування герметичності системи герметичного огороження (СГО), що є останнім бар'єром, який запобігає виходу радіоактивних продуктів до навколишнього середовища при важкій аварії. При випробуваннях герметичності СГО й елементів системи локалізації аварії на АЕС України використовується метод «абсолютного тиску». Такі випробування тривають понад 25 годин. Одним з рішень зменшення часу нагнітання повітря при випробуваннях герметичності захисної оболонки АЕС є використання ежектора, який пришвидшує подавання повітря компресором. У даній роботі запропоновано новий підхід до розрахунку ежектора, що підвищує ефективність і стійкість обчислень. Оптимізування часу нагнітання повітря відбувається за двома параметрами – модулем ежектора та тиском на виході з компресора. Розрахунок роботи системи без і з ежектором показує, що за допомогою останнього можна скоротити час заповнення СГО на 38,8 %, що дозволить зменшити і загальний час випробувань. Наявність фільтра на вході повітря, що підсмоктується, знижує ефект від використання ежектора: зменшення часу нагнітання буде дорівнювати 35,5 %. Моделювання методами обчислювальної гідродинаміки підтверджує оптимальний модуль ежектора 8,6. Також моделювання наочно показує потоки в ежекторі. Зокрема виявлено ефективне використання довжини камери змішування. Виявлено можливості оптимізування геометричної форми задля зменшення втрат енергії у складній течії довкола сопла.

Ключові слова: атомна електростанція, система герметичного огороження, випробування герметичності, ежектор, математичне моделювання.

Постановка проблеми. Розвиток ядерної енергетики ґрунтується на трьох основних принципах: безпека, економічність та ставлення суспільства [1]. Усі ці принципи взаємопов'язані. Для безпечного функціонування АЕС комплектуються необхідними системами безпеки, які запобігають аваріям та призначені захистити і зберегти обладнання від руйнування при аваріях. Локалізаційні системи безпеки призначені для утримання радіоактивних речовин у межах енергоблоку та для запобігання їхнього вивільнення до навколишнього середовища. Зазвичай, наявність систем безпеки впливає як на вартість, так і на експлуатаційні показники АЕС. Тому при забезпеченні необхідного рівня безпеки вирішальне значення при прийнятті рішення про вибір джерела енергії мають вартісні показники енергоустановок. У результаті ядерна енергетика постійно знаходиться в конкурентній боротьбі з іншими джерелами енергії. Нещодавно це були газові енергоустановки, сьогодні – відновлювані джерела енергії, які вже мають питомі капітальні вкладення на рівні АЕС та навіть менші. Але сьогодні вони програють за собівартістю та нестабільному виробництву електроенергії. Треба зауважити, що розвиток накопичувачів електроенергії вирішує останній недолік та робить ВЕС та СЕС більш уживаними, оскільки вони не несуть ядерно-екологічної загрози. Таким чином, треба підкреслити, що тільки економічні переваги АЕС роблять їх сьогодні більш прийнятними на ринку. Одним із напрямків

Актуальність дослідження. Найактуальнішою проблемою наявної та майбутньої ядерної енергетики є забезпечення екологічної та експлуатаційної безпеки роботи ядерних енергетичних реакторних установок (ЯЕРУ). На сьогодні ця проблема вирішується застосуванням глибокого ешелонованого захисту та розвитком широкого протиаварійного комплексу методів, і засобів для ефективного контролю роботи активних зон реакторів. Таким чином, актуальною є задача ефективного функціонування захисту, зокрема випробування герметичності системи герметичного огороження (СГО), що є останнім бар'єром, який запобігає виходу радіоактивних продуктів до навколишнього середовища при важкій аварії.

Останні дослідження та публікації. При випробуваннях герметичності СГО і елементів системи локалізації аварії на АЕС України використовується метод «абсолютного тиску» [2]. За цим методом у результаті виміру тиску, температури та вологості повітря за рівнянням Клапейрона визначається маса наявного в СГО повітря. Випробування складаються з п'яти етапів:

- вакуумування;
- нагнітання повітря для досягнення необхідного значення тиску 169 кПа;
- стабілізування параметрів;
- вимірювання;

- скидання тиску.

Такі випробування тривають понад 25 годин. Упродовж випробувань ніякі роботи в СГО не проводяться. Забезпечення надлишкового тиску в СГО здійснюється за допомогою компресора. Через великий об'єм СГО для нагнітання повітря потрібний відносно великий час, який впливає на економічні показники АЕС [2]. У цій роботі запропоновано як одне з рішень зменшити час нагнітання повітря при випробуваннях герметичності захисної оболонки АЕС через використання ежектора.

Детальні розрахунки та оптимізування ежекторної установки проведено в роботі [3]. При цьому було розраховано ежектор, побудовано його характеристики та визначено час нагнітання. При проведенні розрахунків було прийнято ряд припущень, через що результати отримані з відповідною похибкою. Слід відмітити, що безпосередньо після компресора встановлено обладнання для очищення повітря від пилу та вологи. Відповідно при використанні ежектора повітря, яке підсмоктується в ежекторі, потрібно також очищати від пилу та вологи. Наявність цього обладнання в роботі [3] не враховано. Зрозуміло, що наявність додаткового опору на вході повітря, що підсмоктується до ежектора має привести до зниження витрати повітря на виході та підвищення часу нагнітання повітря до необхідного тиску в СГО.

Формулювання цілей статті. Удосконалити теоретичні підходи до розрахунку ежектора, зокрема з урахуванням додаткового обладнання на всмоктуванні, а також перевірити результати чисельним моделюванням.

Базовий режим – робота компресора без ежектора Перш ніж розпочати розрахунок безпосередньо ежектора, потрібно побудувати характеристику газового компресора, який нагнітає робочий потік повітря.

Для вирішення цього завдання на першому етапі необхідно отримати характеристику компресора у вигляді залежності подачі від протитиску на виході. Крім того, доцільно одразу перевести об'ємну подачу до масової, враховуючи, що так звані «нормальні кубічні метри» при температурі повітря $T = 273,15$ К та абсолютному тиску $p_{абс} = 101325$ Па. При цьому масова подача повітря

$$G = \rho \cdot Q = \frac{p_{абс} \cdot Q}{R \cdot T}, \quad (1)$$

де ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; Q – об'ємна подача, $\text{н.м}^3/\text{с}$; R – питома газова стала, для повітря $R = 287$ Дж/(кг·К);

На рис.1 показана характеристика відцентрового компресора ЦК135/8, з точками, взятими з паспортних даних.

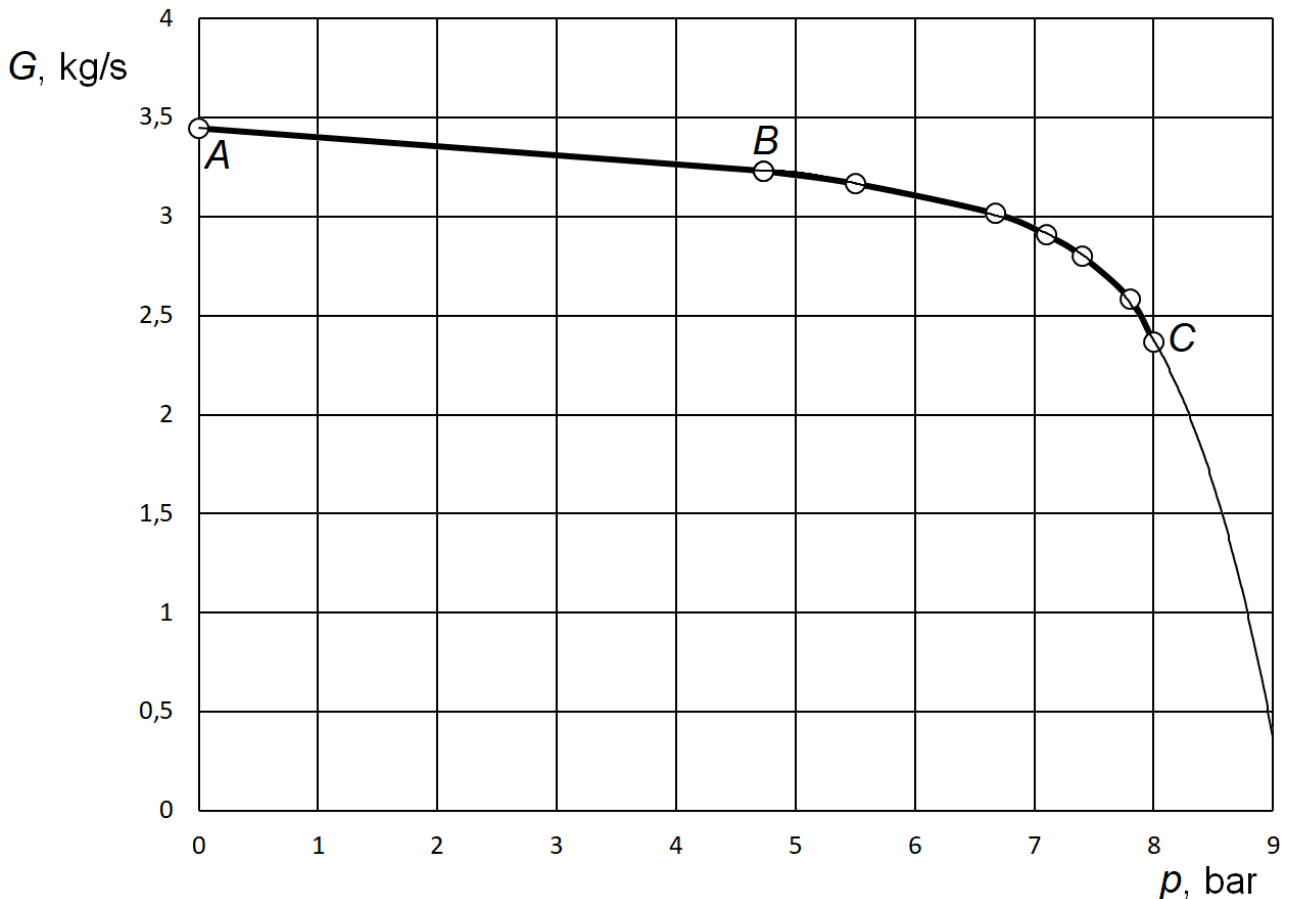


Рис. 1. Апроксимація характеристики компресора ЦК-135/8

За методом найменших квадратів отримано регресійні рівняння, які апроксимують цю характеристику, яку розбито на 2 ділянки. На ділянці АВ при надлишковому тиску $0 < p < 4,73$ бар зручно апроксимувати характеристику лінійною залежністю

$$G = 3,44669 - 0,04554 \cdot p. \quad (2)$$

На ділянці ВС при надлишковому тиску $p > 4,73$ бар використовується апроксимація поліномом четвертого степеня:

$$G = (((0,6588 - 0,02774 \cdot p) \cdot p - 5,85566) \cdot p + 22,94649) \cdot p - 30,13195. \quad (3)$$

Така апроксимація забезпечує високе значення коефіцієнта узгодження $R^2 = 0,9987$. Крім того, така апроксимація дозволяє продовжити характеристику праворуч від точки С шляхом екстраполяції.

Оскільки надлишковий тиск у СГО не перевищує 0,7 бар, характеристика компресора в цьому діапазоні описуються лінійною залежністю. Тоді час заповнення можна визначити аналітично. Диференціальне рівняння, що описує

процес заповнення, можна надати у вигляді

$$\frac{d m}{d t} = G(m). \quad (4)$$

де m – маса повітря всередині СГО, кг; $G(m)$ – масова витрата повітря, яке надходить до СГО, кг/с.

Розв'язок рівняння (4)

$$t = \int_{m_1}^{m_2} \frac{d m}{G(m)}, \quad (5)$$

де m_1 і m_2 – маси повітря всередині ЗО на початку та наприкінці процесу заповнення за допомогою рівнянням газowego стану Клапейрона:

$$m_{1,2} = \frac{p_{абс,1,2} \cdot V}{R \cdot T}, \quad (6)$$

де V – об'єм повітря в СГО, м³.

За формулою (6) отримаємо $m_1 = 72260$ кг та $m_2 = 121235$ кг.

Абсолютний тиск пов'язаний із масою рівнянням

$$p_{абс} = \frac{m \cdot R \cdot T}{V}, \quad (7)$$

Але в характеристиці компресора (2) використовується надлишковий тиск, виражений в барах. Визначимо його за формулою

$$p = \frac{p_{абс} - 101325}{100000} = \frac{m \cdot R \cdot T}{100000 \cdot V} - 1,01325. \quad (8)$$

Тоді залежність подачі компресора від маси повітря в СГО описується рівнянням

$$\begin{aligned} G(m) &= 3,44669 - 0,045543 \cdot (1,40223 \cdot 10^{-5} \cdot m - 1,01325) = \\ &= 3,40054 - 6,38619 \cdot 10^{-7} \cdot m. \end{aligned} \quad (9)$$

За формулою (5) з урахуванням залежності (9) отримаємо час заповнення СГО

$$t = \int_{m_1}^{m_2} \frac{dm}{3,40054 - 6,38619 \cdot 10^{-7} \cdot m} = - \frac{\ln(3,40054 - 6,38619 \cdot 10^{-7} \cdot m)}{6,38619 \cdot 10^{-7}} \Big|_{m_1}^{m_2} = 14274 \text{ с} \quad (10)$$

Цей час відповідає 3,965 години.

Аналітичне моделювання ежектора. У більшості робіт, присвячених моделюванню та розрахункам газових ежекторів, виконується оптимізація з метою збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД) [4]. Особливість даного розрахунку полягає в тому, що нам необхідно мінімізувати час підвищення тиску повітря в СГО за допомогою ежектора з урахуванням того, що тиск усередині СГО безперервно змінюється. Це призвело до необхідності змінити послідовність розрахунків в рамках класичної математичної моделі ежектора.

На рис. 2 представлена розрахункова схема ежектора з циліндричною камерою змішування. На рисунку позначені параметри робочого, ежектованого і змішаного потоку, а також основні перерізи, для яких складаються рівняння.

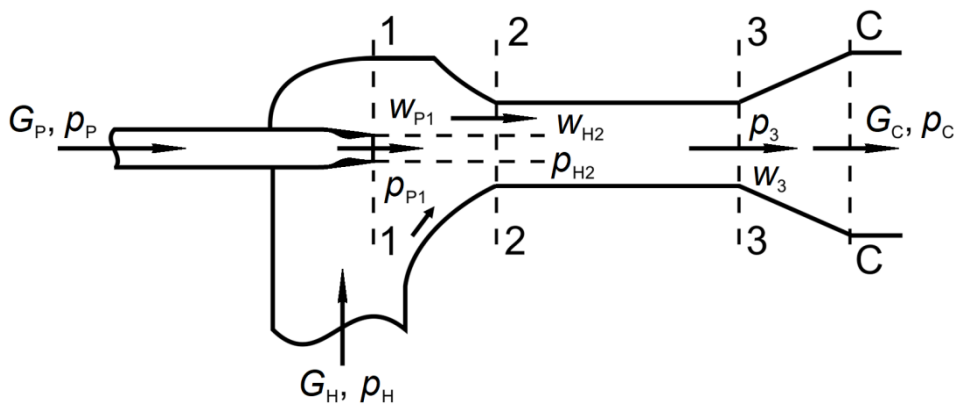


Рис. 2. Розрахункова схема газового ежектора

Рівняння, що описують роботу ежектора, наведено у класичній роботі [5]. Такими є рівняння нерозривності

$$G_p + G_h = G_c \quad (11)$$

та рівняння збереження моменту кількості руху:

$$p_2 \cdot (G_p \cdot w_{p1} + G_h \cdot w_{h2}) - (G_p + G_h) \cdot w_3 = (p_3 - p_{p2}) \cdot f_{p2} + (p_3 - p_{h2}) \cdot f_{h2}, \quad (12)$$

де G_p – витрата повітря робочого потоку, кг/с; G_n – витрата підсмоктування навколишнього повітря, кг/с; G_c – витрата суміші, кг/с; φ_2 – коефіцієнт швидкості камери змішування; w_{p1} – швидкість повітря робочого потоку в соплі в перерізі 1–1, м/с; w_{n2} – швидкість підсмоктаного навколишнього повітря в перерізі 2–2, м/с; w_3 – швидкість повітря в перерізі 3–3, м/с; p_3 – абсолютний тиск у перерізі 3–3, Па; p_{p2} – абсолютний тиск робочого потоку в перерізі 2–2, Па; f_{p2} – площа струмини робочого потоку в перерізі 2–2, м²; p_{n2} – абсолютний тиск підсмоктаного повітря в перерізі 2–2, Па; f_{n2} – площа потоку підсмоктаного повітря в перерізі 2–2, м².

Використовується припущення про рівність тисків потоків у перерізі 2–2

$$p_{p2} = p_{p1} = p_n. \quad (13)$$

У [5] наявність втрат енергії в різних ділянках ежектора враховується за допомогою коефіцієнтів швидкості. Рекомендовано такі значення коефіцієнтів швидкості:

- робоче сопло: $\varphi_1 = 0,95$;
- камера змішування (КЗ): $\varphi_2 = 0,975$;
- дифузор: $\varphi_3 = 0,9$;
- вхідна ділянка КЗ: $\varphi_4 = 0,925$.

Особливість розрахунків надзвукових газових ежекторів полягає в тому, що в них враховується стисливість газів. При цьому швидкість робочого потоку зазвичай перевищує швидкість звуку. Для цього на виході з сопла передбачають розширення перерізу – принцип сопла Лавалю. У розрахунках традиційно використовуються газодинамічні функції – приведений тиск

$$\Pi(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (14)$$

та приведена масова швидкість

$$q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{k} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (15)$$

де λ – приведена швидкість, тобто відношенню локальної швидкості газу до його критичної швидкості звуку при температурі гальмування; k – показник адіабати.

Вважаємо, що заданий основний геометричний параметр – модуль ежектора

$$M = \frac{f_3}{f_{p^*}}, \quad (16)$$

де f_3 – площа поперечного перерізу циліндричної камери змішування, м²; f_{p^*} – площа критичного перерізу сопла робочого повітря, м².

Також заданий повний тиск у всіх трьох патрубках, отже і ступінь стиснення повітря

$$\varepsilon = \frac{P_c}{P_n}. \quad (17)$$

Необхідно визначити витрати повітря у всіх патрубках та коефіцієнт ежекції

$$u = \frac{G_n}{G_p}. \quad (18)$$

У першу чергу розраховуємо робочий потік, оскільки він не залежить від коефіцієнта ежекції. Витрату задаємо з урахуванням продуктивності компресора.

Обчислюється газодинамічна функція

$$\Pi_{p2} = \frac{P_n}{P_p}. \quad (19)$$

За формулою (14), приведену швидкість можна визначити аналітично:

$$\lambda_{p2} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left(1 - \Pi_{p2}^{\frac{k-1}{k}}\right)}. \quad (20)$$

При цьому необхідно враховувати, що у виході з робочого сопла, зазвичай, швидкість надкритична, тобто $\lambda_{p2} > 1$.

Приведена масова швидкість q_{p2} визначається за формулою (15). Після підставлення матимемо таку формулу:

$$q_{p2} = \left(\frac{k+1}{k}\right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot \left(1 - (1 - \Pi_{p2})^{\frac{k-1}{k}}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot (1 - \Pi_{p2})^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (21)$$

Далі обчислюється площа вихідного перерізу сопла

$$f_{p2} = \frac{f_{p*}}{q_{p2}}. \quad (22)$$

Площа потоку, що ежектуються, в поперечному перерізі 2–2:

$$f_{n2} = f_3 - f_{p2}. \quad (23)$$

Критична швидкість при заданій температурі гальмування потоку T^* , K ,

$$a_* = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T^*}. \quad (24)$$

Швидкість робочого потоку на виході із сопла

$$w_{p2} = \varphi_1 \cdot a_* \cdot \lambda_{p2}. \quad (25)$$

У більшості літературних джерел при розрахунку характеристики ежектора задають коефіцієнт ежекції u та обчислюють ступінь стиснення ε . Однак при такій послідовності розрахунку важко визначити максимальне значення коефіцієнта ежекції, що суттєво знижує точність розрахунку часу заповнення СГО.

У процесі роботи було вдосконалено методику розрахунку та запропоновано задавати коефіцієнт стиснення ε та обчислювати коефіцієнт ежекції. У цьому разі збіжність результатів значно поліпшується.

Розрахунок характеристики ежектора виконується у припущенні, що рух повітря є адіабатним. При цьому характеристика мала б вигляд ABC (рис. 3).

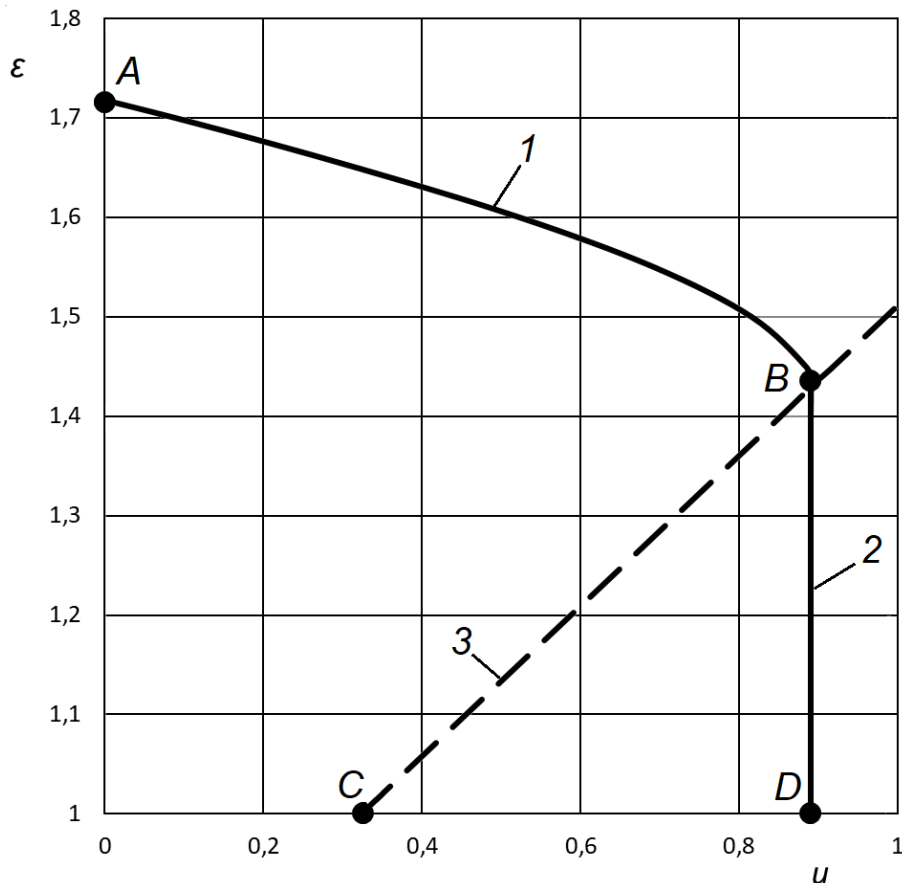


Рис. 3. Розрахункова характеристика ежектора при $M=8,6$:
 1 – адіабатна характеристика; 2 – режим замикання в перерізі 3–3;
 3 – межа критичного режиму в перерізі 3–3.

Слід відзначити, що на лінії ABC кожному значенню коефіцієнта ежекції відповідає два значення коефіцієнта стиснення, що приводило до поганої збіжності ітераційного процесу за методом Гауса-Зейделя.

З експериментів відомо, що при досягненні швидкості звуку в перерізі 3–3 виникає так зване замикання потоку. При цьому, незважаючи на зміни тиску, швидкість повітря в критичному перерізі залишається постійною та рівною місцевій швидкості звуку. Цьому явищу відповідає вертикальна ділянка BD на рис. 3, і реальна характеристика ежектора має вигляд ABD .

Крім того, теоретично можливе замикання потоку в поперечних перерізах 1-1 і 2-2, але при досліджуваних параметрах ці критичні режими не реалізуються.

Далі зручно розрахувати змішаний потік. На кожному кроці задається значення λ_{e3} в діапазоні від 0 до 1. Умова $\lambda_{e3} < 1$ гарантує, що швидкість змішаного потоку буде дозвуковою.

Для заданого значення λ_{e3} визначаємо значення газодинамічних функцій P_{e3} і q_{e3} . Тиск на виході з камери змішування

$$p_3 = \Pi_{c3} \cdot p_c. \quad (26)$$

Швидкість змішаного потоку в перерізі 3-3

$$w_3 = \frac{a_* \lambda_{c3}}{\varphi_3}. \quad (27)$$

де φ_3 – коефіцієнт швидкості дифузора.

Оскільки модуль ежектора заданий, визначаємо площу поперечного перерізу КС

$$f_3 = M \cdot f_{p*}. \quad (28)$$

Витрата змішаного потоку

$$G_c = \frac{k \Pi_* p_c q_{c3} f_3}{a_*}. \quad (29)$$

Наостанок, варто розрахувати потік, що ежектується. З рівняння збереження маси визначаємо масову витрату

$$G_n = G_c - G_p. \quad (30)$$

У випадку циліндричної камери змішування

$$f_{n2} = f_3 - f_{p2}. \quad (31)$$

Приведена масова швидкість потоку, що ежектується, в перерізі 2–2

$$q_{n2} = \frac{G_n a_*}{k_n \Pi_{n*} p_n f_{n2}}. \quad (32)$$

Знаючи q_{n2} , визначити приведену швидкість λ_{n2} аналітичним шляхом неможливо, тому вона визначається чисельним методом [6]. Після цього

визначається Π_{n2} .

Швидкість потоку, що ежектується, в перерізі 2–2

$$w_{n2} = \varphi_4 \cdot \alpha_* \cdot \lambda_{n2}. \quad (33)$$

Тоді тиск потоку, що ежектується, в перерізі 2–2

$$p_{n2} = \Pi_{n2} \cdot p_n. \quad (34)$$

Усі знайдені величини підставляються у рівняння балансу імпульсів (12) і обчислюється нев'язка, тобто, відмінність сумарного імпульсу від нуля.

Підпрограма для визначення кореню нелінійного алгебраїчного рівняння автоматично змінює значення λ_{c3} в заданому діапазоні доти, поки ця нев'язка не перетвориться на нуль із заданою припустимою похибкою. Таким чином, при заданому тиску p_c визначається таке значення λ_{c3} , при якому щоб виконуються закон збереження маси (11) та моменту кількості руху (12).

Після уточнення λ_{c3} можна визначити коефіцієнт ежекції u .

На рис. 4 показано залежності ступеню стиснення потоку ε як функція від коефіцієнту ежекції u при трьох значеннях модуля ежектора. З графіку видно, що ежектори, які забезпечують високі коефіцієнти ежекції, мають обмежений ступінь стиснення. Наша мета – знайти модуль ежектора, який забезпечує оптимальний баланс між цими показниками.

На підставі отриманих характеристик з'являється можливість на наступному кроці моделювати динаміку нагнітання повітря в СГО з метою визначення оптимального модулю ежектора.

Динаміка процесу нагнітання повітря до СГО. Тиск у СГО пов'язаний з масою газу, що там міститься, рівнянням газового стану або рівнянням Клапейрона. Залежність маси повітря від часу виражається диференціальним рівнянням (4). Розрахунок динаміки заповнення ЗО зводиться до чисельного розв'язання диференціального рівняння (4). У даній роботі вживано метод Рунге-Кутта-Фельберга четвертого-п'ятого порядку точності з автоматичним вибором кроку інтегрування [6].

Залежність тиску в ЗО від часу при різних модулях ежектора показано на рис.5. Крива 4 на рис. 5 відображає заповнення ЗО безпосередньо від компресора без використання ежектора. З рисунка видно, що в цьому випадку час заповнення максимальний і становить приблизно 4 години. Крива 3 показує динаміку заповнення ЗО при модулі ежектора рівному 7,0.

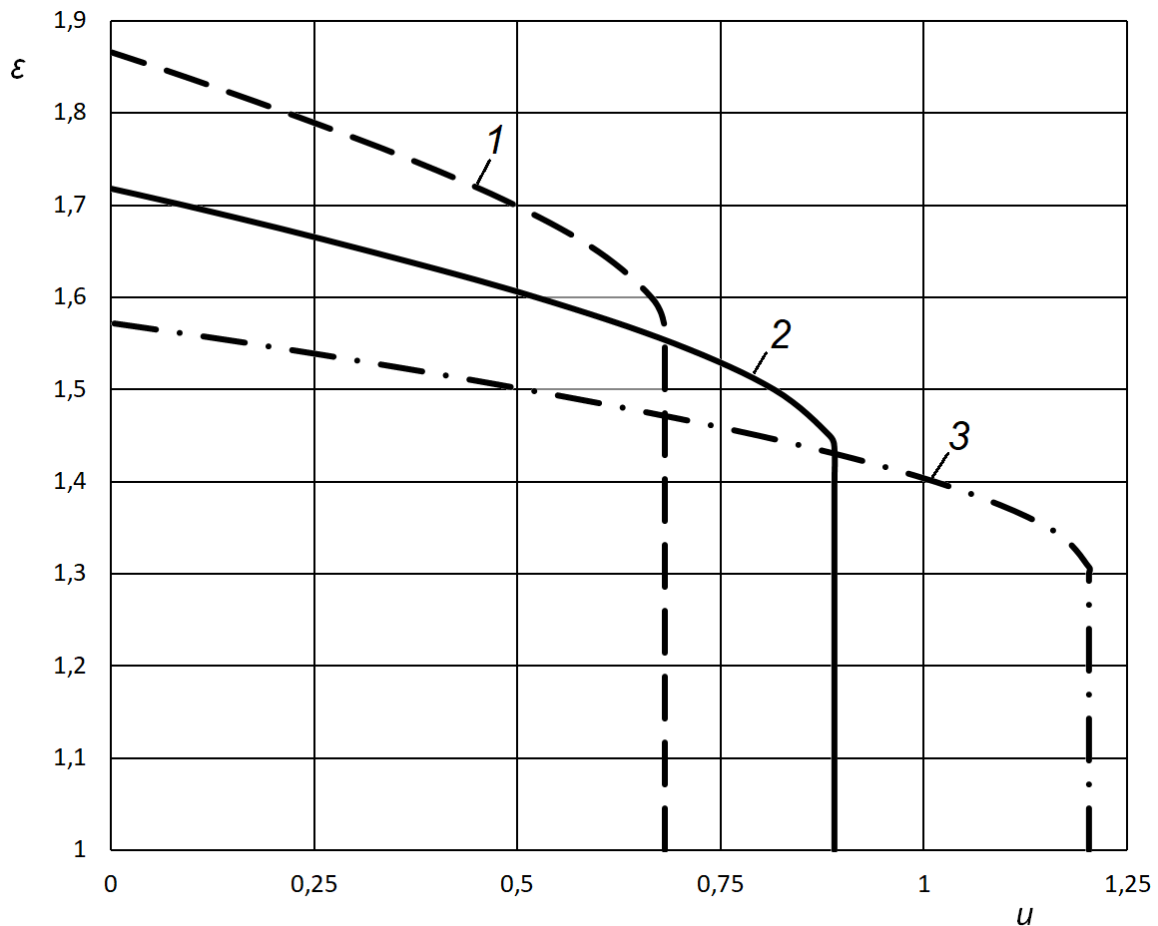


Рис. 4. Характеристики ежекторів при різних значеннях модуля:
1 – $M=7,0$; 2 – $M=8,6$; 3 – $M=11,0$.

Видно, що швидкість заповнення залишається приблизно постійною, хоч і невисокою. Крива 1 відповідає модулю 11,0. Видно що на початку швидкість заповнення висока, проте у верхній частині графіка коефіцієнт ежекції зменшується, і фактично працює один компресор. І, нарешті, крива 2 відповідає модулю 8,6, який забезпечує мінімальний час заповнення.

На рис.6 показаний графік залежності часу заповнення ЗО від модуля ежектора. З графіку видно, що найменший час заповнення досягається при модулі 8,6 і становить приблизно 2,43 години. Тобто, завдяки використанню ежектора час заповнення зменшується на 38,8 %.

На рис. 7 показано залежність часу заповнення ЗО від надлишкового тиску перед робочим соплом. З рисунку видно, що оптимальний надлишковий тиск становить 5,5 бар. Справа в тому, що при великих тисках на виході з компресора знижується подача. У цьому випадку, незважаючи на високі коефіцієнти ежекції, сумарна подача на виході з ежектора знижується.

Вплив додаткових опорів. При розрахунках нагнітання повітря до ЗО необхідно розглянути вплив повітряних фільтрів, які створюють додаткові аеродинамічні опори.

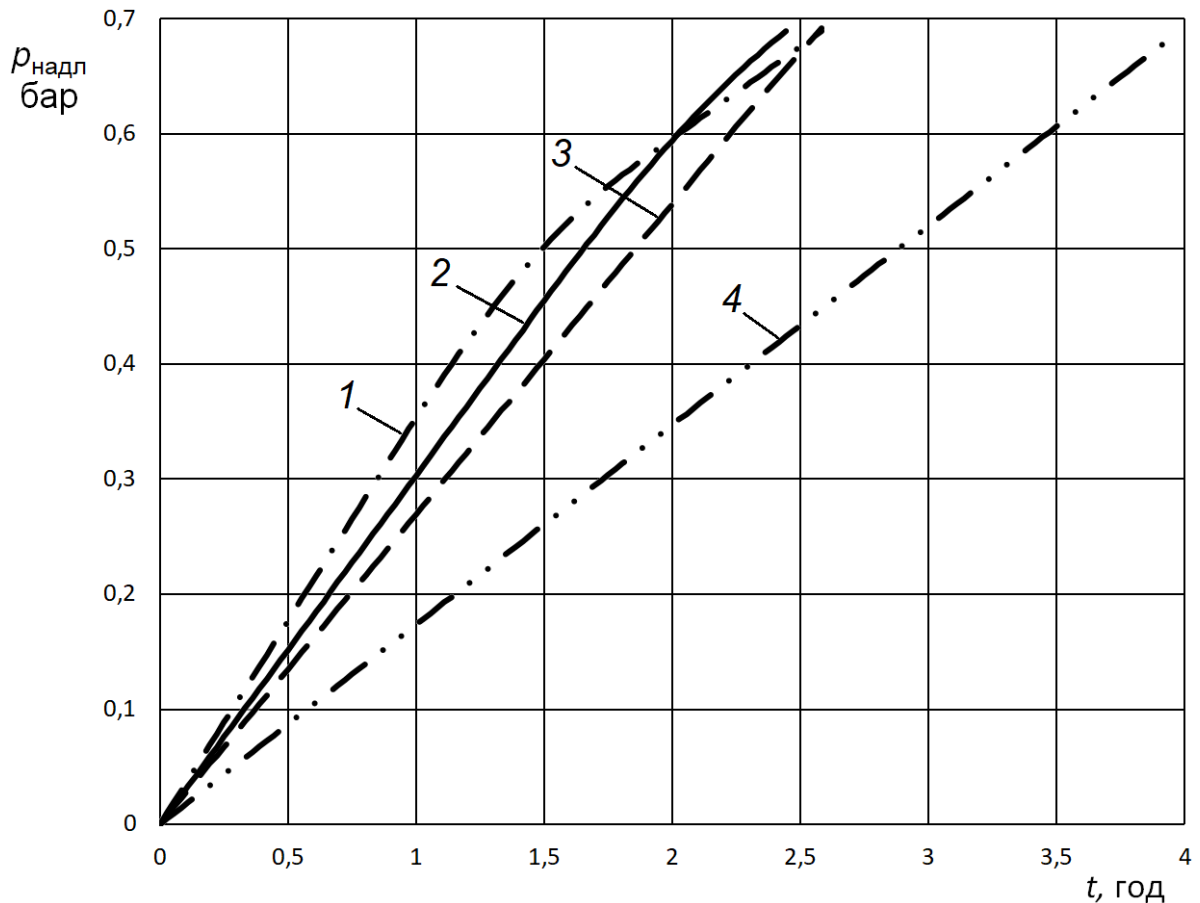


Рис. 5. Динаміка зміни тиску в ЗО при різних модулях ежектора:
 1 – $M=7,0$; 2 – $M=8,6$; 3 – $M=11,0$; 4 – компресор без ежектора.

У попередньому розрахунку використовуються коефіцієнти швидкості φ , які пов'язані з коефіцієнтами місцевого опору ζ співвідношенням

$$\zeta = \frac{1}{\varphi^2}. \quad (35)$$

Додатковий коефіцієнт опору ζ_0 впливає на коефіцієнт швидкості таким чином:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\zeta + \zeta_0}}. \quad (36)$$

Про коефіцієнт місцевого опору наразі немає достеменних відомостей. У паспорті фільтра пилу на виході компресора наведено, що його аеродинамічний опір дорівнює 0,1 бар.

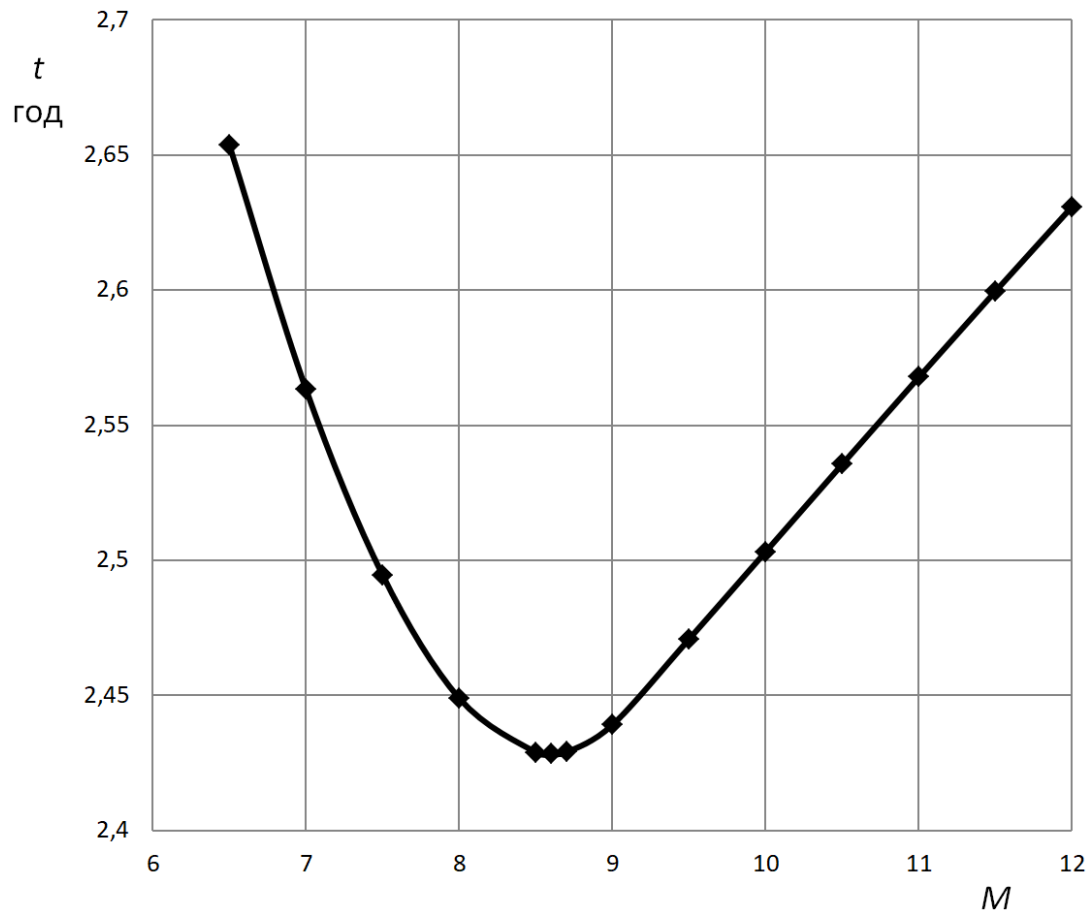


Рис. 6. Залежність часу заповнення ЗО від модуля ежектора

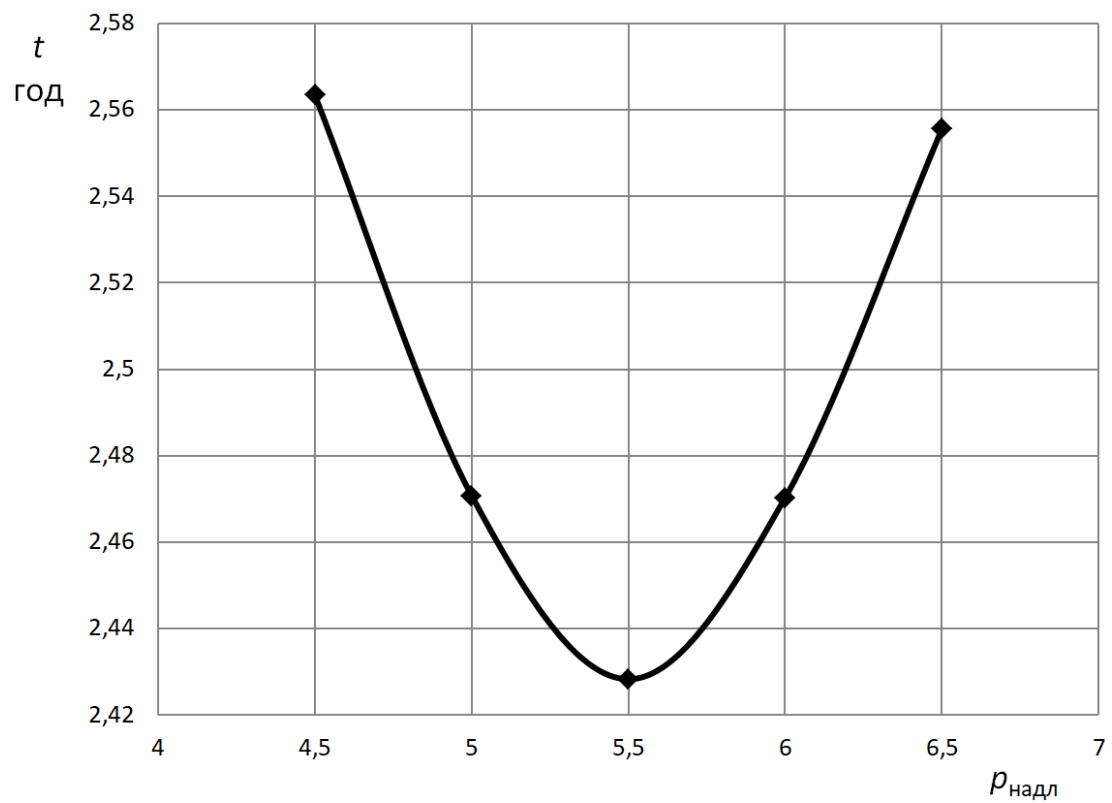


Рис. 7. Залежність часу заповнення ЗО від тиску перед соплом

Приймемо опір відділювача вологи таким же – 0,1 бар. Тоді загальний опір двох фільтрів, які треба додатково встановити на вході повітря, що підсмоктується до ежектора, буде дорівнювати $\Delta p = 0,2$ бар при діаметрі патрубків фільтра $D = 0,15$ м. Для визначення відповідного коефіцієнта втрат проведемо розрахунок за умови встановлення безпосередньо за компресором. Об'ємна подача компресора

$$Q = \frac{G}{\rho} = 2,83 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (37)$$

Швидкість повітря

$$w = \frac{4Q}{\pi D^2} = 160 \text{ м/с}. \quad (38)$$

Тоді додатковий коефіцієнт втрат

$$\zeta_0 = \frac{2 \Delta p}{\rho w^2} = 1,3. \quad (39)$$

Згідно із (36) отримаємо $\varphi_4 = 0,636$. Розраховану характеристику ежектору з цим значенням коефіцієнту швидкості показано на рис. 8.

Розрахунки динаміки процесу заповнення СГО показують, що за наявності додаткових опорів корисний ефект від ежектора зменшується. При встановленні фільтра на вході потоку, що підсмоктується, розрахунковий час заповнення СГОГ становить 2,56 год. Тобто, зменшення часу заповнення завдяки ежектору становить 35,5 %.

Моделювання ежектора методом обчислювальної гідродинаміки.

Аналітичний опис роботи ежектора може не враховувати певних особливостей, наприклад, неідеальності стисненого повітря після компресора або в зонах з дуже низькою температурою в соплі Лавалю, турбулентні пульсації, можливі циркуляційні течії в зоні ежекції тощо. Детальне врахування цих явищ призведе до значного ускладнення рівнянь що зробить модель не простішою за відомі моделі обчислювальної гідродинаміки. У такому разі доцільно спочатку скористатися спрощеною аналітичною моделлю, а потім перевірити і, за потреби, уточнити результат за методами обчислювальної гідродинаміки.

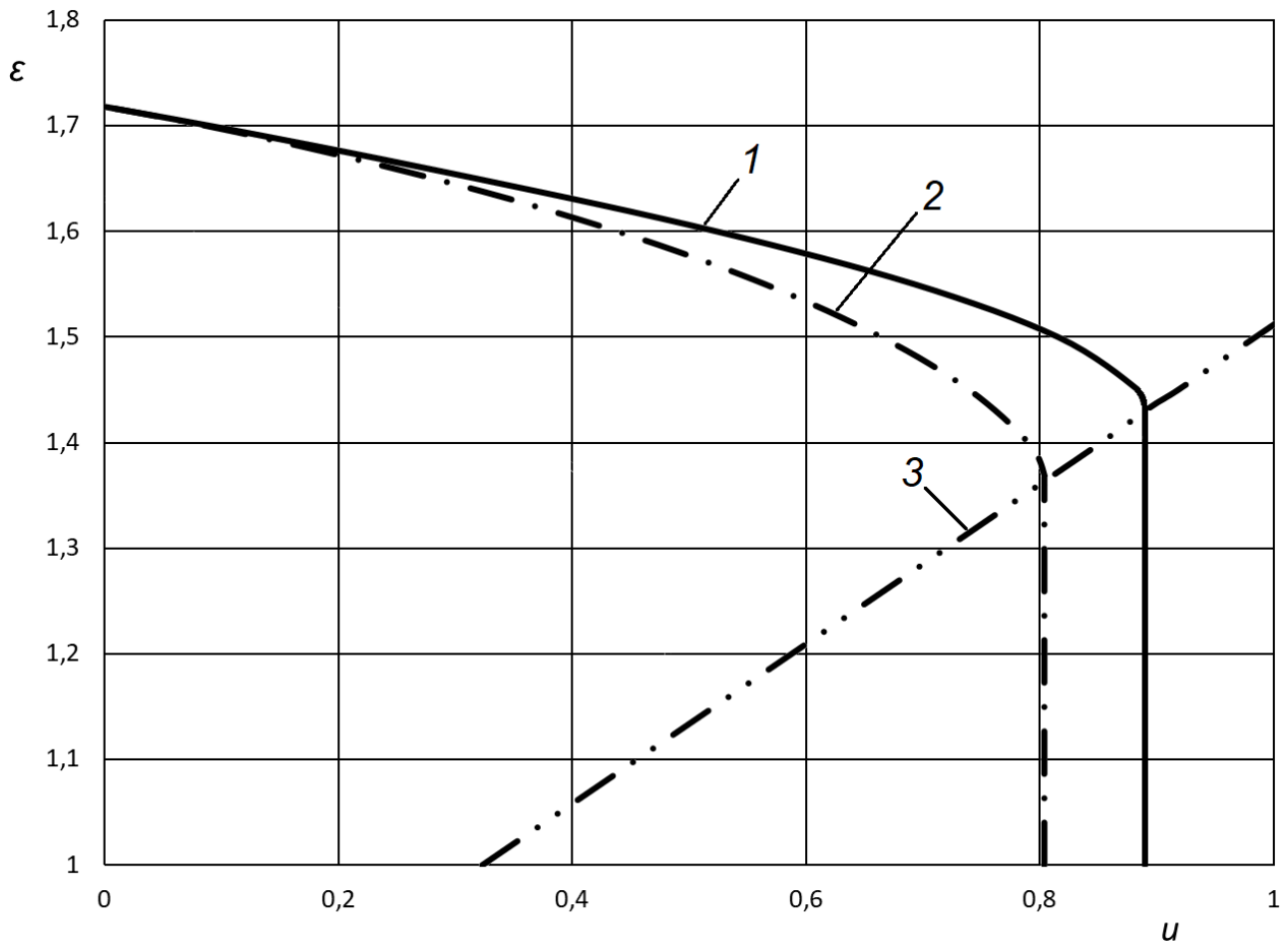


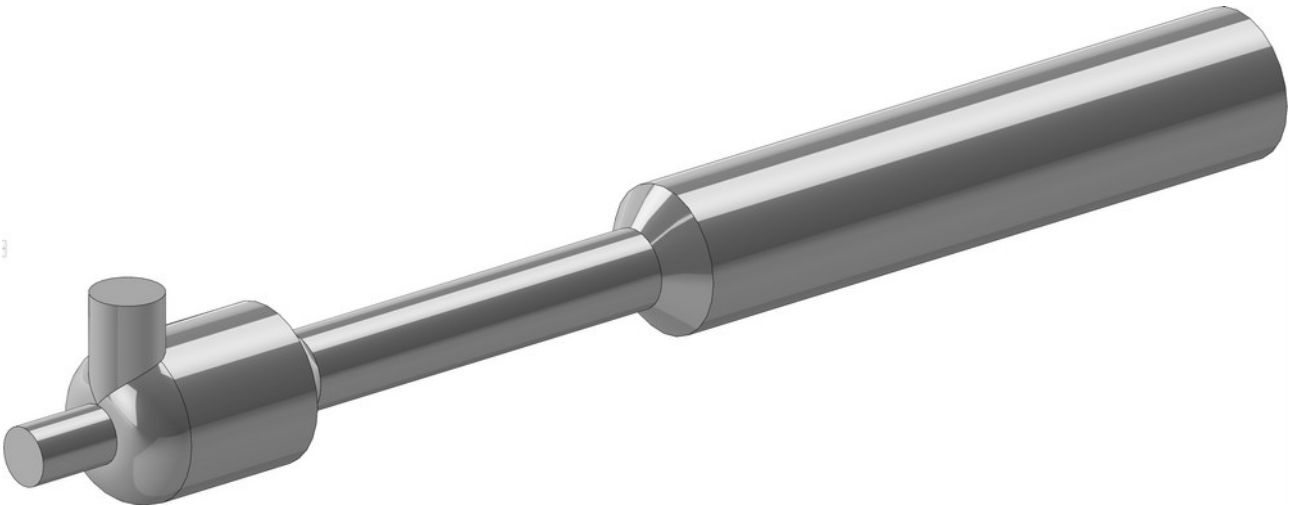
Рис. 8. Вплив додаткового опору на характеристику ежектора
 1 – $\varphi_4 = 0,925$ (стандартні налаштування); 2 – $\varphi_4 = 0,636$ (фільтр на вході);
 3 – межа критичного режиму в перетині 3-3.

У даній роботі перевіримо окремі результати за допомогою стандартної $k-\varepsilon$ моделі турбулентних течій без надбудов для високого значення числа Маха, адже очікуване значення його не перевищує два. Слід зазначити, що час розрахунку до збіжності був завищеним, а при деяких спробах розрахунку модель втрачала стійкість. Такі явища за багаторічним досвідом роботи з цією моделлю можливі при розрахунку ежекції, та ефектів зворотного потоку в трубах й отворах. При втраті стійкості проблема вирішувалася зміною модуля ежектора на 0,001, що виходить за межі точності розрахунків.

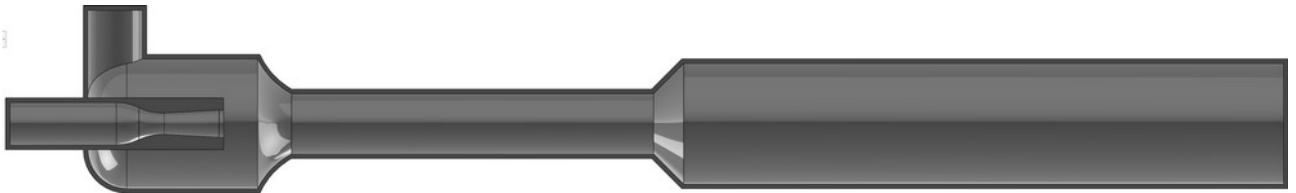
Розрахунок усього процесу закачування в резервуар вимагає достатньо довгого процесорного часу, тому в даній роботі обмежилися роботою ежектора на протитиску 0,35 бар. Спочатку підбиратимемо оптимальну форму сопла та камер безпосередньо на моделі (рис. 9). Отримуємо модуль ежектора 8,6.

Для спрощення зовнішня форма сопла залишалася циліндричною, її профілювання змінювала параметри роботи в межах до 0,1%. На виході встановлено ділянку стабілізації для коректного зняття даних.

а



б



в

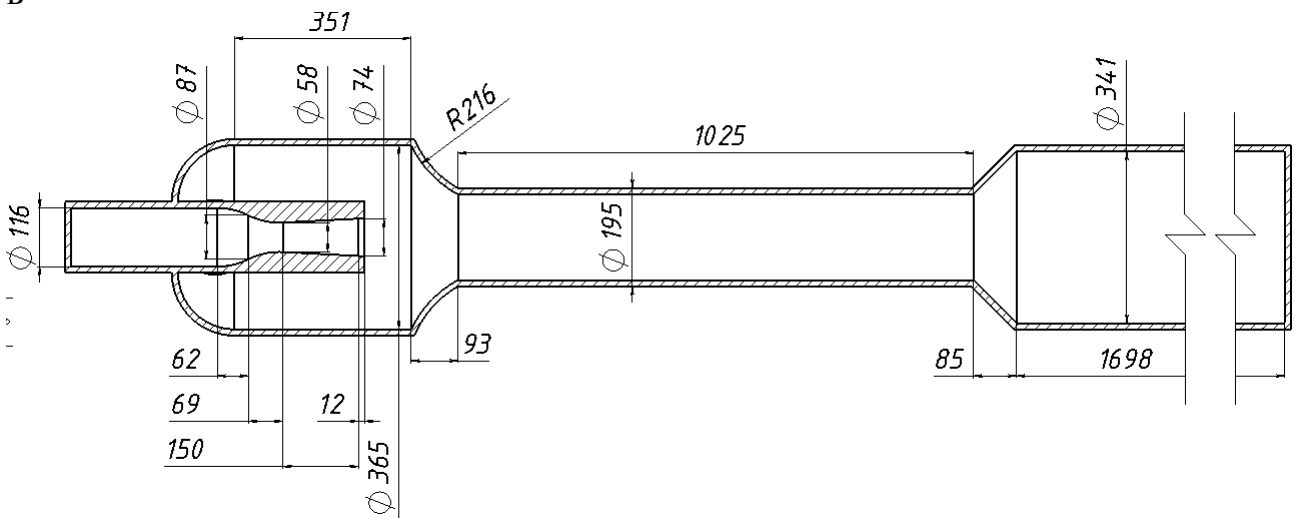


Рис. 9. Оптимізована форма ежектора для модуля 8,6:
а – загальний вигляд; б – розріз; в – креслення

Задані граничні умови відповідають рис. 10.

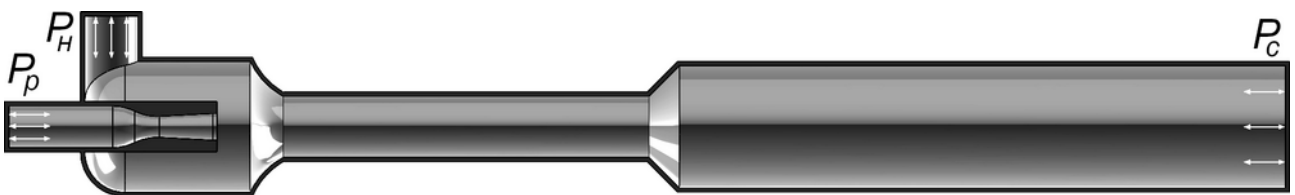


Рис. 10. Граничні умови:
 $P_p = 500000$ Па (абс.); $P_n = 101325$ Па (абс.); $P_c = 136325$ Па (абс.).

У процесі моделювання змінювався модуль ежектора шляхом:

- масштабування камери змішування;
- збільшення діаметра камери змішування без зміни її довжини.

Результати моделювання (рис. 11) показують, що 8,6 є оптимальним модулем ежектора, що відповідає результатам теоретичного розрахунку.

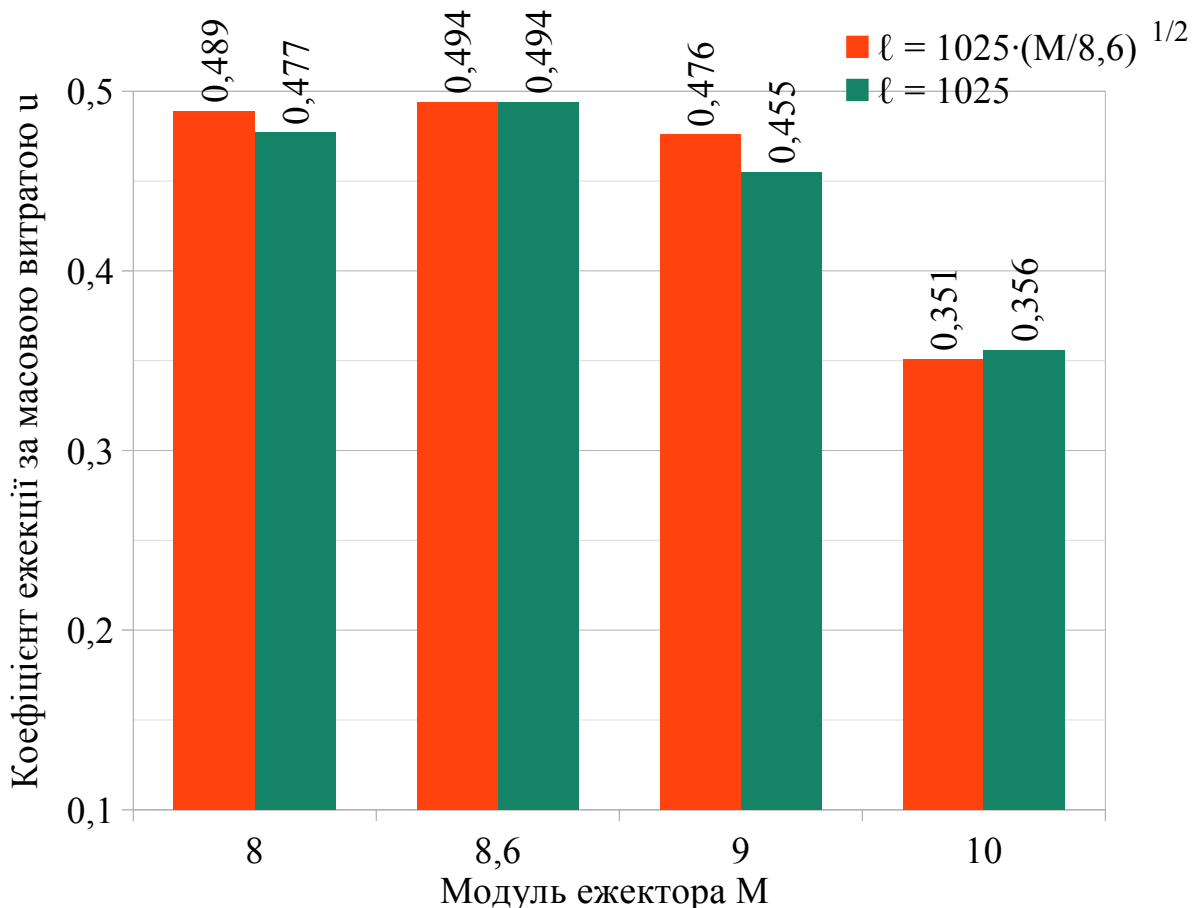


Рис. 11. Коефіцієнт ежекції за результатами моделювання

Зменшення модуля ежектора менше впливає на коефіцієнт змішування, аніж збільшення. Також видно, що камеру змішування потрібно масштабувати.

Для уявлення про процеси в ежекторі та можливі шляхи його покращення побудовано поля основних параметрів течії (рис. 12). Бачимо достатньо складну течію довкола сопла, що призводить до певних втрат енергії. Це дозволяє спрямувати подальші дослідження на оптимізування геометричних характеристик камери.

На рис. 12 г видно, що струмина розширюється до заповнення всього перерізу камери змішування саме безпосередньо біля її закінчення. Це дозволяє стверджувати оптимальність обраної довжини камери. Таким чином, оптимальне значення модуля ежектора за результати моделювання і за розрахунковим методом збігаються, що підтверджує правильність розрахунків

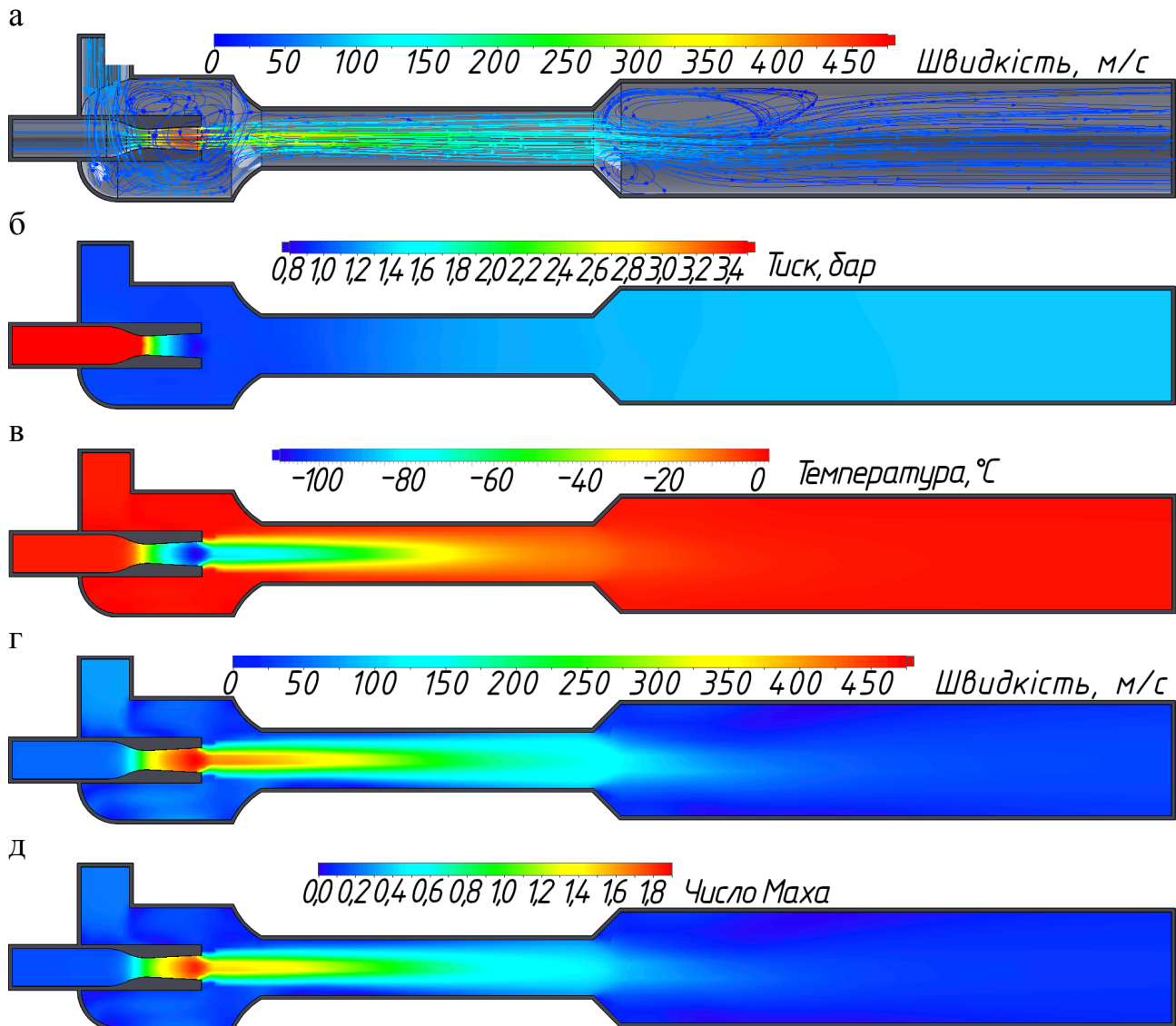


Рис. 12. Поля основних параметрів:
 а – лінії течії; б – поле тиску; в – поле температури;
 г – поле швидкості; д – поле числа Маха

Висновки. Запропонований алгоритм розрахунку газового ежектора, який відрізняється від класичного алгоритму послідовністю розрахунків, дозволяє оптимізувати установку для випробування герметичності системи герметичного огороження методом «абсолютного тиску». Оптимізування часу нагнітання повітря відбувається за двома параметрами – модулем ежектора та тиском на виході з компресора.

Розрахунок показує, що за допомогою ежектора можна скоротити час заповнення СГО на 38,8 %, що дозволить зменшити і загальний час випробувань. Наявність фільтра на вході повітря, що підсмоктується, знижує ефект від використання ежектору: зменшення часу нагнітання буде дорівнювати 35,5%.

Моделювання методами обчислювальної гідродинаміки підтверджує оптимальний модуль ежектора 8,6 і показує можливості оптимізування геометричної форми задля зменшення втрат енергії у складній течії довкола сопла.

References

1. Shyrokov, S. *Yaderni Enerhetychni Reaktory*. KPI, 1997.
2. Kravchenko, V., A. Vlasov, A. Golovchenko, A. Mazurenko, V. Dubkovskiy, O. Chulkin. "State and Prospects of Containment Tightness Tests for VVER-1000 Reactor Installations." *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2(98), June 2023, pp. 53–60. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05).
3. Kravchenko V., Vlasov A., Andryushchenko A., Vlasov D., Golovchenko A., Gavrilov P., "REDUCED AIR INJECTION TIME DURING CONTAINMENT TESTING DUE TO THE USE OF AN EJECTOR." *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi*, vol. 1, no. 65, 2022, pp. 62–69. <https://doi.org/10.15276/opu.1.65.2022.07>.
4. Butenko, O., S. Smyk. "Improvement of the central ejector efficiency under nonoptimal operating modes." *Naukovyi Visnyk Natsionalno Hirnychnoho Universytetu [Dnipropetrovsk]*, vol. 2, 2015, pp. 57–61, <https://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1072-2015/contents-no-2-2015/geotechnical-and-mining-mechanical-engineering-machine-building>. Geotechnical and Mining Mechanical Engineering, Machine Building.
5. Sokolov, E., N. Zinger. *Struinyie apparaty*. 3rd ed., Energoatomizdat, 1989.
6. Kahaner, David, Cleve Moler, S. Nash. *Numerical Methods and Software*. Prentice Hall, 1977, <https://www.hlevkin.com/hlevkin/60numalgs/Fortran/Kahaner-Moler-Numerical-Methods-and-Software.pdf>.

УДК 621.039.586:621.65:621.51

post-graduate Serhii Tsybytovskiy,

serhii.uaror@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1313-9988

Kyiv National University of Construction and Architecture

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.56.131-152>

SIMULATION OF THE EJECTOR IN THE SYSTEM FOR TESTING THE TIGHTNESS OF HIGH-RISK FACILITIES

Abstract. *The development of nuclear power is based on three basic principles: safety, economy and public attitude. One of the important levels of protection is the containment safety systems, which are designed to contain radioactive substances within the power unit and to prevent their release into the environment. The task of effective protection operation is relevant, in particular, testing the tightness of the containment system (CS), which is the last barrier that prevents the release of radioactive products into the environment in the event of a severe accident. The “absolute pressure” method is used when testing the tightness of the CS and elements of the accident containment system at Ukrainian nuclear power plants. Such tests last more than 25 hours. One of the solutions for reducing the air injection time during tests of the tightness of the NPP protective shell is the use of an ejector, which accelerates the air supply by a compressor. This paper proposes a new approach to calculating the ejector, which increases the efficiency and stability of calculations. Optimization of the air injection time is carried out according to two parameters - the ejector module and the pressure at the compressor outlet. Calculation of the system operation without and with the ejector shows that with the latter it is possible to reduce the filling time of the CS by 38.8%, which will also reduce the total test time. The presence of a filter at the inlet of the sucked-in air reduces the effect of using the ejector: the reduction in the injection time will be equal to 35.5%. Simulation using computational hydrodynamics methods confirms the optimal ejector module of 8.6. The simulation also clearly shows the flows in the ejector. In particular, effective use of the length of the mixing chamber was revealed. Possibilities of optimizing the geometric shape were identified to reduce energy losses in the complex flow around the nozzle.*

Keywords: *nuclear power plant, containment system, leakage test, ejector, mathematical simulation.*

Received/Надійшла до редакції 02.12.2025

Reviewed/Рецензована 24.12.2025

Accepted/Прийнята 26.12.2025