

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

**ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ
ПРИРОДООХОРОННОГО ОБЛАДНАННЯ ТА
СИСТЕМ**

**методичні рекомендації
до виконання практичних робіт**

Запоріжжя 2025

mip metinvest
polytechnic



УДК 504.06:62(072)
072

Рекомендовано Науково-методичною
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол №3 від 26.12.2025 р.)

Укладачі:

Вірич С.О., канд. техн. наук, доцент

072 **Основи проєктування природоохоронного обладнання та систем** : методичні рекомендації до практичних робіт / уклад.: С. О. Вірич.
Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,
2025. 109 с.

Методичні рекомендації до практичних робіт для здобувачів спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» містять алгоритми проєктування та розрахунку систем очищення атмосферного повітря і стічних вод.

Особливістю видання є поєднання інженерних розрахунків із цифровим моделюванням у середовищі Autodesk CFD та практичними тренінгами з діагностики й усунення несправності (Troubleshooting). Студенти вчать не лише проєктувати обладнання, а й забезпечувати його безаварійну експлуатацію. Викладено вимоги до оформлення результатів та критерії оцінювання робіт.

УДК 504.06:62(072)



ЗМІСТ

Вступ	4
Практична робота 1	6
Проектування та розрахунок циклонів, батарейних установок та мультициклонів	
Практична робота 2	16
Розрахунок та вибір рукавного фільтра для тонкого очищення повітря	
Практична робота 3	22
Проектування та розрахунок скрубера Вентурі для мокрого очищення газів	
Практична робота 4	28
Розрахунок абсорбера (насадкової колони) для очищення викидів від газоподібних забруднювачів	
Практична робота 5	37
Чисельне моделювання стисливої течії у соплі в Autodesk CFD	
Практична робота 6	57
Технологічний розрахунок та експлуатація ґрат для механічного очищення стічних вод	
Практична робота 7	68
Технологічний розрахунок та експлуатаційний контроль роботи аеротенка	
Практична робота 8	77
Розрахунок зернистих фільтрів для доочищення стічних вод	
Практична робота 9	84
Технологічний розрахунок вентиляторної ґрадирні для систем оборотного водопостачання	
Практична робота 10	91
Розрахунок та експлуатація насосного обладнання в системах оборотного водопостачання	
ПОРЯДОК ПОДАННЯ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ	106
ДОДАТОК А Приклад титульного листа	



ВСТУП

Сучасний стан розвитку промисловості вимагає впровадження ефективних інженерних рішень, спрямованих на мінімізацію негативного впливу на довкілля. Проте ефективність природоохоронних систем залежить не лише від точності проєктних розрахунків, а й від стабільності їхньої роботи в реальних експлуатаційних умовах.

Метою даних методичних рекомендацій є підготовка майбутніх фахівців до вирішення повного циклу інженерних завдань: від виконання конструкторських розрахунків апаратів до забезпечення їхньої надійної експлуатації та швидкого реагування на технічні збої.

Особливістю даних методичних вказівок є поєднання класичного інженерного проєктування з елементами *симуляційних тренінгів з технічного обслуговування*. Окрім розрахунку геометричних параметрів обладнання, кожна практична робота передбачає аналіз можливих експлуатаційних ризиків.

Програма охоплює два ключові блоки:

1. Очищення газових викидів: проєктування циклонів, рукавних фільтрів, скрубєрів та абсорберів, а також цифрове моделювання потоків у середовищі Autodesk CFD.

2. Очищення стічних вод та водопідготовка: розрахунок ґрат, аеротенків, фільтрів, ґрадірень та насосних вузлів.

Важливою складовою навчання є розвиток навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправностей):

1. Діагностика поломок: студенти вчатьс я ідентифікувати ознаки некоректної роботи обладнання (наприклад, прорив рукава фільтра, забивання форсунок скрубєра, кавітація в насосах або «спухання» активного мулу).

2. Сценарії аварійних ситуацій: розгляд алгоритмів дій при раптових змінах навантаження на систему або виході вузлів з ладу.

3. Експлуатаційна стійкість: обґрунтування технічних рішень, що дозволяють запобігти аваріям ще на етапі проєктування.

У результаті виконання робіт студент має навчитися:

1. проводити технологічні розрахунки природоохоронних систем;

2. користуватися сучасним ПЗ для перевірки проєктних рішень;

3. аналізувати причини відмов обладнання та розробляти заходи з їх попередження.

Методичні вказівки стануть корисними для формування професійних компетенцій інженера-еколога, здатного не лише



спроєктувати систему, а й гарантувати її ефективну та безаварійну роботу протягом усього життєвого циклу.

Академічна політика та визнання результатів
Оцінювання та апеляція:

1. Оскарження. Студент має право оскаржити оцінки згідно з Положенням про організацію освітнього процесу та Положенням про врегулювання конфліктів Метінвест Політехніки (<https://metinvest.university/page/managementcard>) .

2. Покращення оцінок. Бали за практичні заняття є остаточними (крім процедури оскарження). Оцінки за інші види контролю можуть бути покращені згідно положення про організацію освітнього процесу Метінвест Політехніки (<https://metinvest.university/page/managementcard>)

Визнання результатів навчання (перезарахування):

1. Обов'язкові дисципліни. Якщо результати за цією програмою були здобуті раніше, кредити можуть бути перезараховані (звертайтеся до викладача чи завідувача кафедри).

2. Вибіркові дисципліни. Перезарахування не здійснюється, навіть якщо курс вивчався раніше.

3. Неформальна освіта (Coursera, Udemy тощо): Сертифікати релевантних онлайн-курсів (після погодження з викладачем) можуть бути зараховані як оцінка за відповідний вид контролю.

4. Наукова діяльність: Тези, статті або участь в олімпіадах можуть бути зараховані як поточний або підсумковий контроль (звертайтеся до уповноважених осіб кафедри).



ПРАКТИЧНА РОБОТА 1 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЦИКЛОНІВ, БАТАРЕЙНИХ УСТАНОВОК ТА МУЛЬТИЦИКЛОНІВ

МЕТА РОБОТИ:

Навчитися здійснювати інженерний вибір та розрахунок апаратів відцентрового очищення газів (поодиноких, батарейних та мультициклонів) залежно від об'єму викидів, характеристик пилу та необхідного ступеня очищення.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

Циклони — це інерційні пиловловлювачі, в яких розділення фаз відбувається за рахунок відцентрових сил, що виникають при обертанні газового потоку. Робота циклона базується на використанні відцентрової сили, що виникає при обертанні газопилового потоку. Газ входить в апарат тангенціально (через боковий патрубок), що змушує його рухатися спіралью вниз вздовж стінок корпусу. Частки пилу, які мають значно більшу масу, ніж молекули газу, під дією відцентрової сили притискаються до стінок, втрачають швидкість через тертя і під дією сили тяжіння опускаються в бункер. Очищений газ у центрі апарата змінює напрямок і виходить вертикально вгору через вихлопну трубу.

Ефективність очищення прямо залежить від величини відцентрової сили (F_c):

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (1.1)$$

де m — маса частки, v — швидкість, r — радіус обертання.

Чим менший радіус (діаметр) циклона, тим більша сила діє на частку і тим ефективніше апарат вловлює дрібний пил.

Класифікація групових установок:

– Поодинокі циклони: Мають діаметр від 200 до 2000-3000 мм. Проте при $D > 1000$ мм ефективність різко падає через турбулентні завихрення.

– Батарейні (групові) циклони: Об'єднують декілька циклонів середнього діаметра (напр. 4 циклони ЦН-15 діаметром 500 мм). Це дозволяє обробити великий об'єм газу, зберігаючи високу ефективність кожного окремого елемента.

– Мультициклони (БЦ): Складаються з десятків або сотень циклонних елементів малого діаметра (100, 150, 250 мм). У мультициклонах замість тангенціального входу часто використовують напрямні апарати типу «гвинт» або «розетка» для закручування потоку.



Рисунок 1.1- Батарейні циклони

Алгоритм розрахунку.

1. Вибір типу апарата: Залежно від властивостей пилу (абразивність, злипаність) обирається серія циклона.

2. Визначення оптимальної швидкості ($V_{\text{опт}}$): Для більшості циклонів ЦН це 2.5–3.5 м/с.

3. Розрахунок необхідної площі перерізу: $F = Q / (3600 \cdot V_{\text{опт}})$, де Q — витрата газу ($\text{m}^3/\text{год}$).

4. Визначення кількості елементів (n): * Для поодинокого: $n=1$. Для мультициклона: $n = F / f_{\text{ел}}$, де $f_{\text{ел}}$ — площа перерізу одного малого елемента.


5. Розрахунок ефективності (η): Використовується ймовірнісний метод через параметри d_{50} (розмір часток, що вловлюються на 50%).

6. Гідравлічний опір (ΔP): Визначається за формулою $\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$, де ζ — коефіцієнт опору.

Підбір батарейних та мультициклонів в інженерній практиці здійснюється згідно з галузевими стандартами та нормативними методиками (наприклад, методики НДІОГАЗ). Основний принцип — це перехід від теоретичних розрахунків до вибору конкретного типорозміру з ряду стандартних апаратів.

Покроковий лістинг того, як здійснюється цей підбір:

А. Вибір серії апарата за фізико-хімічними стандартами



Першим кроком є вибір серії (типу) циклона залежно від властивостей пилу та вимог до очищення:

- Серія ЦН-11: Висока ефективність, призначена для сухого неабразивного пилу. Рекомендується для встановлення перед фільтрами тонкого очищення.

- Серія ЦН-15: Найбільш універсальний стандарт. Оптимальний баланс між опором та ефективністю. Використовується для більшості видів промислового пилу.

- Серія ЦН-24: Має найбільшу пропускну здатність при низькому опорі, але низьку ефективність. Підходить для грубого попереднього очищення.

- Серія БЦ (Мультициклони): Використовується для великих об'ємів димових газів (котельні, ТЕС) з метою компактного розміщення обладнання.

Б. Визначення оптимальної швидкості (Стандартні значення)

Для кожного стандарту циклонів існують рекомендовані швидкості в перерізі корпусу ($V_{\text{опт}}$), які забезпечують паспортну ефективність:

- Для циклонів ЦН-11: $V_{\text{опт}} = 3,5$ м/с.

- Для циклонів ЦН-15: : $V_{\text{опт}} = 3,5$ м/с (допускається діапазон 2.5–4.0 м/с).

- Для циклонів ЦН-24: : $V_{\text{опт}} = 4,5$ м/с.

- Для мультициклонів БЦ (елементів): $\omega = 3,5 - 4,5$ м/с.

В. Підбір діаметра та компоновки батарейної установки

Коли загальна площа перерізу F розрахована, здійснюється підбір за стандартним рядом діаметрів:

- Ряд стандартних діаметрів (мм): 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400.

- Правило компоновки. Якщо розрахунковий діаметр перевищує 800–1000 мм, стандарт рекомендує переходити на батарейну установку.

- Типові схеми батарей. Кількість циклонів у групі зазвичай обирається парною для симетрії потоку: 2, 4, 6 або 8 одиниць у загальному корпусі з єдиним бункером.

Г. Особливості підбору мультициклонів (тип БЦ)

Підбір мультициклона за стандартами відрізняється тим, що ми обираємо не діаметр корпусу, а кількість стандартних елементів:

Стандартні елементи: Найчастіше це литі чавунні елементи діаметром 150 мм або 250 мм. Вибір закручувального пристрою:

- «Розетка» (кут лопаток 25° або 30°): Обирається за стандартом для незлипливого пилу та газу з низькою вологістю.

– «Гвинт» (2-західний): Обирається для газів, що мають схильність до утворення відкладень, оскільки такий пристрій менше забивається.

Конфігурація: Кількість елементів у корпусі підбирається так, щоб заповнити прямокутну або квадратну решітку апарата (наприклад, 10x10, 12x15 елементів).

Д. Перевірка за допустимим опором (ΔP)

Після підбору конкретної моделі за каталогом, обов'язково проводиться перевірка за гідравлічним опором: за стандартом, опір циклона не повинен перевищувати 1200–1500 Па; якщо розрахований опір вищий, необхідно збільшити кількість елементів або обрати більший діаметр, щоб знизити швидкість газу.

Е. Стандартні вимоги до вивантаження (Бункери)

Кут нахилу стінок бункера, має бути не менше 55–60° для забезпечення самопливу пилу.

Герметичність. Стандарт вимагає встановлення шлюзових затворів (роторних живильників) або клапанів-мигалок, щоб уникнути підсмоктування повітря, яке руйнує вихор усередині циклона.

Приклад розрахунку батарейної установки циклонів

Вихідні дані:

Витрата газу: $Q = 18\,000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Температура газу: $T = 90^\circ\text{C}$

Тип пилу: Цементний (густина $\rho_p = 2800 \text{ кг}/\text{м}^3$).

Початкова запиленість: $C_{\text{поч}} = 30 \text{ г}/\text{м}^3$.

Обраний тип: ЦН-15 (групова установка з 4-х циклонів).

Крок 1. Розрахунок витрати газу при робочих умовах

Оскільки витрата зазвичай дається для нормальних умов, перерахуємо її для робочої температури 90°C

$$Q_t = Q \cdot \frac{273 + T}{273} = 18000 \cdot \frac{363}{273} \approx 23034 \text{ м}^3/\text{год} \quad (1.2)$$

Крок 2. Визначення площі перерізу та діаметра

Оптимальна швидкість для циклонів ЦН-15 становить $V_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м}/\text{с}$.

Загальна необхідна площа перерізу

$$F_{\text{заг}} = \frac{Q_t}{3600 \cdot V_{\text{опт}}} = \frac{23934}{3600 \cdot 3,5} \approx 1,9 \text{ м}^2 \quad (1.3)$$

Площа одного циклона (в групі з 4-х)

$$f = \frac{F_{\text{заг}}}{n} = \frac{1,9}{4} = 0,475 \text{ м}^2 \quad (1.4)$$

Розрахунковий діаметр одного циклона

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot f}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,475}{3,14}} \approx 0,777 \text{ м} \rightarrow 800 \text{ мм (стандартний розмір)} \quad (1.5)$$

Крок 3. Перевірка фактичної швидкості

$$V_{\text{фак}} = \frac{Q_t}{3600 \cdot n \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)} = \frac{2394}{3600 \cdot 4 \cdot 0,502} \approx 3,3 \text{ м/с} \quad (1.6)$$

(В межах норми 2.5–4.0 м/с).

Крок 4. Розрахунок втрати тиску (ΔP)

Для ЦН-15 коефіцієнт опору $\zeta \approx 155$. Густина газу при 90°C: $\rho_g \approx 0,97 \text{ кг/м}^3$.

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho_g \cdot V_{\text{фак}}^2}{2} = 155 \cdot \frac{0,97 \cdot 3,3^2}{2} \approx 818 \text{ Па} \quad (1.7)$$

Крок 5. Оцінка ефективності (η)

Для цементного пилу в циклоні ЦН-15 діаметром 800 мм табличне значення ступеня очищення становить приблизно 90–94%. Кінцева концентрація пилу

$$C_{\text{кін}} = C_{\text{поч}} \cdot (1 - \eta) = 30 \cdot (1 - 0,92) = 2,4 \text{ г/м}^3 \quad (1.8)$$

Приклад розрахунку мультициклона типу БЦ

Вихідні дані:

Витрата газу: $Q = 120\,000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Температура газу: $T = 140^\circ\text{C}$

Пил: Летюча зола вугілля ($\rho_p = 2300 \text{ кг/м}^3$).

Тип елементів: «Розетка» (кут 25° , діаметр елемента $d = 250 \text{ мм}$).

Оптимальна швидкість газу в елементі: $\omega_{\text{опт}} = 4,5 \text{ м/с}$

Крок 1. Витрата газу за робочих умов

$$Q_t = Q \cdot \frac{273 + T}{273} = 120000 \cdot \frac{413}{273} \approx 181538 \text{ м}^3/\text{год} \quad (1.9)$$

Переведемо в $\text{м}^3/\text{с}$: $181538 / 3600 \approx 50.43 \text{ м}^3/\text{с}$.

Крок 2. Розрахунок одного циклонного елемента

Площа живого перерізу одного елемента діаметром 250 мм (з урахуванням вихлопної труби та лопаток):

Для $d=250 \text{ мм}$, площа кільцевого зазору зазвичай становить $f_{\text{зав}} \approx 0,038 \text{ м}^2$. Пропускна здатність одного елемента

$$q_1 = f_{\text{зав}} \cdot \omega_{\text{опт}} = 0,038 \cdot 4,5 = 0,171 \text{ м}^3/\text{с} \quad (1.10)$$

Крок 3. Визначення кількості елементів

Необхідна кількість елементів:

$$n = \frac{Q_t}{q_1} = \frac{50,43}{0,171} \approx 295 \text{ шт} \quad (1.11)$$

Обираємо стандартний типорозмір мультициклона БЦ з найближчою кількістю елементів (наприклад, секційна установка з кількох блоків, де сумарна кількість $n = 300$).

Крок 4. Уточнення фактичної швидкості

$$V_{\text{фак}} = \frac{50,43}{300 \cdot 0,038} \approx 4,42 \text{ м/с} \quad (1.12)$$

(Швидкість у межах допустимого діапазону 3.5–5.0 м/с).

Крок 5. Гідравлічний опір (ΔP)

Коефіцієнт опору для елемента «розетка 25°» становить $\zeta \approx 85$.

Густина газу при 140°C: $\rho_g = 1,293 \cdot \frac{273}{413} \approx 0.855 \text{ кг/м}^3$.

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{\rho_g \cdot V_{\text{фак}}^2}{2} = 85 \cdot \frac{0,855 \cdot 4,42^2}{2} \approx 710 \text{ Па} \quad (1.13)$$

Крок 6. Оцінка ступеня очищення

Завдяки малому діаметру елементів (250 мм) мультициклон забезпечує ефективність:

- для пилу розміром $> 10 \text{ мкм}$: $\eta = 95\%$.
- загальна ефективність для золи: $\eta = 90 - 92\%$.
-

Таблиця 1.1-Порівняльна таблиця циклонів

Параметр	Поодинокий циклон	Батарейна установка	Мультициклон (БЦ)
Діаметр елемента	400–2000 мм	300–800 мм	100–250 мм
Ефективність ($d > 5 \text{ мкм}$)	Середня	Висока	Дуже висока
Схильність до забивання	Низька	Середня	Висока
Застосування	Малі котельні, ДОК	Промислові цехи	Великі ТЕС, заводи

ЗАВДАННЯ:

Для заданих умов обрати тип установки (поодинокий, груповий або мультициклон), розрахувати його геометричні розміри, кількість елементів та підсумкову ефективність очищення.

Таблиця 1.2-Вихідні дані за варіантами

Варіант	Витрата повітря Q, м ³ /год	Тип пилу	Початкова концентр. С _п , г/м ³	Температура Т, °С	Рекомендований тип апарата
1	4 200	Деревна тирса	12.0	25	Поодинокий ЦН-15
2	18 000	Цементний пил	45.0	80	Батарейна уст. (4 шт)
3	110 000	Летюча зола	25.0	160	Мультициклон БЦ
4	2 500	Кварцовий пісок	60.0	30	Поодинокий ЦН-11
5	24 000	Глина (суха)	35.0	50	Батарейна уст. (6 шт)
6	145 000	Вугільний пил	50.0	120	Мультициклон БЦ
7	6 800	Магнезит	15.0	40	Поодинокий ЦН-24
8	32 000	Абразивний пил	20.0	65	Батарейна уст. (4 шт)
9	95 000	Шлак металургійний	40.0	250	Мультициклон БЦ
10	3 100	Вапняк	18.0	20	Поодинокий ЦН-15
11	21 000	Тальк	8.0	35	Батарейна уст. (2 шт)
12	180 000	Пилоподібне паливо	100.0	140	Мультициклон БЦ
13	5 500	Гранітна крихта	25.0	45	Поодинокий ЦН-11
14	28 000	Коксовий пил	30.0	110	Батарейна уст. (8 шт)
15	75 000	Сажа (незлиплива)	5.0	100	Мультициклон БЦ



 **Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)**

Аналіз виробничих ситуацій «Проблема — Причина — Рішення». Розвиває навички критичного мислення та навчити студентів швидко ідентифікувати несправності в роботі систем пиловловлювання та знаходити оптимальні інженерні рішення.

Таблиця 1.3- Таблиця розбору типових ситуацій

№	Проблема (Симптом)	Ймовірна причина	Інженерне рішення
1	Різде зниження ефективності очищення (видимий викид пилу)	Підсмоктування зовнішнього повітря через бункер або розвантажувальний затвор.	Перевірити герметичність бункера та справність шлюзового затвора («мигалки»).
2	Підвищення гідравлічного опору (ΔP) понад розрахунковий	Забивання вхідного патрубка або самих циклонних елементів (особливо в мультициклонах).	Провести механічне очищення апарата; перевірити вологість газу.
3	Швидкий абразивний знос стінок циклона (протирання корпусу)	Занадто висока вхідна швидкість або висока концентрація гострокутного пилу.	Встановити захисне футерування (кераміка, зносостійка сталь) або знизити швидкість.
4	Пил у бункері стає вологим, «цементується»	Температура газу в циклоні впала нижче «точки роси», випав конденсат.	Утеплити корпус циклона (теплоізоляція) або встановити систему електрообігріву.
5	Проскок великих часток пилу в очищений газ	Руйнування або відрив внутрішньої вихлопної труби через корозію чи вібрацію.	Провести дефектоскопію внутрішніх вузлів та замінити пошкоджені елементи.
6	Нерівномірне забивання елементів мультициклона	Неправильний розподіл газового потоку по секціях апарата.	Встановити або відрегулювати напрямні лопатки у вхідній камері.

Кейс-тренінг:  **Розбір критичних ситуацій**

Ситуація А: «Ефект зворотного винесення»

Опис. Після встановлення нового потужного вентилятора за циклоном, ефективність очищення впала, хоча розрахункова швидкість



в нормі. При огляді бункера з'ясувалося, що пил не накопичується, а «вирує» в ньому.

– Причина. Через надмірне розрідження в системі та мікротріщини в бункері створюється потужний висхідний потік повітря, який підхоплює вже вловлений пил і виносить його у вихлопну трубу.

– Рішення. Повна герметизація бункера. Перевірка щільності фланцевих з'єднань.

Ситуація Б. «Проблема мультициклона БЦ»

Опис. На ТЕС мультициклон з елементами «розетка» почав працювати зі значними перепадами тиску кожні 2 тижні. Після зупинки з'ясувалося, що лопатки «розеток» забиті дрібним пилом.

– Причина. Пил має високу адгезію (липкість), а конструкція «розетки» через велику кількість лопаток сприяє його накопиченню.

– Рішення. Заміна елементів типу «розетка» на елементи типу «гвинт» (2-західний гвинт менше схильний до забивання) або встановлення системи пневмоочищення лопаток.

Ситуація В. «Абразивний знос»

Опис. При очищенні повітря від кварцового піску (варіант №4) нижній конус циклона протерся до дірок за 3 місяці експлуатації.

– Причина. Висока тангенціальна швидкість часток біля стінок конуса.

– Рішення. Заміна матеріалу конуса на сталь марки 09Г2С або наплавка твердосплавними матеріалами. Збільшення товщини стінки конуса до 8-10 мм.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Яка фізична сила є основною для розділення фаз у циклонних апаратах?

- А) Сила Коріоліса.
- Б) Відцентрова сила.
- В) Електростатична сила.
- Г) Магнітна сила.

2. Як зміна діаметра циклона (D) впливає на ефективність вловлювання дрібнодисперсного пилу?

- А) Зі збільшенням діаметра ефективність зростає.
- Б) Зі збільшенням діаметра ефективність зменшується.
- В) Ефективність не залежить від діаметра, лише від висоти апарата.
- Г) Ефективність залежить тільки від матеріалу стінок.

3. У чому полягає основна перевага батарейних циклонів перед одним поодиноким циклоном великого діаметра?

- А) Можливість очищення газів з температурою понад 1000°С.



Б) Збереження високої ефективності очищення при великих об'ємах газу за рахунок малих діаметрів окремих елементів.

В) Повна відсутність гідравлічного опору.

Г) Можливість вловлювання газів, що розчиняються у воді.

4. Який закручувальний пристрій мультициклону (БЦ) краще використовувати для газів, що мають схильність до утворення відкладень (липкий пил)?

А) «Розетка» з кутом 25° .

Б) «Гвинт» (2-західний).

В) Тангенціальний підвід «равлик».

Г) Перфорована сітка.

5. Який наслідок матиме негерметичність пилового бункера (підсмоктування повітря знизу)?

А) Різке зростання гідравлічного опору.

Б) Значне зниження ефективності очищення через винесення пилу в очищений газ.

В) Охолодження газу та покращення роботи апарата.

Г) Збільшення терміну служби обладнання.

6. Яка швидкість газу в перерізі корпусу циклонів серії ЦН вважається оптимальною за стандартами НДІОГАЗ?

А) 0.5 – 1.0 м/с.

Б) 3.5 – 4.5 м/с.

В) 15 – 20 м/с.

Г) Понад 50 м/с.

7. Що відбувається у мультициклоні, якщо рівень пилу в бункері перевищує допустиму норму (2/3 об'єму)?

А) Автоматично вмикається система регенерації.

Б) Починається вторинне винесення пилу («залповий викид») у вихлопну трубу.

В) Газ починає рухатися у зворотному напрямку.

Г) Тиск у системі падає до нуля.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Левандовський Л. В., Бублієнко Н. О., Семенова О. І. Природоохоронні технології та обладнання : підруч. Київ : НУХТ, 2013. 243 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f56ff878-efc9-41ec-bb4e-3c354bb664df>

2. Цейтлін М. А. Проектування природоохоронних комплексів з використанням САПР : навч. посіб./ М. А. Цейтлін, В. Ф. Райко, М. В. Бойко, О. В. Шестопапов. Харків : НТУ «ХПІ». 2013. 224 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi80/0060196.pdf>



ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР РУКАВНОГО ФІЛЬТРА ДЛЯ ТОНКОГО ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ

МЕТА РОБОТИ:

Навчитися обґрунтовано обирати фільтрувальні матеріали, розраховувати площу фільтрації та параметри системи регенерації для забезпечення високого ступеня очищення атмосферного повітря.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА :

Принцип дії. Очищення відбувається при проходженні запиленого газу крізь тканину. Пил затримується завдяки ефектам сита, інерційного зіткнення, дифузії та електростатичного притягання. Найважливішу роль відіграє «первинний шар» пилу, який осідає на тканині та сам стає фільтром.




Рисунок 2.1- Рукавний фільтр

Конструкція. Фільтр складається з корпусу, в якому підвішені тканинні рукави (циліндри). Газ зазвичай проходить ззовні всередину (рукав тримається на металевому каркасі) або зсередини назовні.

Системи регенерації (очищення тканини):

- Механічне струшування: Найпростіший, але застарілий метод.
- Зворотна продувка. Потік чистого повітря подається у зворотному напрямку.
- Імпульсна продувка. Сучасний стандарт. Стиснене повітря під високим тиском подається всередину рукава короткими імпульсами (0,1–0,2 сек), що скидає пил.



Фільтрувальні матеріали. Обираються залежно від температури та хімічної агресивності газів (поліестер — до 130–150°C, скловолокло або тефлон — до 250–280°C).

2. Алгоритм розрахунку рукавного фільтра

A. Визначення швидкості фільтрації ($V_{\text{філ}}$): Це найважливіший параметр (м/хв). Для дрібного пилу вона зазвичай становить 0,5–1,2 м/хв.

B. Розрахунок загальної площі фільтрації ($F_{\text{філ}}$):

$$F_{\text{філ}} = \frac{Q}{60 \cdot V_{\text{філ}}}, \quad (2.1)$$

де Q — витрата газу (м³/год).

C. Вибір розмірів рукава: Стандартні рукави мають діаметр $d = 135$ або 160 мм та довжину $L = 2.5, 3, 6$ м.

D. Розрахунок площі одного рукава (f_1)

$$f_1 = \pi \cdot d \cdot L \quad (2.2)$$

E. Визначення кількості рукавів (n): $n = \frac{F_{\text{філ}}}{f_1}$. Кількість зазвичай округлюють до парного числа або до кратності рядам у корпусі фільтра.

3. Приклад розрахунку рукавного фільтра

Вихідні дані:

Витрата запиленого повітря: $Q = 12\,000$ м³/год.

Тип пилу: Деревний пил (дрібнодисперсний).

Температура газу: $T = 20^\circ\text{C}$

Режим роботи: Безперервний, з імпульсною регенерацією.

Крок 1: Вибір швидкості фільтрації ($V_{\text{філ}}$)

Швидкість фільтрації (навантаження газу на тканину) обирається за довідковими даними залежно від типу пилу та способу регенерації. Для деревного пилу та фільтра з імпульсною продувкою рекомендована швидкість становить:

$$V_{\text{філ}} = 0.8 \text{ м/хв}$$

Крок 2: Розрахунок необхідної площі фільтрації ($F_{\text{філ}}$)

Площа розраховується як відношення об'ємної витрати газу до швидкості фільтрації (важливо перевести одиниці часу)

$$F_{\text{філ}} = \frac{Q}{60 \cdot V_{\text{філ}}} = \frac{12000}{60 \cdot 0.8} = 250 \text{ м}^2 \quad (2.3)$$

Крок 3: Вибір параметрів фільтрувального рукава

Обираємо стандартні геометричні розміри рукава, що є найбільш поширеними в промисловості:

– Діаметр рукава: $D = 0.13$ м (130 мм).

– Довжина рукава: $L = 3.0$ м.

Крок 4: Розрахунок площі поверхні одного рукава (f_1)

Площа розраховується як площа бічної поверхні циліндра

$$f_1 = \pi \cdot d \cdot L = 3,1415 \cdot 0,13 \cdot 3,0 \approx 1,225 \text{ м}^2 \quad (2.4)$$

Крок 5: Визначення необхідної кількості рукавів (n)

$$n = \frac{F_{\text{філ}}}{f_1} = \frac{250}{1,225} \approx 204,08 \text{ шт} \quad (2.5)$$

Округляємо до найближчого більшого цілого числа, зручного для компонування в корпусі (наприклад, кратне 10 або рядам у решітці).
Приймаємо $n = 210$ шт.

Крок 6: Перевірка фактичної швидкості фільтрації

З урахуванням округлення кількості рукавів, фактична швидкість буде:

$$F_{\text{фак}} = n \cdot f_1 = 210 \cdot 1,225 = 257,25 \text{ м}^2 \quad (2.6)$$

$$V_{\text{фак}} = \frac{Q}{60 \cdot F_{\text{фак}}} = \frac{12000}{60 \cdot 257,25} \approx 0,77 \text{ м/хв} \quad (2.7)$$

Оскільки $V_{\text{фак}} < V_{\text{філ}}$, обрана кількість рукавів забезпечує надійну роботу фільтра.

Крок 7: Розрахунок масового балансу (ефективність)

Припустимо, вхідна концентрація пилу $C_{\text{вхід}} = 10 \text{ г/м}^3$.

Ефективність рукавного фільтра становить $\eta = 99.9 \%$.

1. Маса пилу на вході: $M_{\text{вхід}} = Q \cdot C_{\text{вхід}} = 12000 \cdot 10 = 120 \text{ кг/год}$
2. Маса вловленого пилу: $M_{\text{влов}} = M_{\text{вхід}} \cdot 0,999 = 119,88 \text{ кг/год}$
3. Концентрація на виході: $C_{\text{кін}} = C_{\text{вхід}} \cdot (1 - 0,999) = 10 \cdot 0,001 = 10 \text{ мг/м}^3$. Результат 10 мг/м^3 відповідає найсуворішим екологічним нормам.

При виборі довжини рукава пам'ятайте про габарити приміщення. Якщо висота цеху обмежена, краще обрати більшу кількість коротких рукавів (2.5 м), ніж меншу кількість довгих (6 м).

ЗАВДАННЯ:

1. Розрахувати загальну площу фільтрувальної поверхні.
2. Визначити кількість рукавів та їхні геометричні розміри.
3. Підібрати матеріал фільтра (поліестер, скловолокно тощо) залежно від температури.

Вхідні дані: Витрата газу, температура викидів, дисперсність пилу.

Таблиця 2.1- Завдання для виконання практичної роботи

Варіант	Витрата повітря Q, м ³ /год	Тип пилу	Температура T, °C	Початкова C _{вихід} , г/м ³
1	2 800	Цементний пил	20	5.0
2	15 000	Металургійний дим	180	2.5
3	8 500	Борошномельне вироб.	30	15.0
4	45 000	Зола ТЕС	160	10.0
5	5 200	Тютюновий пил	25	1.0
6	22 000	Виробництво добрив	90	20.0
7	3 500	Деревний пил	20	8.0
8	60 000	Вапняковий пил	110	35.0
9	12 000	Фармацевт. порошок	25	0.5
10	38 000	Пил сміттєспалюв. з-ду	220	12.0
11	1 800	Порошкове фарбування	20	3.0
12	28 000	Сажа з печей	200	6.0
13	7 000	Виробництво кормів	40	18.0
14	55 000	Шихта (склозавод)	70	25.0
15	9 500	Гранітний пил	30	10.0



Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)

Аналіз ситуацій «Проблема — Причина — Рішення»

Проблема 1: Стрімке зростання опору фільтра (диференційний тиск зашкалює).


Причина: Відмова системи регенерації (заклинювання клапанів стисненого повітря або поломка контролера).

Рішення: Перевірити тиск у ресивері стисненого повітря та справність електромагнітних клапанів.

Проблема 2: Поява пилу в чистому повітрі на виході з фільтра.

Причина: Механічне пошкодження (прорив) одного або кількох рукавів.

Рішення: Визначити пошкоджений рукав (за допомогою лазерного датчика пилу або візуально) та замінити його або тимчасово заглушити.



Проблема 3: Тканина рукавів стала вологою та «зацементувалася».

Причина: Температура газу впала нижче «точки роси», волога ввібралася в пил на тканині.

Рішення: Забезпечити підігрів корпусу фільтра та теплоізоляцію. Провести «суху» очистку або заміну рукавів.

Проблема 4: Швидкий знос нижньої частини рукавів.

Причина: Абразивний пил при вході у фільтр б'є безпосередньо по рукавах (відсутність відбійної пластини).

Рішення: Встановити вхідний дефлектор або відбійний екран, що перенаправляє потік вниз.

Проблема 5: Імпульс стисненого повітря є, але очищення неефективне.

Причина: Занадто висока швидкість фільтрації ($V_{\text{філ}}$) — пил «вбивається» занадто глибоко в пори тканини.

Рішення: Зменшити навантаження на фільтр (додати додаткові секції) або змінити тип фільтрувального матеріалу на мембранний (PTFE).

Проблема 6: Рукави «схлопуються» та злипаються між собою.

Причина: Поломка або відсутність внутрішніх підтримуючих каркасів (кошиків).

Рішення: Встановити або замінити металеві каркаси.

Проблема 7 (Критична): Займання всередині фільтра.

Причина: Вловлювання іскри від обладнання або самозаймання органічного пилу.

Рішення: Встановити іскрогасник перед фільтром та систему пожежогасіння CO₂. Використовувати антистатичні тканини.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Який тип регенерації є найефективнішим для сучасних рукавних фільтрів?

- А) Ручне витрушування.
- Б) Імпульсна продувка стисненим повітрям.
- В) Промивання водою.
- Г) Ультразвукова вібрація.

2. Від чого насамперед залежить вибір матеріалу фільтра (поліестер, тефлон, скловолокно)?

- А) Від кольору пилу.
- Б) Від температури газу та його хімічного складу.
- В) Від висоти будівлі цеху.
- Г) Від швидкості обертання вентилятора.



3. Що таке «швидкість фільтрації» ($V_{\text{філ}}$)?
- А) Швидкість обертання вала двигуна.
 - Б) Об'єм газу, що проходить через одиницю площі тканини за одиницю часу.
 - В) Час, за який пил падає в бункер.
 - Г) Швидкість звуку в стисненому повітрі.
4. Навіщо всередину рукавів вставляють металеві каркаси?
- А) Для кращої провідності електрики.
 - Б) Щоб рукав не стискався під дією зовнішнього тиску газу.
 - В) Для нагрівання тканини.
 - Г) Щоб фільтр був важчим.
5. Який максимальний ступінь очищення зазвичай забезпечують рукавні фільтри?
- А) 50–60%.
 - Б) 80–85%.
 - В) 99.0–99.9%.
 - Г) Тільки 100%.
6. Яка ознака вказує на прорив фільтрувального рукава?
- А) Зростання тиску в системі.
 - Б) Зменшення концентрації пилу на виході.
 - В) Поява запиленого «хвоста» з вихлопної труби.
 - Г) Посилення шуму від вентилятора.
7. Що таке «точка роси» і чому вона небезпечна для рукавного фільтра?
- А) Температура, при якій пил починає світитися.
 - Б) Температура конденсації вологи, що призводить до налипання пилу на тканину.
 - В) Момент, коли потрібно замінити бункер.
 - Г) Найвища точка на корпусі фільтра.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Левандовський Л. В., Бублієнко Н. О., Семенова О. І. Природоохоронні технології та обладнання : підруч. Київ : НУХТ, 2013. 243 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f56ff878-efc9-41ec-bb4e-3c354bb664df>
2. Цейтлін М. А. Проектування природоохоронних комплексів з використанням САПР : навч. посіб. / М. А. Цейтлін, В. Ф. Райко, М. В. Бойко, О. В. Шестопапов. Харків : НТУ «ХПІ». 2013. 224 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi80/0060196.pdf>

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СКРУБЕРА ВЕНТУРІ ДЛЯ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

МЕТА РОБОТИ:

Вивчити принцип роботи апаратів мокрого очищення, навчитися розраховувати геометричні параметри труби Вентурі та визначати оптимальну витрату зрошувальної рідини.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

А. Принцип дії. Скрубер Вентурі базується на використанні енергії газового потоку для розпилення рідини. У конфузорі (звужуваній частині) швидкість газу зростає, досягаючи піку в горловині (60–150 м/с). Тут подається вода, яка під дією швидкісного напору розбивається на дрібні краплі. Частки пилу стикаються з краплями завдяки інерції та вловлюються ними.

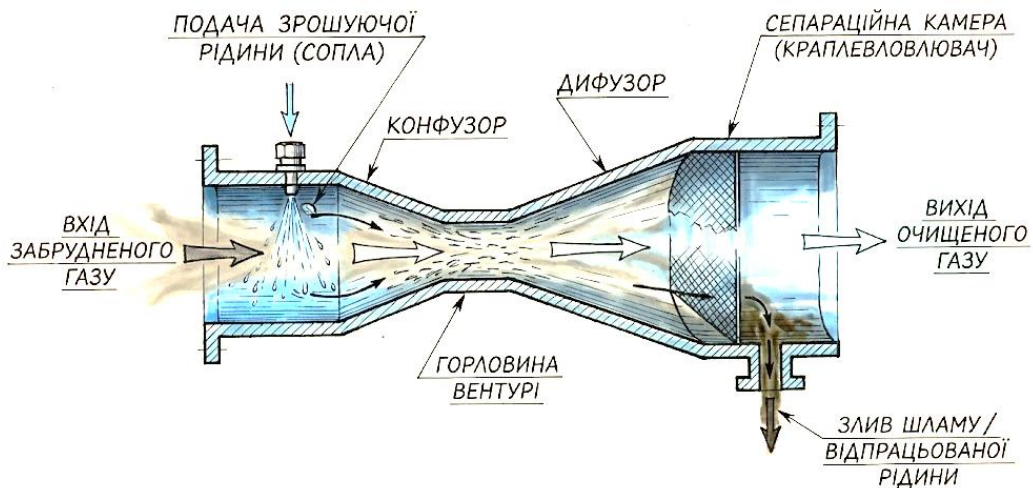


Рисунок 3.1- Скрубер Вентурі для мокрого очищення газів

В. Форсунки для подачі рідини.

С. Краплевловлювач (найчастіше — прямоточний або відцентровий циклон) для відділення забруднених крапель від чистого газу.

Переваги. Висока ефективність вловлювання дрібного пилу (0.5–1 мкм), можливість одночасного охолодження газу та абсорбції шкідливих домішок.

Недоліки. Високі витрати енергії на створення перепаду тиску та необхідність очищення стічних вод (шламу).

Алгоритм розрахунку

А. Визначення робочої витрати газу ($Q_{\text{вит}}$): Враховується температура газу на вході.

В. Вибір швидкості газу в горловині ($v_{\text{гор}}$): Обирається в межах 60–120 м/с залежно від необхідної ефективності (чим дрібніший пил, тим вища швидкість).

С. Розрахунок площі перерізу горловини ($f_{\text{гор}}$)

$$f_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{вит}}}{3600 \cdot v_{\text{гор}}} \quad (3.1)$$

Д. Визначення діаметра горловини ($d_{\text{гор}}$)

$$d_{\text{гор}} = \sqrt{\frac{4 \cdot f_{\text{гор}}}{\pi}} \quad (3.2)$$

Е. Розрахунок витрати води ($Q_{\text{вод}}$). Визначається через питому витрату рідини m (зазвичай 0.5–1.5 літрів на 1 м³ газу)

$$Q_{\text{вод}} = Q_{\text{вит}} \cdot m \quad (3.3)$$

Ф. Оцінка перепаду тиску (ΔP). Залежить від швидкості газу та питомого зрошення.

Приклад розрахунку скрубера Вентурі

Вихідні дані:

Витрата газу: $Q = 15\,000 \text{ м}^3/\text{год}$

Температура газу на вході: $T = 180^\circ\text{C}$

Обрана швидкість газу в горловині: $v_{\text{гор}} = 80 \text{ м/с}$.

Питоме зрошення: $m = 1.0 \text{ л/м}^3$.

Рішення.

Крок 1: Розрахунок витрати газу при робочій температурі

$$Q_t = Q \cdot \frac{273 + T}{273} = 15000 \cdot \frac{453}{273} \approx 24890 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.4)$$

У метрах за секунду: $Q_{\text{сек}} = 24890/3600 \approx 6.91 \text{ м}^3/\text{с}$

Крок 2: Розрахунок площі перерізу горловини ($f_{\text{гор}}$)

$$f_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{сек}}}{v_{\text{гор}}} = \frac{6,91}{80} \approx 0,0864 \text{ м}^2 \quad (3.5)$$

Крок 3: Визначення діаметра горловини ($d_{\text{гор}}$)

$$d_{\text{гор}} = \sqrt{\frac{4 \cdot f_{\text{гор}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0864}{3,14}} \approx 0,332 \text{ м} \rightarrow 332 \text{ мм} \quad (3.6)$$

Крок 4: Розрахунок загальної витрати води ($Q_{\text{вит}}$)

$$Q_{\text{вит}} = Q_t \cdot m = 24890 \cdot 1,0 = 24 \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.7)$$

Крок 5: Розрахунок масового балансу (шламу)



Якщо початкова запиленість $C_{\text{зап}} = 20 \text{ г/м}^3$, а ефективність $\eta = 98\%$:

1. Маса пилу, що вловлюється

$$M = Q_t \cdot C_{\text{зап}} \cdot 0,98 = 24,89 \cdot 20 \cdot 0,98 = 487,8 \text{ кг/год} \quad (3.8)$$

Концентрація пилу в шламi (водi): $487.8/24.9 \approx 19.6 \text{ кг/м}^3$ \ (або $\approx 2\%$). Це значення важливо для розрахунку насосів та систем відстоювання води.

ЗАВДАННЯ:

1. Обрати вихідну витрату газу (Q) та задайте швидкість у горловині ($v = 60\text{--}120 \text{ м/с}$).

2. Розрахувати діаметр горловини та довжину її основних частин (конфузора, дифузора).

3. Визначити необхідну витрату води для зрошення та гідравлічний опір апарата (ΔP).

Варіанти завдань знаходяться в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1- Варіанти завдань для розрахунку

Варіант	Витрата повітря Q , $\text{м}^3/\text{год}$	Тип пилу / домішки	Температура T , $^{\circ}\text{C}$	Питоме зрошення m , л/м^3
1	3 500	Пил вапняку	80	0.8
2	12 000	Чавунний пил	150	1.2
3	45 000	Летюча зола	250	1.0
4	2 000	Хімічний аерозоль	40	1.5
5	7 500	Пил скломаси	110	0.7
6	60 000	Конверторний газ	300	1.3
7	5 000	Абразивний пил	60	0.9
8	25 000	Пил сушильних барабанів	180	1.1
9	10 000	Сажа з печей	200	1.4
10	1 500	Кварцовий пил	30	0.6
11	30 000	Доменний газ	400	1.5
12	8 000	Пил шліфувальний	25	0.8
13	55 000	Викиди скляних печей	220	1.2
14	4 200	Пил кольорових металів	90	1.0
15	18 000	Пилоугільна суміш	130	0.9



Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)

Аналіз ситуацій «Проблема — Причина — Рішення»

Проблема 1: Різке зниження ефективності вловлювання пилу.

Причина. Засмічення форсунок, через що рідина подається нерівномірно або великими струменями замість туману.

Рішення. Очищення або заміна форсунок; встановлення фільтрів на лінії подачі води.

Проблема 2. «Винесення» води разом з очищеним газом (мокрый факел).

Причина. Перевантаження краплевловлювача (циклона) або порушення його герметичності.

Рішення. Зменшити витрату води або модернізувати краплевловлювач (встановити жалюзійні решітки).

Проблема 3. Стрімке заростання горловини відкладеннями (шламом).

Причина. Використання жорсткої або забрудненої оборотної води; занадто мала швидкість газу.

Рішення. Перехід на прямиоточну воду або додавання реагентів для пом'якшення; збільшення швидкості газу.

Проблема 4. Інтенсивна корозія корпусу скрубера.

Причина. Утворення кислот при контакті води з газами (напр. $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$).

Рішення. Виготовлення корпусу з нержавіючої сталі або футерування кислотостійкою гумою/пластиком.

Проблема 5. Інтенсивний абразивний знос горловини сопла. При роботі з твердим пилом (наприклад, рудним або кварцовим) стінки найвужчої частини апарата стираються за кілька місяців.

Причина. Надвисока швидкість газу в горловині (понад 100 м/с) перетворює частки пилу на абразивний струмінь, який «зрізає» метал.

Рішення. Використання змінних вставок для горловини, виготовлених зі зносостійких матеріалів: кам'яного литва (базальту), карбіду кремнію або спеціальних високовуглецевих сплавів.

Проблема 6. Пульсація тиску та нестабільна робота апарата («захлинання»). Перепад тиску в скрубєрі постійно коливається, супроводжуючись сильним гулом та вібрацією.

Причина. Перевищення критичної норми подачі води (ефект «затоплення»). Рідина перекриває переріз горловини, створюючи пробку, яку газ намагається пробити.



Рішення. Відрегулювати питому витрату води ($\$m\$$) згідно з проектними даними; перевірити відповідність швидкості газу в горловині об'єму рідини, що подається.

Проблема 7. Утворення твердих відкладень (накипу) на межі «сухої» та «микрої» зон. На вході в конфузор, де гарячий газ вперше стикається з водою, утворюється «комір» із засохлого шламу, який з часом повністю перекриває вхід.

Причина. Часткове випаровування води при контакті з гарячим газом, що призводить до випадання солей та прилипання сухого пилу до вологої межі.

Рішення. Встановлення спеціальних промивних форсунок для постійного змочування стінок конфузора («водяна сорочка») або зміна кута впорскування води, щоб уникнути утворення чіткої сухої межі.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Де в скрубєрі Вентурі швидкість газу є максимальною?
 - А) У конфузєрі.
 - Б) У горловині.
 - В) У дифузєрі.
 - Г) У краплєвловлювачі.
2. Яка роль краплєвловлювача (циклона) у цій системі?
 - А) Подрібнювати воду.
 - Б) Відокремлювати шлам від чистого газу.
 - В) Нагрівати повітря.
 - Г) Вимірювати тиск.
3. Як впливає збільшення швидкості газу в горловині на ефективність очищення?
 - А) Ефективність падає.
 - Б) Ефективність зростає.
 - В) Не впливає.
 - Г) Ефективність стає рівною 0.
4. Який параметр визначає витрату води в скрубєрі?
 - А) Питоме зрошення ($\$m\$$, л/м³).
 - Б) Довжина труби.
 - В) Колір корпусу.
 - Г) Висота димаря.
5. Головна перевага мокрого очищення перед сухим (циклонами)?
 - А) Відсутність потреби у воді.
 - Б) Можливість вловлювання дуже дрібного пилу та охолодження газу.



- В) Менші витрати електроенергії.
Г) Легкість утилізації сухого пилу.
6. Чому скрубери Вентурі називають «високонапірними»?
А) Тому що вони дуже високі.
Б) Через великий перепад тиску (ΔP), необхідний для розпилення води.
В) Тому що вода подається під тиском 100 атм.
Г) Це помилкова назва.
7. Яка основна екологічна проблема виникає при експлуатації скрубєрів?
А) Шум.
Б) Утворення великої кількості брудної води (шламу), що потребує очищення.
В) Виділення кисню.
Г) Магнітне випромінювання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Левандовський Л. В., Бублієнко Н. О., Семенова О. І. Природоохоронні технології та обладнання : підруч. Київ : НУХТ, 2013. 243 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f56ff878-efc9-41ec-bb4e-3c354bb664df>
2. Цейтлін М. А. Проектування природоохоронних комплексів з використанням САПР : навч. посіб. / М. А. Цейтлін, В. Ф. Райко, М. В. Бойко, О. В. Шестопапов. Харків : НТУ «ХПІ». 2013. 224 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi80/0060196.pdf>

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 РОЗРАХУНОК АБСОРБЕРА (НАСАДКОВОЇ КОЛОНИ) ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДІВ ВІД ГАЗОПОДІБНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ

МЕТА РОБОТИ:

Навчитися проектувати обладнання для хемосорбції (наприклад, для очищення від SO_2 або NO_x).

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

Абсорбція — це процес вибіркового поглинання компонентів газової суміші рідким поглиначем (абсорбентом). Цей метод є одним із найпоширеніших у промисловості для санітарного очищення викидів від шкідливих газів, таких як діоксид сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x), аміак (NH_3), хлороводень (HCl) та ін.

На відміну від очищення газів від пилу (де діють фізичні сили інерції чи гравітації), абсорбція базується на масообміні — переході речовини з газової фази в рідку на межі їх контакту.

Розрізняють два види абсорбції:

1. Фізична абсорбція: розчинення газу в рідині без хімічної взаємодії (наприклад, уловлювання аміаку водою). Процес є оборотним: при нагріванні або зниженні тиску газ виділяється назад (десорбція).

2. Хімічна абсорбція (хемосорбція): поглинання супроводжується хімічною реакцією між газом та компонентом абсорбенту (наприклад, уловлювання SO_2 лужним розчином NaOH). Цей процес більш ефективний і часто необоротний.

Будова насадкового абсорбера

Для ефективного масообміну необхідно створити максимально велику поверхню контакту між газом і рідиною. У насадкових колонах це досягається за допомогою спеціальних тіл — насадки (кільця Рашига, кільця Палля, сідла Берля тощо), які засипаються всередину колони.

Кільця Палля



Кільця Рашига



Рисунок 4.1- Конструкції кільця Палля та Рашига для насадкових колон



Процес зазвичай організують протитечією:

- Забруднений газ подається знизу колони і рухається вгору крізь проміжки насадки.

- Абсорбент подається зверху через зрошувач і стікає вниз тонкою плівкою по поверхні елементів насадки.

Саме на змоченій поверхні насадки відбувається контакт газу з рідиною та поглинання шкідливих компонентів.

Рушійною силою абсорбції є різниця між фактичною концентрацією газу в потоці та рівноважною концентрацією над рідиною. Процес йде доти, доки система не досягне термодинамічної рівноваги (коли парціальний тиск газу над рідиною дорівнює його парціальному тиску в газовій суміші).

Схема установки

На рисунку 4.2 представлена принципова схема насадкового абсорбера.

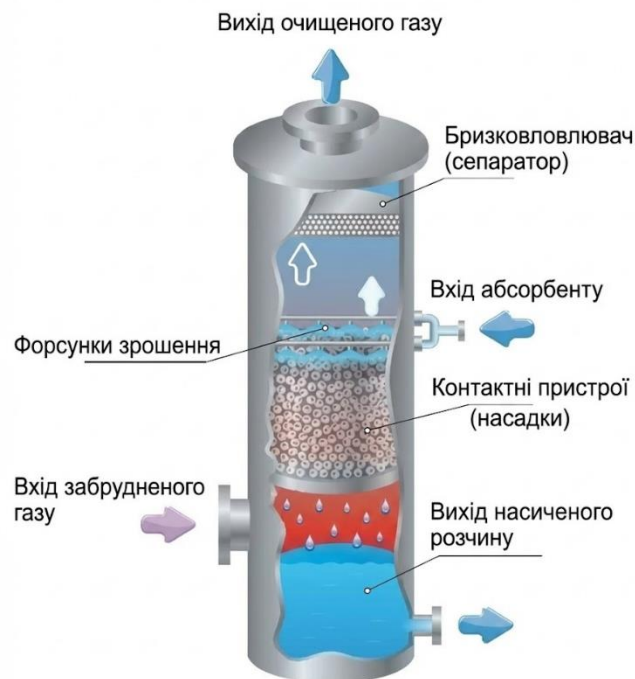



Рисунок 4.2- Принципова схема насадкового абсорбера

Вхід забрудненого газу та вихід очищеного газу забезпечують рух газового потоку крізь апарат.

Форсунки зрошення рівномірно розподіляють абсорбент по перерізу колони.

Контактні пристрої (насадки) створюють розвинену поверхню для масообміну між газом і рідиною.



Бризковловлювач (сепаратор) у верхній частині запобігає винесенню крапель абсорбенту разом з очищеним газом.

Вихід насиченого розчину дозволяє відводити відпрацьовану рідину на регенерацію або утилізацію.

Алгоритм розрахунку абсорбера

Розрахунок полягає у визначенні основних геометричних розмірів колони (діаметра D і висоти насадки H) та витрат потоків.

Етап 1. Матеріальний баланс та витрата абсорбенту

1.1. Переведення концентрацій. Якщо концентрації задані в об'ємних частках або мг/м^3 , їх слід перевести у відносні масові концентрації (кг поглинутої речовини на кг інертного газу) — $Y_{\text{ін.вх}}$ (на вході) та $Y_{\text{ін.вих}}$ (на виході).

1.2. Кількість речовини, що поглинається (M , кг/с)

$$M = G_{\text{ін}} \cdot (Y_{\text{ін.вх}} - Y_{\text{ін.вих}}) \quad (4.1)$$

де $G_{\text{ін}}$ — масова витрата чистого (інертного) газу-носія, кг/с.

1.3. Визначення мінімальної питомої витрати абсорбенту ($l_{\text{мін}}$):

Для цього використовують дані про рівновагу системи "газ-рідина" (наприклад, закон Генрі).

$$l_{\text{мін}} = \frac{Y_{\text{ін.вх}} - Y_{\text{ін.вих}}}{X_{\text{н.вх}}^* - X_{\text{погл}}} \quad (4.2)$$

де $X_{\text{н.вх}}^*$ — концентрація в рідині, рівноважна з початковою концентрацією газу $Y_{\text{ін.вх}}$; $X_{\text{погл}}$ — початкова концентрація поглинає-мої речовини в свіжому абсорбенті (часто $X_{\text{погл}} = 0$).

1.4. Робоча витрата абсорбенту (L , кг/с):

Приймається коефіцієнт надлишку абсорбенту $A = 1,2 \dots 1,5$ (для хемосорбції може бути більше).

$$L = A \cdot l_{\text{мін}} \cdot G_{\text{ін}} \quad (4.3)$$

Етап 2. Визначення діаметра колони (D)

Діаметр залежить від швидкості руху газу в колоні. Існує критична швидкість — швидкість захлинання ($\omega_{\text{зах}}$), при якій висхідний потік газу починає зупиняти стікання рідини, і колона переповнюється.

2.1. Розрахунок швидкості захлинання $\omega_{\text{роб}}$, виконується за емпіричними формулами або номограмами, які враховують характеристики насадки (питому поверхню a , вільний об'єм ε), густину та в'язкість газу і рідини.

2.2. Вибір робочої швидкості газу ($\omega_{\text{роб}}$). Для стійкої роботи приймають

$$\omega_{\text{роб}} = (0,75 \dots 0,85) \cdot \omega_{\text{зах}} \quad (4.4)$$

2.3. Розрахунок діаметра колони (D , м)

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{сек}}}{\pi \cdot \omega_{\text{роб}}}} \quad (4.5)$$

де $V_{\text{сек}}$ — об'ємна секундна витрата газу за робочих умов в колоні ($\text{м}^3/\text{с}$).

Отримане значення округлюють до найближчого стандартного діаметра.

Етап 3. Визначення висоти шару насадки (H)

Висоту визначають через число одиниць переносу ($h_{\text{пер}}$) та висоту одиниці переносу ($N_{\text{пер}}$).

$$H = h_{\text{пер}} \cdot N_{\text{пер}} \quad (4.6)$$

3.1. Число одиниць переносу ($N_{\text{пер}}$):

Характеризує складність процесу розділення. Для наближеного розрахунку використовують метод середньої рушійної сили

$$N_{\text{пер}} = \frac{Y_{\text{ін.вх}} - Y_{\text{ін.вих}}}{\Delta Y_{\text{сер}}}, \quad (4.7)$$

де $\Delta Y_{\text{сер}}$ — середньологарифмічна рушійна сила процесу.

3.2. Висота одиниці переносу ($h_{\text{пер}}$):

Характеризує кінетику масообміну (наскільки ефективна насадка). Розраховується за складними критеріальними рівняннями, що враховують коефіцієнти дифузії та гідродинамічні умови. У навчальних цілях значення $h_{\text{пер}}$ може бути задано викладачем або прийнято за довідковими даними для аналогічних процесів (наприклад, 0.5 – 1.5 м).

Приклад розрахунку

Завдання: Розрахувати абсорбер для очищення повітря від аміаку (NH_3) водою.

Вихідні дані:

Об'ємна витрата газу за норм. умов: $V_0 = 3600 \text{ м}^3/\text{год} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$

Початкова концентрація NH_3 : $Y_{\text{ін.вх}} = 5\%$ (об.).

Ступінь очищення: $\eta = 95\%$.

Абсорбент: чиста вода ($X_{\text{погл}} = 0$).

Насадка: керамічні кільця Рашіга 25x25x3 мм.

Умови в колоні: тиск атмосферний, температура 20°C.

Розв'язання:

1. Матеріальний баланс.

Концентрація на виході

$$Y_{\text{ін.вих}} = Y_{\text{ін.вх}} \cdot (1 - \eta) = 5 \cdot (1 - 0,95) = 25\% \quad (4.8)$$

Перерахунок у відносні масові концентрації (через молярні маси $M_{NH_3} = 17, M_{пов} = 29$): $Y_{ін.вх} \approx 0,03$ кг NH_3 /кг, $Y_{ін.вих} \approx 0,03$ кг NH_3 /кг повітря.

Витрата інертного газу (повітря): $G_{ін} \approx V_0 \cdot \rho_{пов} \cdot (1 - Y_{ін.вх}) \approx 1 \cdot 1,2 \cdot 0,95 = 1,14$ кг/с

Кількість поглинутого аміаку: $M = 1,14 \cdot (0,03 - 0,0015) = 0,0325 \frac{кг}{с}$.

Витрата води (приймаємо $A=1.5$, дані рівноваги беремо з довідника), тоді

$$L = A \cdot l_{мін} \cdot G_{ін} \approx 2,5 \frac{кг}{с}. \quad (4.9)$$

2. Діаметр колони.

За довідниками для кілець Рашіга 25мм та системи повітря-вода знаходимо швидкість захлинання при наших навантаженнях: $\omega_{зах} \approx 1.4$ м/с.

Робоча швидкість:

$$\omega_{роб} = 0,75 \cdot 1,4 = 1,05 \text{ м/с.}$$

Витрата газу за робочих умов (при 20°C):

$$V_{сек} = V_0 \cdot \frac{273+20}{273} = 1 \cdot 1,07 = 1,07 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (4.10)$$

Діаметр

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{сек}}{\pi \cdot \omega_{роб}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,07}{3,14 \cdot 1,05}} = 1,13 \text{ м} \quad (4.11)$$

Приймаємо стандартний діаметр $D = 1.2$ м.

3. Висота насадки.

Розраховуємо середню рушійну силу та число одиниць переносу: $N_{пер} = 6.5$ (розрахунок опущено).

Приймаємо за довідковими даними висоту одиниці переносу для цієї насадки: $h_{пер} = 0.9$ м.

Висота шару насадки: $H = 0.9 \cdot 6.5 = 5.85$ м.

Приймаємо $H = 6$ м.

Результат: Абсорбер діаметром 1.2 м із шаром насадки (кілець Рашіга 25мм) висотою 6 м.

ЗАВДАННЯ:

1. Визначити діаметр абсорбційної колони.
2. Розрахувати необхідну висоту шару насадки.
3. Розрахувати матеріальний баланс процесу (скільки реагенту витрачається).




Вхідні дані. Концентрація шкідливого газу на вході та гранично допустима концентрація ГДК на виході, тип насадки, абсорбент (вода або лужний розчин).

Виконати проектний розрахунок насадкового абсорбера згідно з варіантом. Тиск у колоні атмосферний, температура процесу 25°C. Абсорбент — вода (для NH_3 , HCl) або 5% розчин $NaOH$ (для SO_2).

Таблиця 4.1- Варіанти завдань

№ варіанта	Газ, що вловлюється	Витрата газової суміші, V_0 (м ³ /год)	Початкова концентрація, $C_{пч}$ (г/м ³)	Необхідна ефективність, η (%)	Тип насадки	Розмір насадки, мм
1	SO ₂	5000	12	98	Кільця Рашіга (кер.)	50x50x5
2	SO ₂	8500	8	95	Кільця Палля (пласт.)	50x50
3	NH ₃	3000	25	99	Кільця Рашіга (кер.)	25x25x3
4	NH ₃	6200	15	98	Сідла Інталлокс (кер.)	38
5	HCl	2500	30	99.5	Кільця Палля (пласт.)	25x25
6	SO ₂	10000	5	90	Кільця Рашіга (кер.)	80x80x8
7	NH ₃	4500	18	96	Кільця Палля (мет.)	38x38
8	HCl	1500	50	99	Кільця Рашіга (кер.)	15x15x2
9	SO ₂	7000	10	97	Сідла Берля (кер.)	38
10	NH ₃	5500	22	98.5	Кільця Палля (пласт.)	50x50
11	SO ₂	4000	16	96	Кільця Рашіга (кер.)	35x35x4
12	HCl	3200	28	99	Сідла Інталлокс (пласт.)	25
13	NH ₃	9000	14	97.5	Кільця Палля (мет.)	50x50
14	SO ₂	6500	7	94	Кільця Рашіга (кер.)	50x50x5
15	HCl	2800	35	99.2	Кільця Палля (пласт.)	38x38



 *Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)*

Проаналізуйте наведені аварійні ситуації в роботі абсорбера. Визначте можливі причини та запропонуйте методи їх усунення.


Таблиця 4.2- Типові аварійні ситуації поломки абсорбера

№	Ситуація (Симптом)	Можлива причина	Метод усунення
1	Різке збільшення гідравлічного опору колони (перепаду тиску).	1. Перехід у режим «захлинання» (надто велика витрата газу або рідини). 2. Забруднення/забивання насадки твердими відкладеннями.	1. Зменшити витрати потоків до проєктних значень. 2. Зупинити апарат, промити або замінити насадку.
2	Зниження ефективності очищення газу (концентрація на виході зростає).	1. Нерівномірний розподіл рідини (забилися форсунки зрошувача). 2. Недостатня витрата абсорбенту. 3. Вичерпання ємності абсорбенту (якщо це хемосорбція).	1. Прочистити систему зрошення. 2. Збільшити подачу абсорбенту. 3. Замінити відпрацьований розчин на свіжий.
3	Інтенсивне винесення крапель рідини разом з очищеним газом (бризки з труби).	1. Перевищено допустиму швидкість газу. 2. Несправний або відсутній бризковловлювач (сепаратор).	1. Зменшити витрату газу. 2. Встановити або відремонтувати бризковловлювач.
4	Насос подачі абсорбенту працює нестабільно, чути сторонній шум (кавітація).	1. Занадто висока температура абсорбенту (рідина закипає на вході в насос). 2. Низький рівень рідини в приймальному баку.	1. Охолодити абсорбент перед подачею. 2. Підняти рівень рідини в баку.
5	Колона сильно нагрівається в зоні реакції.	Екзотермічна реакція хемосорбції протікає надто інтенсивно при високих вхідних концентраціях газу.	Передбачити охолодження абсорбенту (встановити теплообмінник) або самої колони.

6	Швидка корозія корпусу абсорбера або металевої насадки.	Неправильний вибір конструкційних матеріалів для роботи з агресивним середовищем (кислоти, луги).	Замінити пошкоджені елементи на виготовлені зі стійких матеріалів (пластик, спецсталі, кераміка).
7	«Проскок» газу (ефективність близька до нуля).	1. Повна відсутність подачі зрошення (вихід з ладу насоса). 2. «Канальний рух» газу (рідина стікає по стінках, газ йде сухим центром).	1. Терміново відновити подачу рідини. 2. Перевірити та відрегулювати розподільчу тарілку зрошувача, можливо, пересипати насадку.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Яка основна функція насадки в абсорбційній колоні?
 - А) Фільтрація газу від пилу.
 - Б) Збільшення поверхні контакту фаз між газом і рідиною.
 - В) Охолодження газового потоку.
 - Г) Запобігання винесенню крапель рідини.
2. Чому в абсорберах переважно використовують протитечійний рух фаз (газ вгору, рідина вниз)?
 - А) Це зменшує гідравлічний опір апарата.
 - Б) Це спрощує конструкцію апарата.
 - В) Це забезпечує більшу середню рушійну силу процесу і вищу ефективність.
 - Г) Це запобігає режиму захлинання.
3. Що таке «режим захлинання» (flooding point) абсорбера?
 - А) Режим, при якому вся рідина випаровується.
 - Б) Оптимальний режим роботи з максимальною ефективністю.
 - В) Аварійний режим, при якому висхідний потік газу перешкоджає стіканню рідини, і колона «заливається».
 - Г) Режим роботи при мінімальному навантаженні по газу.
4. На чому ґрунтується принцип матеріального балансу в процесі абсорбції?
 - А) На законі збереження маси: вся кількість шкідливої речовини, вилучена з газу, повинна перейти в поглинальну рідину (абсорбент).
 - Б) На припущенні, що швидкість руху газу в колоні завжди дорівнює швидкості стікання рідини.
 - В) На тому, що об'єм абсорбенту має бути рівно в десять разів більшим за об'єм газу.



Г) На обов'язковому нагріванні газу для кращого розчинення домішок.

5. Рушійною силою процесу абсорбції є:

А) Різниця температур газу і рідини.

Б) Різниця тисків на вході і виході з колони.

В) Різниця між робочою та рівноважною концентраціями компонента, що розподіляється.

Г) Швидкість руху газового потоку.

6. Для чого у верхній частині абсорбера встановлюють бризковловлювач (сепаратор)?

А) Для додаткового зрошення насадки.

Б) Для вловлювання дрібних частинок пилу з газу.

В) Для відокремлення крапель абсорбенту від очищеного газу перед його викидом.

Г) Для вимірювання температури вихідного газу.

7. Як впливає підвищення температури абсорбенту на ефективність фізичної абсорбції газів?

А) Ефективність збільшується, бо зростає швидкість реакції.

Б) Ефективність зменшується, оскільки розчинність газів у рідинах при нагріванні падає.


В) Не впливає на ефективність.

Г) Впливає лише на гідравлічний опір.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Левандовський Л. В., Бублієнко Н. О., Семенова О. І. Природоохоронні технології та обладнання : підруч. Київ : НУХТ, 2013. 243 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f56ff878-efc9-41ec-bb4e-3c354bb664df>

2. Цейтлін М. А. Проектування природоохоронних комплексів з використанням САПР : навч. посіб. / М. А. Цейтлін, В. Ф. Райко, М. В. Бойко, О. В. Шестопапов. Харків : НТУ «ХПІ». 2013. 224 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi80/0060196.pdf>



ПРАКТИЧНА РОБОТА 5

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТИСЛИВОЇ ТЕЧІЇ У СОПЛІ В AUTODESK CFD

МЕТА РОБОТИ:

Отримати навички налаштування граничних умов для стисливих середовищ, проведення розрахунку в Autodesk CFD та візуалізації розподілу тиску, температури й числа Маха вздовж сопла.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

При моделюванні в Autodesk CFD важливо розрізнити статичні та повні (параметри гальмування) величини:

1) Тиск гальмування (P_0) та температура гальмування (T_0): це параметри, які газ має у резервуарі перед входом у сопло (де швидкість близька до нуля). Саме їх ми зазвичай задаємо як граничні умови на вході.

2) Критичний режим (запирання): Якщо відношення тиску на виході до тиску на вході менше певного критичного значення, у найвужчому місці сопла (горловині) швидкість досягає швидкості звуку ($M=1$). Подальше зниження тиску на виході вже не збільшує витрату газу.

3) Стисливість: У налаштуваннях матеріалу (Material Editor) в Autodesk CFD необхідно обов'язково змінити модель стисливості з *Incompressible* на *Compressible*.

Початкові параметри та граничні умови (Boundary Conditions)

Оскільки геометрія однакова для всіх, ви будете змінювати "енергетику" потоку. Для розрахунку в Autodesk CFD ми використовуємо:

1. Inlet (Вхід): Total Pressure (P_0) та Static Temperature (T_{inlet}).
2. Outlet (Вихід): Static Pressure (P_{out}).
3. Material: Air (Variable), модель — Compressible.
4. Physics: Flow — On, Compressible — On.

ЗАВДАННЯ:

Розрахувати параметри газу (M , P , T) у соплі за допомогою Autodesk CFD та визначити режим його роботи (дозвуковий чи надзвуковий). Дослідити вплив вхідного тиску та температури на вихідні характеристики.

В таблиці 5.1 надані варіанти.

Таблиця 5.1 -Таблиця варіантів завдань

Варіант	Робоче тіло	Тиск на вході (P_0), кПа	Темп. на вході (T_0), К	Тиск на виході (P_{out}), кПа
1	Повітря	200	300	101 (атм)
2	Повітря	500	450	101 (атм)
3	Повітря	800	600	150
4	Повітря	1000	800	200
5	Повітря	300	350	50
6	Азот (N ₂)	450	400	101 (атм)
7	Азот (N ₂)	700	550	120
8	Повітря	1200	900	300
9	Повітря	250	300	80
10	Аргон	400	500	101 (атм)
11	Аргон	900	750	150
12	Повітря	1500	1100	400
13	Повітря	600	480	101 (атм)
14	Повітря	2000	1200	500
15	Повітря	350	320	101 (атм)

4. Хід роботи (алгоритм в Autodesk CFD)

- 1) Імпорт геометрії: Завантажте вашу 3D-модель (STP/IGES).
- 2) Матеріали: Призначте Air. У редакторі матеріалів змініть тип на Compressible.
- 3) Граничні умови:
 - Виберіть вхідну площину: Type = Pressure, Unit = kPa, Value (згідно з варіантом), натисніть кнопку "Total".
 - Там же на вході: Type = Temperature, Value (згідно з варіантом).
 - Виберіть вихідну площину: Type = Pressure, Value (згідно з варіантом), натисніть "Static".
- 4) Сітка (Mesh): Виконайте автоматичне розбиття, але додайте Mesh Adaptation (адаптація сітки), оскільки в соплі будуть зони з високим градієнтом тиску.
- 5) Рішач (Solve):

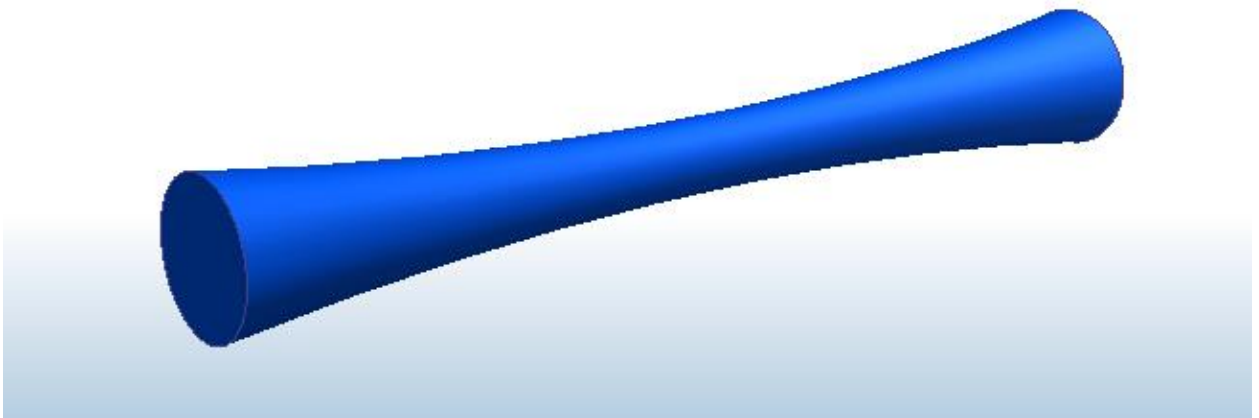
У діалоговому вікні Solve перейдіть на вкладку Physics. Переконайтеся, що стоїть галочка Compressible. У вкладке Control встановіть кількість ітерацій (мінімум 300–500).
- 6) Аналіз результатів:
 - Побудуйте лінії току (Traces).
 - Створіть площину перерізу (Plane) і виведіть контури Mach Number.

- Визначте, чи є у вашому варіанті надзвукова течія ($M > 1$).

Покроковий приклад розрахунку

На цьому прикладі ми вивчимо потік, що стискається звужується, а потім розширюється у соплі. Це класичний випадок внутрішнього потоку, що стискається, і, хоча, геометрія проста, методи, продемонстровані застосовні до додатків промислового рівня внутрішнього стисливого потоку.

Сходящие-расходящиеся сопла мають площу виходу 0.008 м^2 , і площа горловини значенням 0.002 м^2 , що в результаті співвідношення площі дорівнює 4.



Температура на вході застою 500K (**$226,85^\circ\text{C}$**), прибутку та масові витрати, як відомо, 3.61 кг/с . Ми будемо використовувати цю інформацію, щоб визначити вихідне число Маха та тиск на вході та виході. Вихід із сопла не може бути продовжений, тому ми не зможемо візуалізувати будь-яку дію ударного навантаження на виході.

Крок 1. Існує три способи, щоб відкрити навчальний посібник моделі сопла в Autodesk® CFD. Клацніть посилання нижче для методу, який потрібно використовувати:

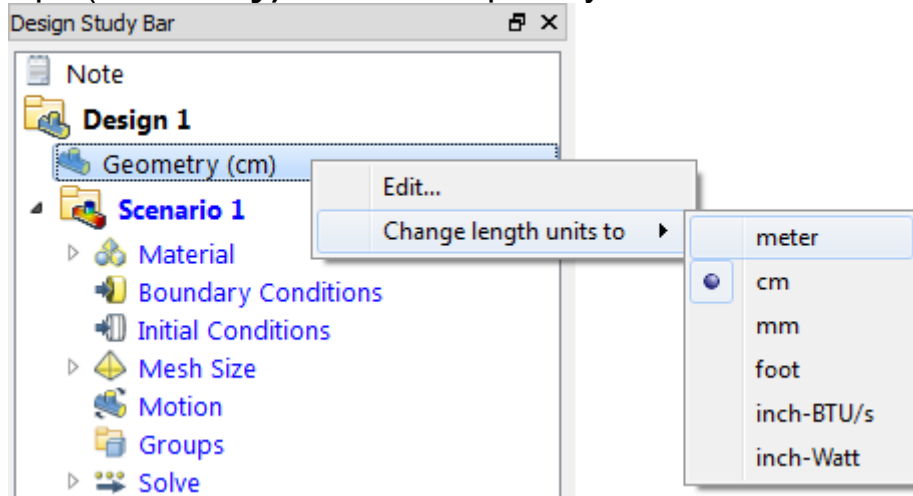
Запуск із САПР.

Використовуйте цей метод, якщо потрібно використовувати геометрію з наступних систем САПР: Inventor, SolidWorks, UNGX, PTC Creo.

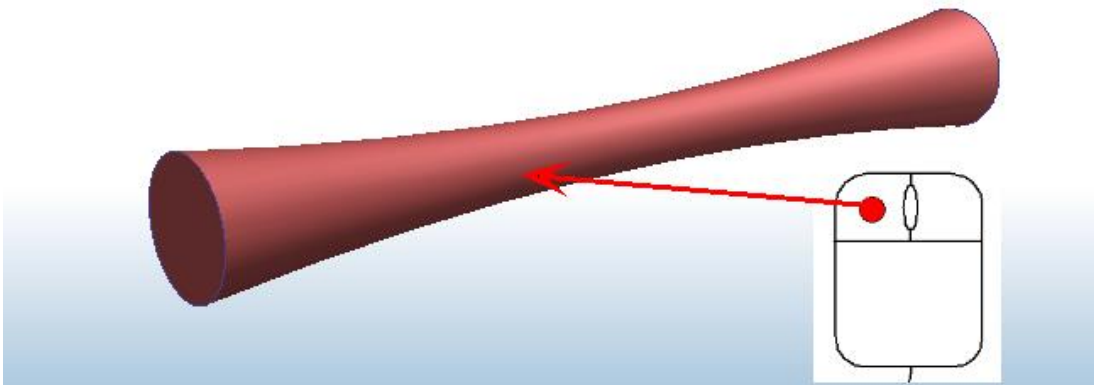
Крок 2. Далі відкриваємо файл геометрії.

При запуску з Autodesk® Inventor, PTC® Creo або SolidWorks одиниці моделі для цього прикладу задаються автоматично за метри. Задавати одиниці довжини самостійно не потрібно.

Під час запуску з інших САПР або з робочого стола змініть одиниці довжини на метри, клацнувши правою кнопкою миші гілку Геометрія(**Geometry**) на панелі проекту.



Крок 3. Призначення матеріалу
Виберіть деталь.

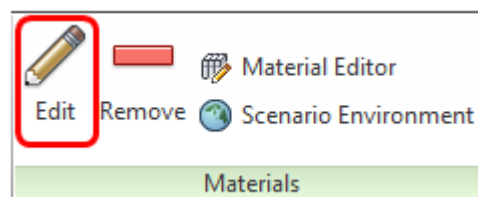


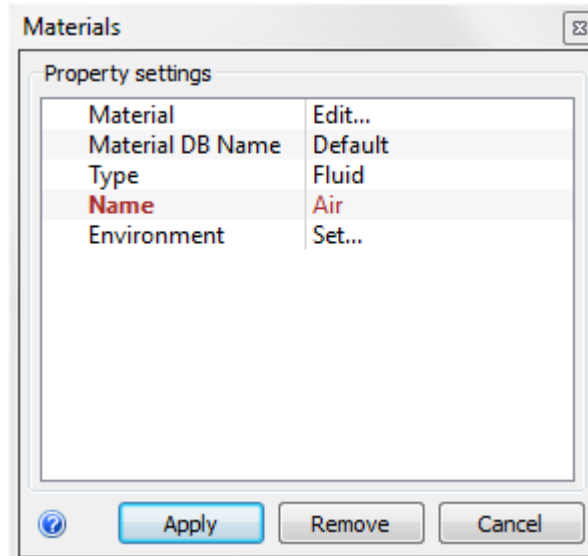
Відкрийте діалогове вікно швидкого редагування Матеріали (**Materials**) ОДНИМ із наступних способів:

Натисніть "Редагувати" на панелі інструментів:

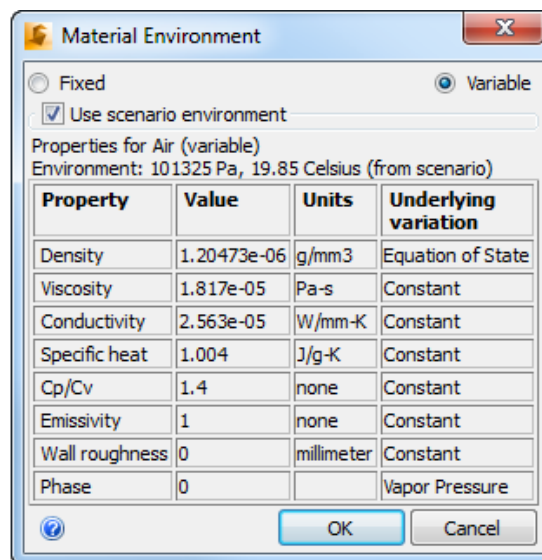


Натисніть Редагувати (**Edit**) на панелі контексту Матеріали (**Materials**):





У діалоговому вікні "Швидке редагування матеріалу" Тип = Рідина
Ім'я = Повітря (**Type = Fluid, Name = Air**)

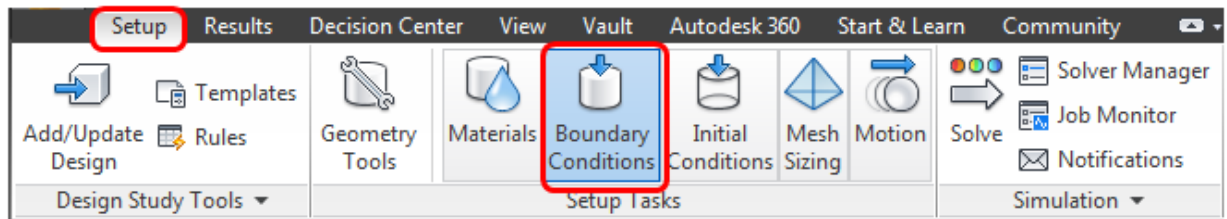


Щоб дозволити властивостям повітря змінюватись із тиском,
натисніть Задати... на рядку Навколишнє середовище. У діалоговому
вікні "Середовище матеріалу" виберіть Змінна та натисніть кнопку ОК.

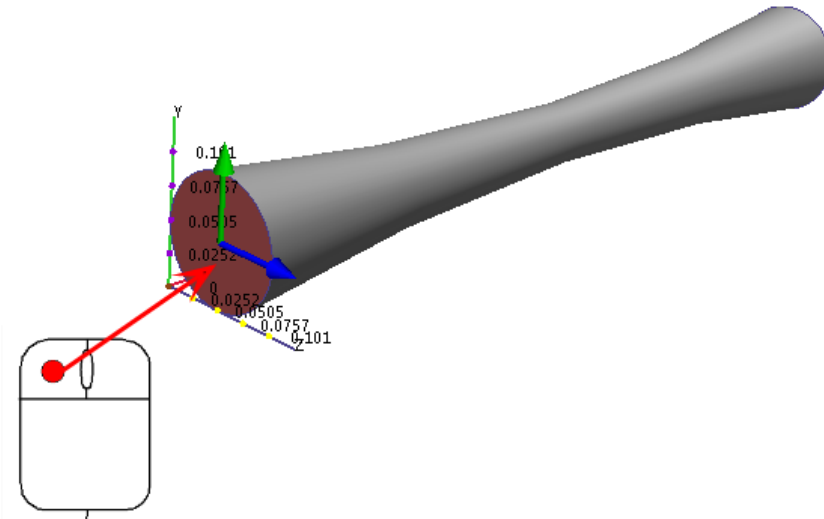
Натисніть кнопку Застосувати.

Крок4. Призначити граничну умову вхідної масової витрати

Натисніть Граничні умови (**Boundary Conditions**) на вкладці Настройка.



Виберіть отвір входу.

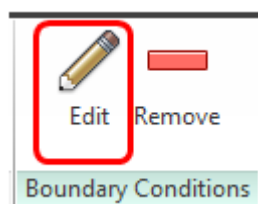


Відкрийте діалогове вікно швидкого редагування Граничні умови ОДНИМ із наступних способів:

- Натисніть «Редагувати» у контекстному меню панелі інструментів.



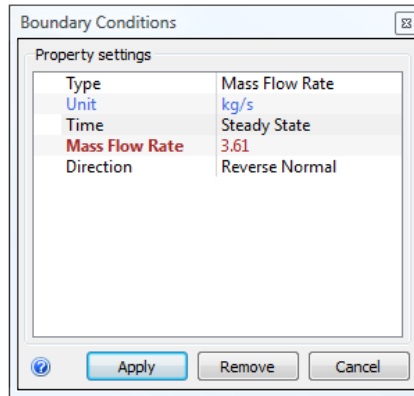
- Натисніть Редагувати на панелі контексту Граничні умови:



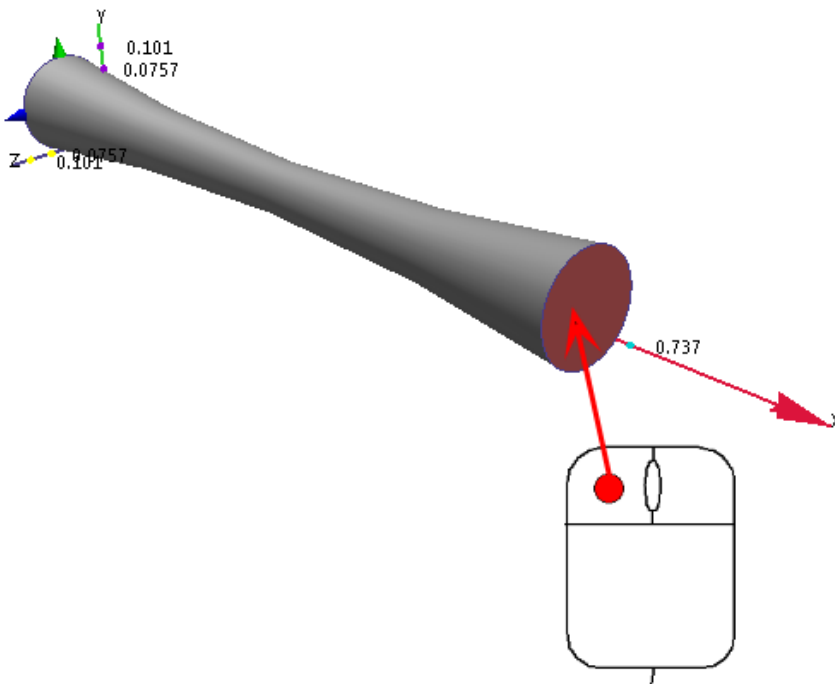
Тип = Масова витрата

Одиниця = Кг/с

Масова витрата = 3,61



Натисніть кнопку Застосувати.
Призначити невідому межу для вихідного отвору
Виберіть **вихідний** **отвір**.

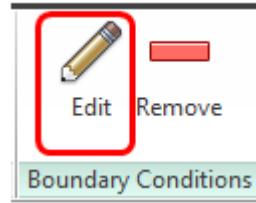


Відкрийте діалогове вікно швидкого редагування Граничні умови ОДНИМ із наступних способів:

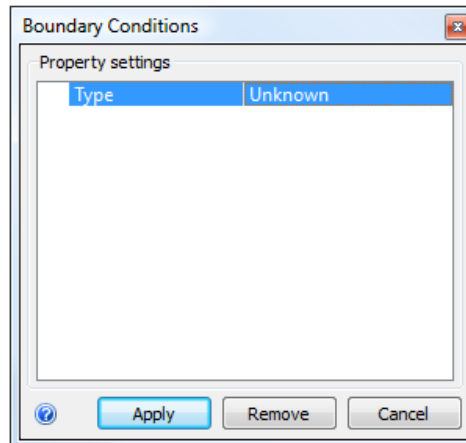
- Натисніть «Редагувати» у контекстному меню панелі інструментів.



- Натисніть Редагувати на панелі контексту Граничні умови:

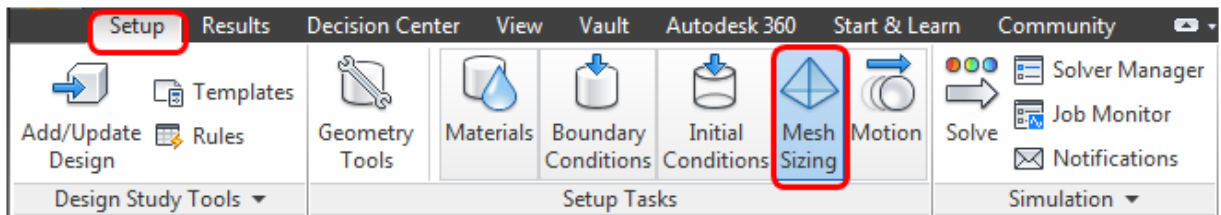


Тип = Невідомо



Натисніть кнопку Застосувати.

Крок 5. Призначити розмір сітки автоматично
Натисніть Розміри сітки на вкладці Настройка:



Застосуйте Автоматичний розмір сітки ОДНИМ із таких способів:

– Клацніть лівою кнопкою миші, а потім виберіть "Авторозмір" з контекстного меню:

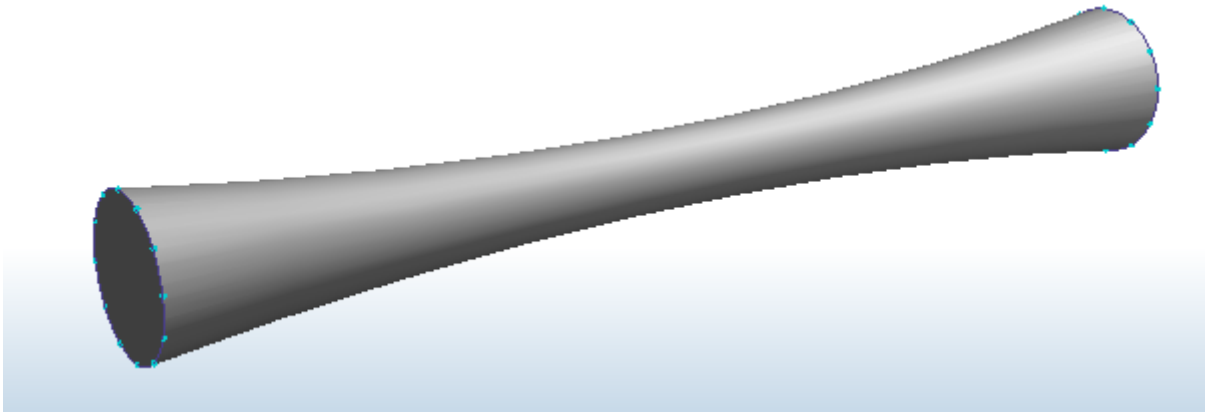


– Натисніть "Авторозмір" на контекстній панелі Автонанесення розмірів:





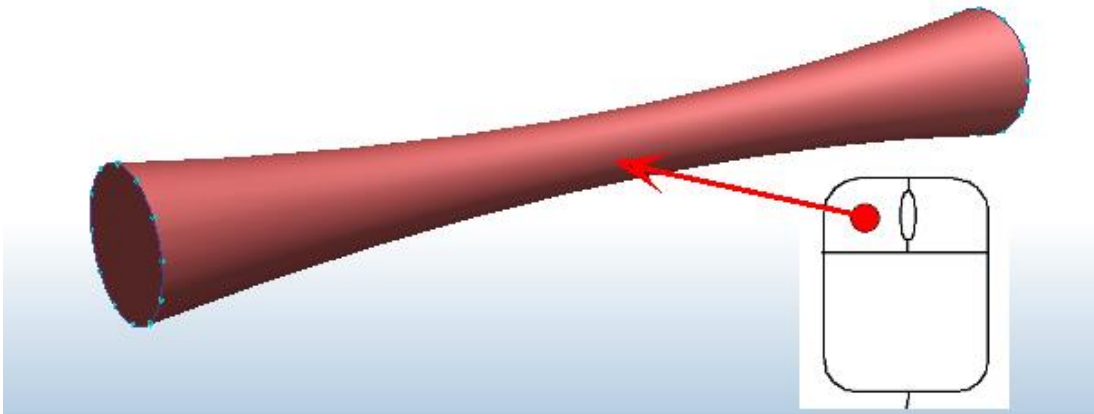
Результат має виглядати так:



Отриманий розподіл сітки дуже великий, щоб виконати аналіз правильно. На наступному етапі ми уточнимо сітку.

Уточніть сітку

Виберіть насадку.



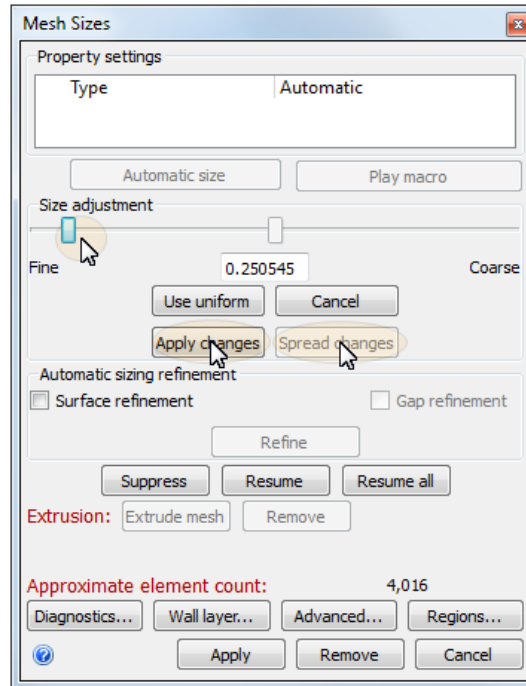
Щоб змінити розмір мережі, виконайте одну з наведених нижче дій.

– Натисніть «Редагувати» у контекстному меню панелі інструментів.



– Клацніть Редагувати на контекстній панелі Автоматично.

Перемістіть повзунок регулювання розміру 0.25.



Натисніть кнопку Застосувати зміни.

Натисніть кнопку Окремі зміни.

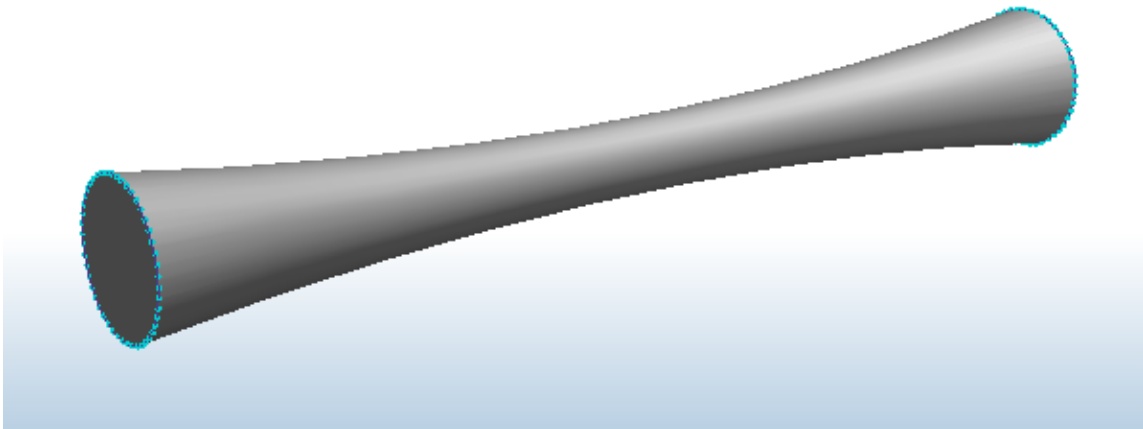
Примітка.

Результат

має

виглядати

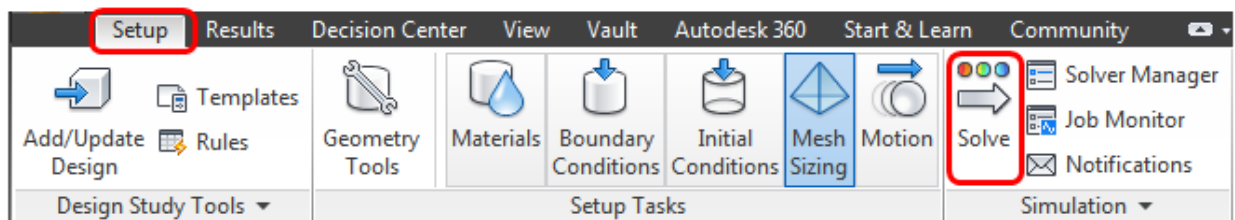
так:



Це гарантує, що сітки достатньо для вирішення швидкості та тиску потоку

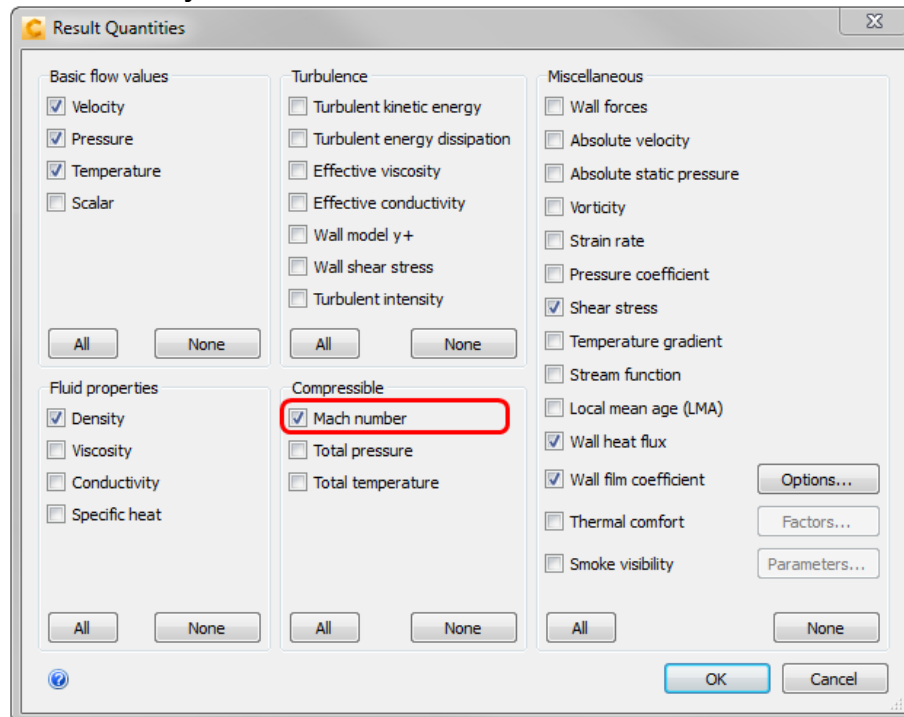
Крок 6. Налаштування рішень

Натисніть Рішення на вкладці "Налаштування":

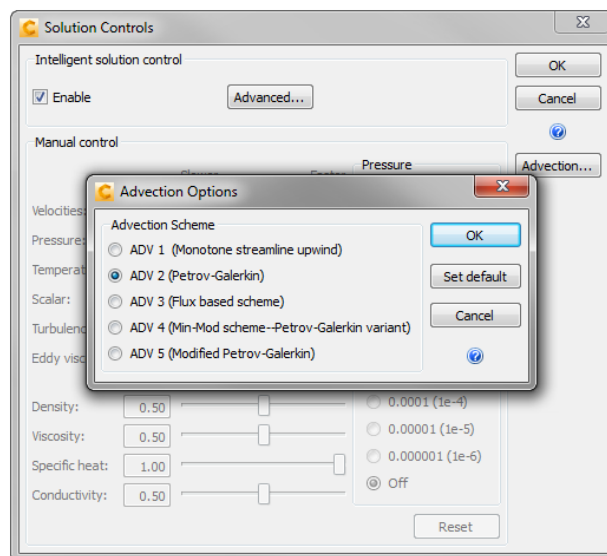


Натисніть кнопку Результат кількості.

Увімкнути виведення числа Маха, вибравши Число Маха. Натисніть кнопку ОК.



У діалоговому вікні Розрахунок натисніть Керування рішеннями, натисніть кнопку Адвекція. У діалоговому вікні "Параметри адвекції" виберіть ADV2. Натисніть ОК, а потім ОК у діалоговому вікні "Керування рішенням".



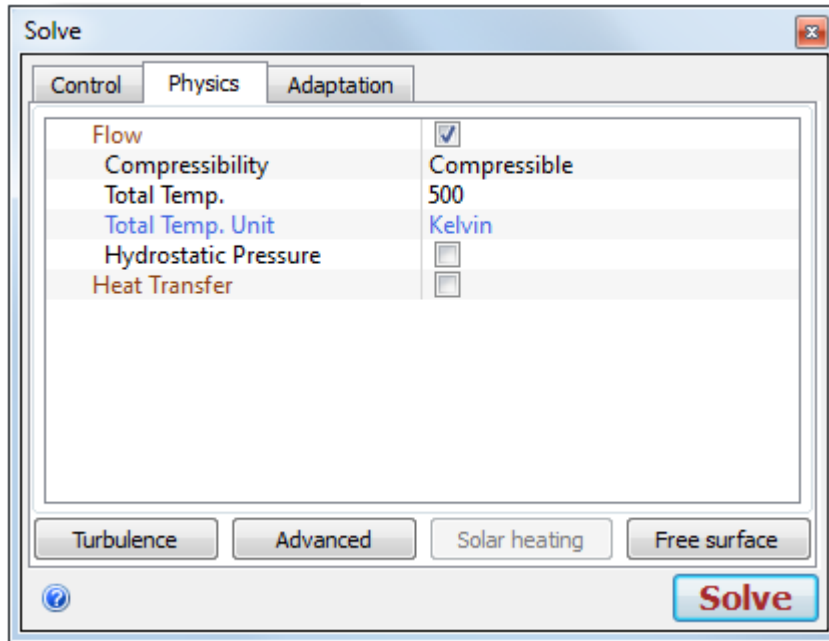
Клацніть вкладку Фізика.

Потік = Увімк.

Стисність = Стиснутий

Загальне значення темп. = 500

Загальна одиниця вимірювання температури = градуси Кельвіна



Клацніть вкладку Керування.

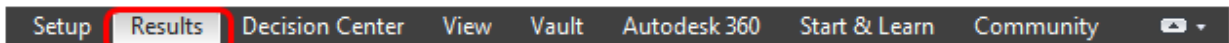
Ітерацій для запуску = 1000

Натисніть Рішення, щоб розпочати аналіз.

Задамо кількість ітерацій до 1000, оскільки розрахунки внутрішнього стиснення вимагають багато ітерацій для перетворення радієнтів.

Крок 7. Результати швидкості

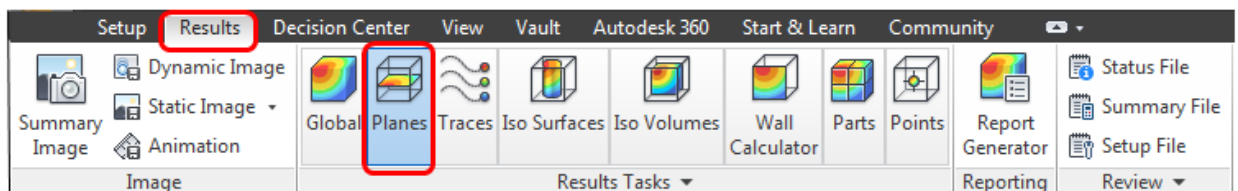
Натисніть вкладку Результати.



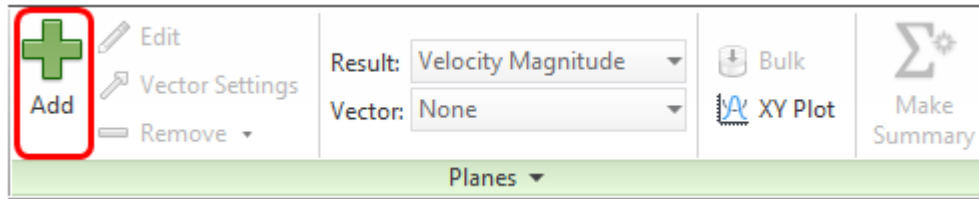
На цьому етапі ми розглянемо результати швидкості, використовуючи площину, що січе, і вектори.

Порізнi площини відображають результати для розрізання моделі. Використовуйте їх, щоб отримати повніше уявлення про потік. Використовуйте вектори для відображення напрямку та величини швидкості потоку.

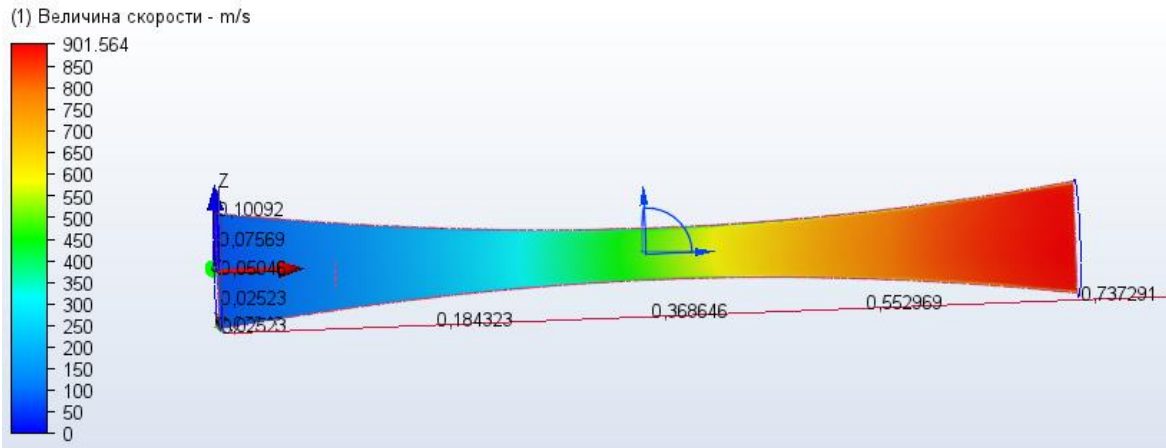
Натисніть Площини на вкладці Результати.



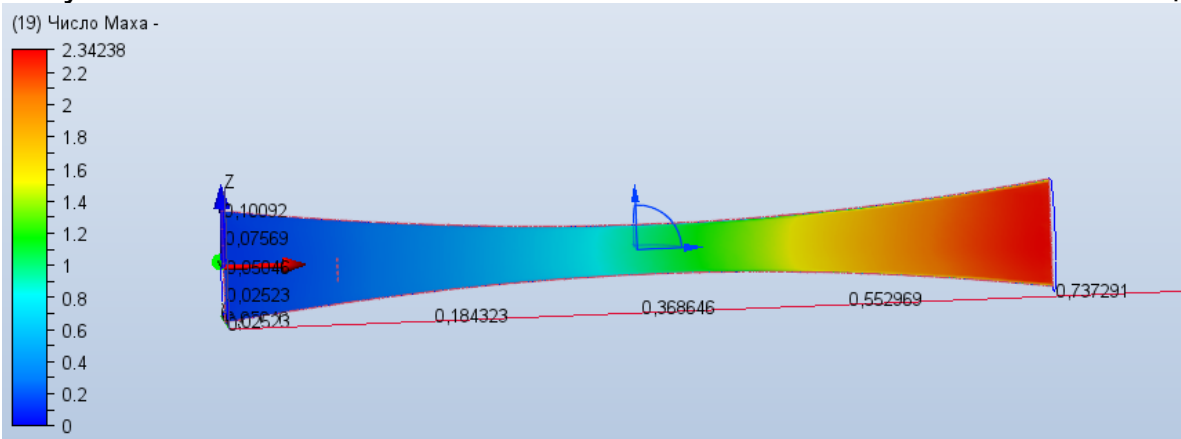
Щоб створити площину, натисніть Додати на контекстній панелі Площини:



Для орієнтації площини клацніть лівою кнопкою миші на ньому, і натисніть цю іконку з контекстної панелі: Z



Щоб відобразити число Маха, натисніть Число Маха з меню Результат на панелі Площини.



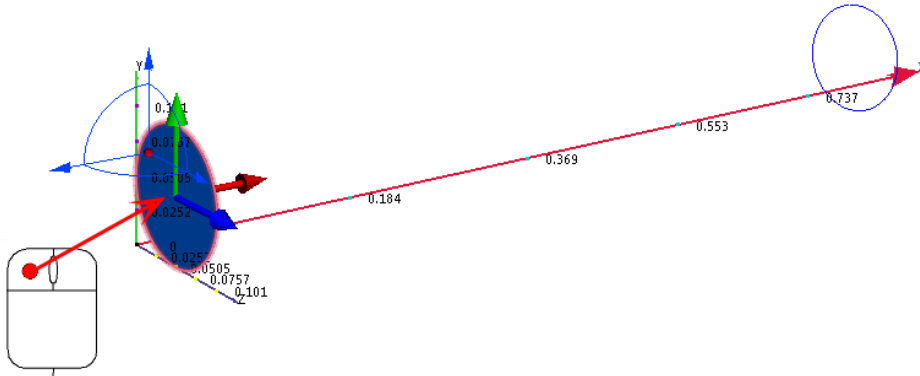
Примітка. Як і очікувалося, потік наближається до нашколзвукоруї шкорути горловини і прискорується приблизно в 2,5 рази на виході.

Крок 8. Падіння тиску

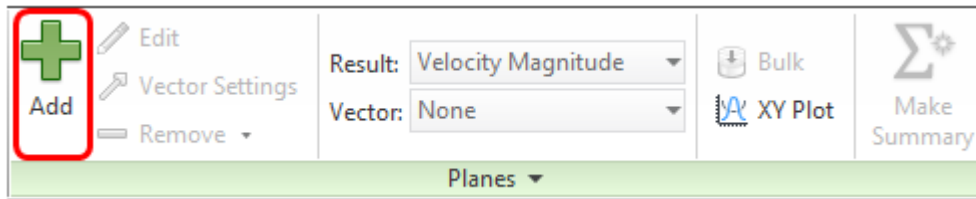
На цьому етапі ми будемо використовувати Зведення площин та розділ "Критичні значення" Центру рішень, щоб оцінити тиск на вході, горловині та на виході із сопла.



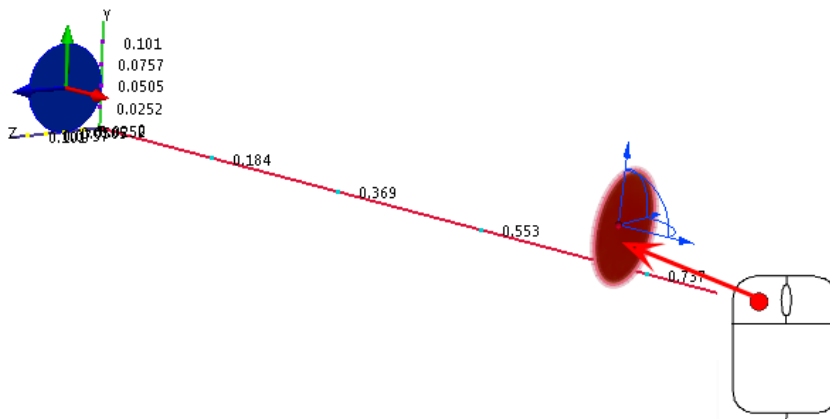
Клацніть лівою кнопкою миші на площині, а потім натисніть на іконку "Вирівняти поверхню". Виберіть поверхню вхідного отвору.



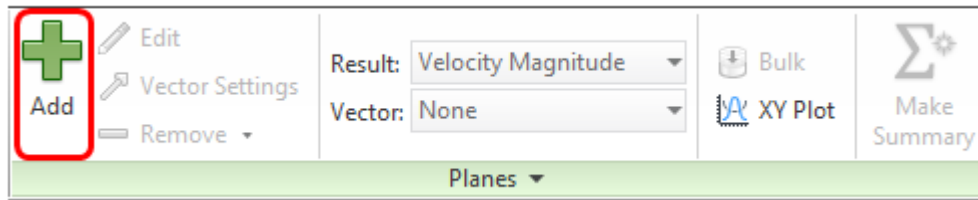
Чтобы создать плоскости, нажмите Добавить на контекстной панели Плоскости:



Клацніть лівою кнопкою миші на площині, а потім натисніть на іконку "Вирівняти поверхню". Виберіть вихідну поверхню.

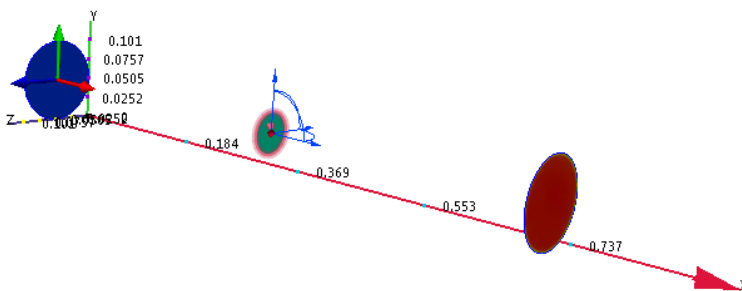
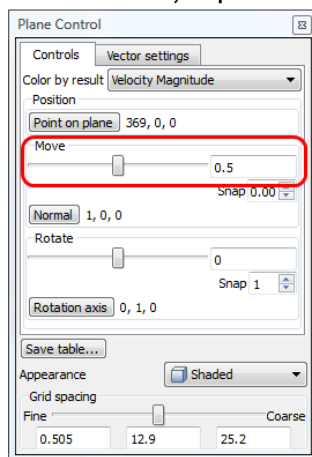


Щоб створити площину, натисніть Додати на контекстній панелі Площини:

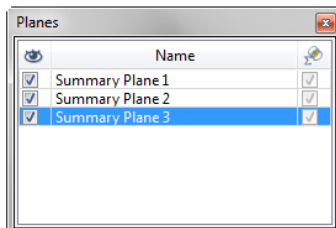


Для орієнтації площини клацніть лівою кнопкою миші на ньому, і натисніть цю іконку з контекстної панелі: X

Клацніть правою кнопкою миші на площині, виберіть Редагувати. Переконайтеся, що площина 0.5.



Зробіть три результати площин Зведення по площинах, встановивши прапорець



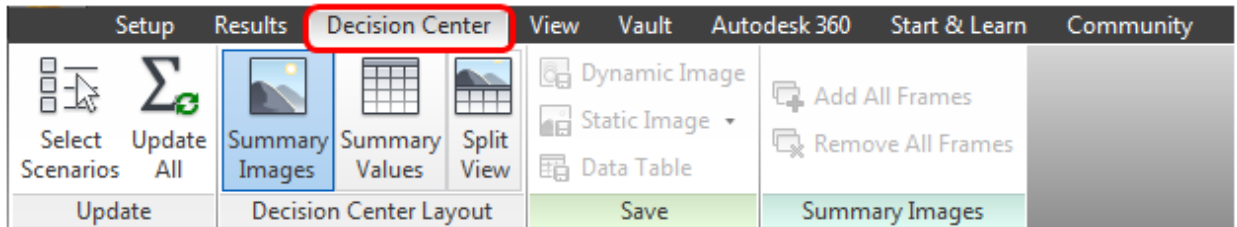
Зведення для кожного з них:

Примітка. Якщо діалогове вікно не відображається, клацніть "Список вибору" на панелі інструментів швидкого доступу:

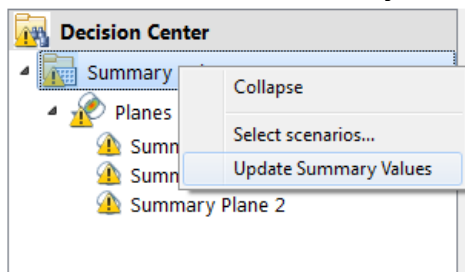


Крок 9. Порівняння результатів

Щоб розпочати порівняння результатів, відкрийте вкладку Центр рішень.




У Центрі рішень, клацніть правою кнопкою миші на Зведені значення та натисніть кнопку Оновити значення.



Примітка. Дані зведення про плоскість представлені на вкладці «Плоскості» Центру рішень.

Result	Quantity	Design 1 Scenario 1	Reference	Units
Summary Plane 1				
Area		0.00797358	N/A	m ²
Mass flow rate		-3.61031	N/A	kg/s
Volume flow rate		-0.487909	N/A	m ³ /s
Vx-Velocity		61.1907	N/A	m/s
Vy-Velocity		-0.000412205	N/A	m/s
Vz-Velocity		0.00139847	N/A	m/s
Density		7.40083	N/A	kg/m ³
Pressure		956787	N/A	Pa
Pressure force		7635.74	N/A	Newton
Temperature		224.944	N/A	Celsius
Viscosity		1.817e-05	N/A	Pa-s
Summary Plane 2				
Area		0.0079736	N/A	m ²
Mass flow rate		3.65319	N/A	kg/s
Volume flow rate		5.69628	N/A	m ³ /s
Vx-Velocity		714.393	N/A	m/s
Vy-Velocity		0.527479	N/A	m/s
Vz-Velocity		0.058485	N/A	m/s
Density		0.64506	N/A	kg/m ³
Pressure		-58277	N/A	Pa
Pressure force		-465.272	N/A	Newton
Temperature		-39.2471	N/A	Celsius
Viscosity		1.817e-05	N/A	Pa-s
Summary Plane 3				
Area		0.00198902	N/A	m ²
Mass flow rate		3.60857	N/A	kg/s
Volume flow rate		0.754226	N/A	m ³ /s
Vx-Velocity		379.195	N/A	m/s
Vy-Velocity		0.0735545	N/A	m/s
Vz-Velocity		0.0567705	N/A	m/s
Density		4.78579	N/A	kg/m ³
Pressure		481568	N/A	Pa
Pressure force		957.747	N/A	Newton
Temperature		151.339	N/A	Celsius
Viscosity		1.817e-05	N/A	Pa-s



Примітка. Впуском є площина 1. Вихідна площина 2. Горловина площини 3. Вітаємо! Ви виконали завдання.

5. Типові помилки та причини розбіжності розрахунку

Якщо ваш розрахунок зупинився помилкою або графіки збіжності («криві») різко пішли вгору, перевірте наступні пункти:

1. Налаштування фізики (Physics Settings)

- Чи увімкнено стисливість? У діалоговому вікні Solve (Рішач) на вкладці Physics обов'язково має стояти галочка Compressible. Без неї програма намагається розрахувати повітря як нестисливу рідину (як воду), що при великих швидкостях призводить до помилки.

- Тип потоку: Переконайтеся, що обрано Steady State (усталений режим), а не Transient, якщо ви не плануєте досліджувати пускові режими сопла.

2. Матеріали (Material Properties)

Variable/Compressible: У редакторі матеріалів для повітря має бути обрано Environment: Variable або Compressible. Якщо залишити Fixed, густина не буде змінюватися залежно від тиску, і фізика сопла Лавалю не працюватиме.

3. Граничні умови (Boundary Conditions)

- Total vs Static Pressure: Типова помилка — задати на вході Static Pressure замість Total Pressure. Для моделювання потоку з резервуара ми завжди задаємо повний тиск (Total).

- Температура: Обов'язково задайте температуру на вході. Для стисливих потоків енергія (температура) напряму пов'язана з імпульсом (швидкістю).

- Конфлікт умов: Перевірте, чи не задали ви випадково на одній поверхні і тиск, і швидкість одночасно. Це "паралізує" рішення.

4. Параметри сітки (Mesh Quality)

- Занадто груба сітка в горловині: Найвищі градієнти швидкості та тиску відбуваються в найвужчому місці. Якщо там лише 1–2 елементи, розрахунок стане нестабільним. Використовуйте Mesh Adaptation.

- Аспектне відношення: Уникайте дуже довгих і вузьких трикутників/тетраєдрів.

5. Параметри рішача (Control Settings)

- Advection Scheme: Для надзвукових потоків рекомендується використовувати схему ADV 5 (у налаштуваннях Solution Control -> Advection). Вона більш стабільна для стисливих течій з високими градієнтами.



– Intelligent Solution Control: Якщо розрахунок коливається, спробуйте увімкнути цю функцію — вона автоматично регулює «кроки» рішача для досягнення стабільності.

Поради для «успішного фінішу»:

1. Поступовість: Якщо розрахунок не сходиться, спробуйте спочатку запустити його з меншим тиском на вході, а потім поступово (через Continue) піднімати його до заданого за варіантом.

2. Моніторинг: Слідкуйте за числом Маха. Якщо в якійсь точці воно стає аномально великим (наприклад, $M > 10$ для повітря), це ознака того, що розрахунок скоро «вибухне» через помилку в граничних умовах.

Приклад оформлення висновку до практичної роботи

Висновок.

У результаті виконання практичної роботи було проведено чисельне моделювання стаціонарної стисливої течії повітря (або іншого газу за варіантом) у соплі Лавалю за допомогою програмного комплексу Autodesk CFD.

Під час аналізу отриманих результатів було встановлено:

1. Розподіл швидкостей: У звужуваній частині сопла потік прискорюється, досягаючи в горловині (найвужчому перерізі) критичної швидкості, що відповідає числу Маха. У розширюваній частині сопла спостерігається подальше зростання швидкості до надзвукових значень ($M = \dots$ згідно з розрахунком), що підтверджує розрахунковий режим роботи сопла.


2. Зміна термодинамічних параметрів: Згідно з законом збереження енергії, зростання кінетичної енергії потоку супроводжується стрімким падінням статичного тиску та температури. Мінімальне значення тиску $P = \dots$ кПа зафіксовано на зрізі сопла.

3. Аналіз збіжності: Використання адаптивної сітки (Mesh Adaptation) та схеми адвекції ADV 5 дозволило отримати стабільну картину розподілу параметрів без значних чисельних коливань у зоні розширення.

Загальний підсумок: Програмний інструмент Autodesk CFD підтвердив свою ефективність для візуалізації складних процесів газової динаміки. Отримана картина розподілу числа Маха та тиску повністю відповідає фізичній природі стисливих потоків у каналах змінної геометрії.

Поради для студентів щодо заповнення:


– Замість трьох крапок (...) необхідно вставити конкретні цифри зі свого розрахунку.



- Якщо на виході не було досягнуто надзвукової швидкості (наприклад, через недостатній перепад тиску), у висновку слід зазначити, що сопло працювало в режимі звичайного вентурі-каналу.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Яка умова є обов'язковою для досягнення надзвукової швидкості ($M > 1$) у розширюваній частині (дифузорі) сопла Лаваля?
 - А) Тиск на виході має бути вищим за тиск на вході.
 - Б) У найвужчому перерізі (горловині) має бути досягнута швидкість звуку ($M = 1$).
 - В) Швидкість на вході в сопло повинна бути надзвуковою.
 - Г) Температура газу має бути максимально низькою.
2. Яке налаштування у редакторі матеріалів (Material Editor) Autodesk CFD є критично важливим для отримання коректних результатів у даній роботі?
 - А) Зміна густини на Fixed.
 - Б) Встановлення моделі стисливості на Compressible.
 - В) Включення параметру Radiation.
 - Г) Вибір рідини замість газу.
3. Як зміна статичної температури газу впливає на локальну швидкість звуку (a)?
 - А) При підвищенні температури швидкість звуку збільшується.
 - Б) При підвищенні температури швидкість звуку зменшується.
 - В) Швидкість звуку не залежить від температури, лише від тиску.
 - Г) Швидкість звуку залежить лише від геометричної форми сопла.
4. При налаштуванні граничних умов на вході (Inlet), параметр "Total Pressure" (Тиск гальмування) означає:
 - А) Тиск потоку, що вже рухається з високою швидкістю.
 - Б) Тиск газу в стані спокою (наприклад, у резервуарі перед соплом).
 - В) Різницю між вхідним та вихідним тисками.
 - Г) Тиск, що виникає лише в горловині сопла.
5. Що відбувається з тиском та швидкістю стисливого потоку в розширюваній частині сопла, якщо число Маха $M > 1$?
 - А) Швидкість падає, тиск зростає.
 - Б) Швидкість зростає, тиск падає.
 - В) І швидкість, і тиск зростають одночасно.
 - Г) Параметри залишаються незмінними.
6. Навіщо в Autodesk CFD рекомендується використовувати функцію "Mesh Adaptation" для сопла Лаваля?
 - А) Для зменшення загального часу розрахунку.

- 
- Б) Для автоматичного ущільнення сітки в зонах високих градієнтів (наприклад, у стрибках ущільнення).
- В) Для зміни геометричних розмірів моделі під час розрахунку.
- Г) Для розрахунку теплопровідності стінок сопла.
7. Яке явище називають «запиранням» сопла (choking)?
- А) Повне припинення руху газу через засмічення каналу.
- Б) Режим, при якому масова витрата газу стає максимальною і не залежить від подальшого зниження тиску на виході.
- В) Перехід течії з ламінарної у турбулентну.
- Г) Досягнення температурою газу значення абсолютного нуля.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шевченко Т. О. Конспект лекцій з дисципліни «Технічна механіка рідини та газу» (для студентів 2 курсу денної і заочної форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 101 с. URL: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/132273054.pdf>
3. Проектування природоохоронних комплексів з використанням САПР : навч. посіб. / М. А. Цейтлін, В. Ф. Райко, М. В. Бойко, О. В. Шестопапов. Харків : НТУ «ХПІ». 2013. 224 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi80/0060196.pdf>



ПРАКТИЧНА РОБОТА 6 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ГРАТ ДЛЯ МЕХАНІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД

МЕТА РОБОТИ:

Набути практичних навичок технологічного та гідравлічного розрахунку ґрат, навчитися визначати їхні конструктивні параметри (кількість прозорів, втрати напору) та опанувати методи усунення типових несправностей при їх експлуатації відповідно до нормативних вимог.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

Механічна очистка — це перший і обов'язковий етап очищення стічних вод, призначений для затримання нерозчинених домішок.

Ґрати (решітки) встановлюються на самому початку технологічної схеми для захисту насосного обладнання, аераторів та трубопроводів від засмічення, механічних пошкоджень та передчасного зносу.

Ось детальна класифікація за основними ознаками:

А. За способом очищення (основна ознака)

Нерухомі (з ручним очищенням). Найпростіші конструкції. Встановлюються під кутом $60\text{--}80^\circ$. Сміття знімається граблями вручну персоналом. Використовуються лише на дуже малих станціях або як аварійний байпас.

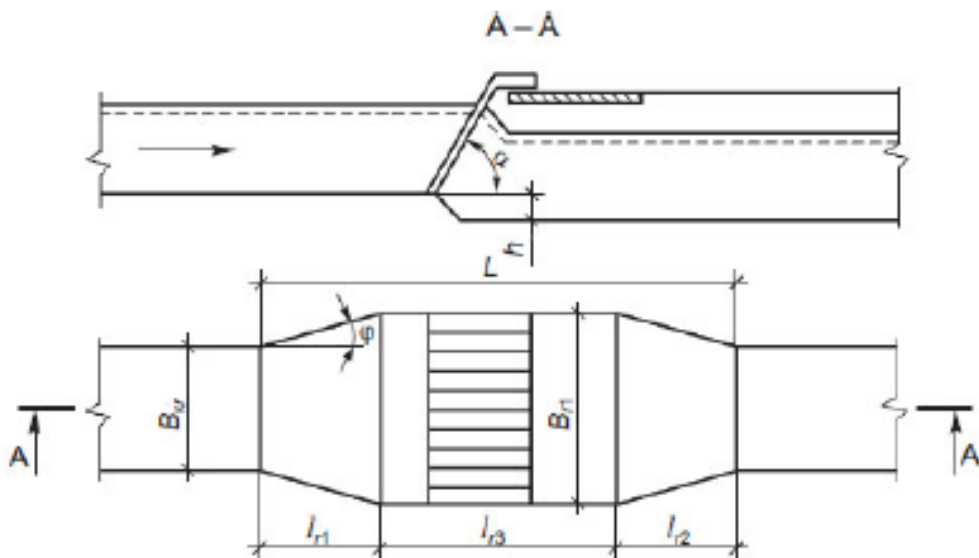


Рисунок 6.1 - Схема установки решітки, де α – кут нахилу решітки (60°); β – 200 ; h – втрати напору у ґратах; h_r – глибина води в лотку перед ґратами; B_{kr} - ширина каналу, що підводить; B_r – ширина лотка у місці встановлення решітки; l_{r1} – довжина лотка, що сполучає підвідний



канал і камеру; l_{r2} - довжина лотка, що сполучає камеру і лоток, що відводить; l_{r3} – довжина камери.

Механізовані. Оснащені приводом (мотор-редуктором), який автоматично видаляє затримані покидьки. Це стандарт для сучасних очисних споруд.

Б. За формою робочої поверхні

Плоскі. Прямі стрижні, встановлені в рамі. Найпоширеніший тип для каналів прямокутного перерізу.

Дугові (криволінійні). Стрижні зігнуті по дузі кола. Очищення проводиться обертовою граблиною. Зручні при обмеженій глибині каналу.

Барабанні (циліндричні). Мають вигляд перфорованого барабана, що обертається. Часто використовуються для тонкого очищення стічних вод.

В. За типом механізму очищення

Це найважливіша категорія для експлуатації:

Ланцюгові (грабельні). Граблини закріплені на безкінечних ланцюгах. Вони піднімають сміття знизу вгору по стрижнях.

Східчасті. Складаються з двох наборів пластин (рухомих та нерухомих). Сміття піднімається вгору за рахунок крокуючого руху пластин. Дуже ефективні для тонкого очищення (прозори 3–6 мм).

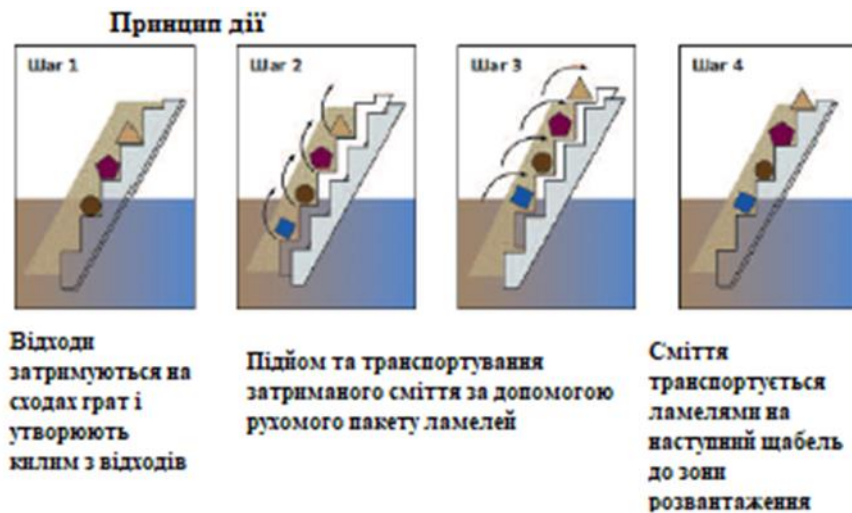


Рисунок 6.2 – Принцип дії східчастих ґрат

Шнекові (роторні). Поєднують у собі ґрати, транспортний шнек та прес. Сміття відразу промивається та віджимається. Найбільш компактне рішення.

Рейкові. Граблина рухається за допомогою жорсткої рейки. Найнадійніші для дуже глибоких каналів та великих предметів.



Г. За розташуванням у каналі
Похилі. Встановлюються під кутом 60–80° до горизонту (найчастіше).

Вертикальні. Встановлюються під кутом 90°. Займають мінімум місця, але мають вищий гідравлічний опір і складніші в очищенні.

Д. За розміром прозорів (технологічна класифікація)

Грубі. Прозори > 20 мм. Захищають від великих предметів (каміння, палиці).

Середні. Прозори 5–20 мм. Стандарт для більшості міських ОСК.

Тонкі. Прозори 1–5 мм. Замінюють первинні відстійники в сучасних схемах.

Гідравлічний режим.

Для ефективної роботи ґрат критично важливими є два параметри:

1. Швидкість у прозорах (v): Має бути в межах 0,8–1,0 м/с. Якщо швидкість < 0,8 м/с — у каналі перед ґратами почне осідати пісок. Якщо > 1,0 м/с — дрібне сміття буде "продавлюватися" крізь стрижні.

2. Втрати напору ($h_{втр}$): Різниця рівнів води до і після ґрат. Коли ґрати засмічуються, цей рівень зростає, що дає сигнал механізму очищення на запуск.

Методика розрахунку конструктивних параметрів ґрат

Геометричні розміри ґрат визначаються на основі розрахункової витрати стічних вод, фізичних параметрів стрижнів (ширини прозорів b та товщини стрижнів s) і гідравлічних умов протікання потоку.

Важлива вимога: Площа "живого перерізу" (прозорів) ґрат повинна перевищувати площу перерізу відповідного каналу:

1) не менше ніж у 2 рази — для ґрат з ручним очищенням;

2) не менше ніж у 1,2 рази — для механізованих ґрат.

А. Розрахунок кількості прозорів

Загальна кількість прозорів $n_{пр}$ визначається за формулою

$$n_{пр} = \frac{Q_{max}}{b_p \cdot h_p \cdot V_p} \cdot K_{ст}, \quad (6.1)$$

де,


Q_{max} — максимальна секундна витрата стічних вод, м³/с;

h_p — глибина наповнення каналу перед спорудою, м;

V_p — розрахункова швидкість руху води у прозорах.

Рекомендується: 0,8–1,0 м/с (для стрижневих) або 1,0–1,4 м/с (для ступінчастих ґрат);

b_p — ширина прозору, м (згідно з ДБН — не більше 0,016 м);



$K_{ст}$ — коефіцієнт стиснення потоку механізмом очищення (приймається в межах 1,05 ... 1,1).

Б. Визначення загальної ширини споруди

Загальна ширина робочої частини ґрат $B_{гр}$ розраховується як:

$$B_{гр} = s \cdot (n_{пр} - 1) + b_p \cdot n_{пр}, \quad (6.2)$$

де s — товщина стрижнів ґрат, м.

Комплектація обладнання:

Кількість одиниць обладнання підбирається відповідно до $B_{гр}$ та стандартної ширини обраної моделі ґрат. При використанні до 3-х робочих ґрат передбачається 1 резервна одиниця. При кількості понад 3 робочих одиниці — 2 резервні.

В. Гідравлічні втрати напору

Втрати напору у ґратах (h) визначаються з урахуванням їх засмічення

$$h = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot K \cdot \sin \alpha, \quad (6.3)$$

Складові формули:

v — швидкість потоку в каналі перед ґратами, м/с;

$K=3$ — коефіцієнт, що враховує збільшення опору внаслідок накопичення сміття;

ζ — коефіцієнт місцевого опору, що залежить від форми стрижнів

$$\zeta = \beta \cdot \left(\frac{S_s}{b_r} \right)^{4/3}, \quad (6.4)$$

β - форма стрижня істотно впливає на турбулентність та втрати енергії. В інженерних розрахунках використовують такі значення: β :

Прямокутний профіль (а): $\beta = 2,42$. Найпростіший у виготовленні, але створює максимальний опір та завихрення.

Прямокутний із закругленою лобовою частиною (б): $\beta = 1,83$. Значно покращує гідравліку, знижуючи опір майже на 25% порівняно із звичайним прямокутником.

Обтічний (крапчастий) профіль (в): $\beta = 1,79$. Найкращі гідравлічні показники, що використовуються в сучасних механізованих ґратах для мінімізації втрат напору.

Примітка: На величину розрахованих втрат $h_{втр}$ необхідно передбачити пониження дна каналу за ґратами для збереження гідравлічного режиму.

Г. Розрахунок габаритів камери ґрат

Загальна будівельна довжина камери L складається з довжини розширювальної частини (l_1), власне довжини решітки ($l_{\text{рiш}}$) та зони стабілізації потоку (l_2)

$$L = l_1 + l_{\text{рiш}} + l_2, \quad (6.5)$$

Довжина розширення (l_1) та звуження (l_2) розраховуємо

$$l_1 = \frac{B_{\text{гр}} - B_{\text{кан}}}{2 \cdot \tan \varphi}, \quad l_2 = 0,5 \cdot l_1, \quad (6.6)$$

де: $B_{\text{кан}}$ — ширина підвідного каналу, φ° — кут розширення.

Довжина ділянки ґрат ($l_{\text{рiш}}$):

– Для вертикальних: $l_{\text{рiш}} = 0,2$ м;

– Для похилих: $l_{\text{рiш}} = \frac{h_s}{\tan \alpha}$ (де h_s — висота ґрат над дном).

Д. Розрахунок накопичення та характеристик відходів

Добовий об'єм відходів (W , м³/доб), що затримуються, залежить від наведеної кількості населення ($N_{\text{пр}}$)

$$W = \frac{a \cdot N_{\text{пр}}}{365 \cdot 1000}, \text{ м}^3/\text{доб} \quad (6.7)$$

де a — питома кількість відходів на одну особу на рік (л/чол·рік), що приймається згідно з ДБН В.2.5-75:2013 залежно від ширини прозорів.

Фізико-хімічні показники відходів:

– Маса відходів ($M_{\text{від}}$): $M_{\text{від}} = W \cdot \rho$ (де ρ — щільність).

– Щільність (ρ): 870 кг/м³ (до зневоднення), 690 кг/м³ (після пресування).

– Вологість: 90% (початкова), 70% (після зневоднення).

– Зольність: 7–8%.

Характеристика відходів, що знімаються з ґрат, їх обробка.

Обсяг відходів, що припадають одну людину на рік, л/(чел·год), приймається за таблицям ДБН В.2.5-75:2013 в залежності від ширини прозорів:

Ширина прозорів, мм	0,5	1	2	3	6	15
Об'єм сміття, л/(чол·рік)	45	34	26	22	16	10

Зольність – 7-8%; вологість сміття 90% - до зневоднення, 70% - після зневоднення; густина приймається 870 кг/м³ - до зневоднення, 690 кг/м³ – після зневоднення.

Приклад розрахунку ґрат

Вихідні дані:

Максимальна секундна витрата стічних вод: $Q_{\text{max}} = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ширина прозору ґрат: $b_p = 16$ мм (0,016 м).

Товщина стрижнів: $s = 8 \text{ мм (0,008 м)}$.
 Швидкість руху води у прозорах: $V_p = 0,9 \text{ м/с}$.
 Глибина води в каналі: $h = 0,6 \text{ м}$.
 Кут нахилу ґрат до горизонту: $\alpha = 70^\circ$.

1. Визначення кількості прозорів ($n_{пр}$)

Кількість прозорів розраховується таким чином, щоб забезпечити пропускну здатність при заданій швидкості:

$$n_{пр} = \frac{Q_{max}}{b_p \cdot h_p \cdot V_p} \cdot K_{ст}, \quad (6.8)$$

де, $K_{ст} = 1.05$ – коефіцієнт, що враховує стиснення потоку стрижнями.

$$n_{пр} = \frac{0,25 \cdot 1,05}{0,016 \cdot 0,6 \cdot 0,9} = \frac{0,2625}{0,00864} \approx 30,38$$

Приймаємо кількість прозорів $n_{пр} = 31$ шт.

2. Розрахунок загальної ширини ґрат ($B_{гр}$)

Ширина залізної конструкції в каналі

$$B_{гр} = s \cdot (n_{пр} - 1) + b_p \cdot n_{пр}, \quad (6.9)$$

$$B_{гр} = 0,008 \cdot (31 - 1) + 0,016 \cdot 31 = 0,736 \text{ м}$$

Приймаємо ширину каналу $B_{гр} = 0,8 \text{ м}$ (з урахуванням конструктивних зазорів).

3. Розрахунок втрат напору (h)

Втрати напору визначаються за формулою

$$h = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot K \cdot \sin \alpha, \quad (6.10)$$

де, ζ — коефіцієнт опору (для прямокутних стрижнів $= 2,42$), $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

$$h = 2,42 \cdot \frac{0,09^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 3 \cdot \sin 70 = 0,279 \approx 28 \text{ см}$$

4. Об'єм відходів

Середньодобова кількість відходів, що затримуються (W):

Приймаємо питому кількість відходів $\omega = 0,05 \text{ л на } 1 \text{ м}^3 \text{ стічних вод}$.

Якщо добова витрата $Q_{сут} = 15000 \text{ м}^3 / \text{доб}$

$$W = \frac{Q_{сут} \cdot \omega}{1000} = \frac{15000 \cdot 0,05}{1000} = 0,75 \text{ м}^3 / \text{доб} \quad (6.11)$$

Методика вибору ґрат за результатами розрахунку



Після виконання гідравлічного розрахунку маємо здійснити інженерний вибір марки обладнання, користуючись наступним алгоритмом:

1. Порівняння розрахункових та паспортних даних:

Розрахункова ширина ґрат ($B_{гр}$) має бути меншою або дорівнювати ширині каналу, в який встановлюється обладнання.

Пропускна здатність обраної марки ґрат повинна бути на 15–20% більшою за вашу максимальну секундну витрату (Q_{max}).

2. Перевірка швидкості:

Якщо обрані ґрати мають стандартну ширину (наприклад, 600, 800 або 1000 мм), необхідно зробити зворотний перерахунок швидкості (V_p) у прозорах. Вона повинна залишатися в межах 0,8–1,0 м/с.

3. Вибір матеріалу:

Для стічних вод з високою корозійною активністю (промислові стоки) слід обирати ґрати з нержавіючої сталі (AISI 304 або AISI 316).

4. Тип механізму:

При кількості відходів понад 0,1 м³/добу обов'язковим є встановлення механізованих ґрат з автоматичним пуском за датчиком рівня (різницею напору).


ЗАВДАННЯ:

1. Визначити розрахункову кількість прозорів ґрат залежно від максимальної годинної витрати стічних вод.
2. Розрахувати гідравлічний опір (втрати напору) у ґратах для запобігання підтопленню каналу.
3. Обчислити об'єм відходів, що затримуються, для вибору обладнання для їх подальшої обробки (подрібнення або вивезення).
4. Провести тренінг з діагностики несправностей механізованих ґрат. Виберіть дані відповідно до вашого номера у списку групи в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1- Варіанти завдань для виконання практичної роботи

№ вар.	Макс. витрата, Q_{max} (м ³ /год)	Ширина прозору, b (мм)	Глибина в каналі, h (м)	Товщина стрижнів, s (мм)	Кут нахилу, α (град)
1	450	10	0,50	6	60
2	900	16	0,70	8	75
3	300	6	0,45	5	80
4	1200	12	0,80	8	70
5	600	10	0,60	6	75
6	1500	20	0,90	10	60

7	750	16	0,65	8	70
8	500	8	0,55	6	80
9	1100	12	0,75	8	75
10	2000	16	1,00	10	70
11	400	10	0,50	5	65
12	850	14	0,70	8	75
13	550	12	0,60	6	80
14	1300	16	0,85	10	70
15	250	5	0,40	4	90

 *Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)*

Розбір ситуацій "Проблема → Причина → Рішення".

Це інтерактивна частина. Необхідно озайомившись з "симптом" і визначити "причину" та "дію".

Ситуація 1. Критичний підпір води

Симптом. Рівень води в підвідному каналі різко піднявся і загрожує переливом через борти, незважаючи на те, що ґрати працюють.

Причина. Залпове надходження великої кількості сміття (наприклад, після зливи), що перевищує розрахунковий коефіцієнт засмічення $K=3$, або прослизання приводних ланцюгів грабель.

Рішення. Негайно перевести ґрати в режим безперервної роботи (Manual/Continuous). Якщо рівень не падає — відкрити байпасну лінію та провести ревізію натягу ланцюгів.

Ситуація 2. Металевий гуркіт у каналі

Симптом. Під час руху грабельного механізму чути сторонні звуки: скрегіт, удари або сильна вібрація.

Причина. Потрапляння в канал великого важкого предмета (каміння, шматок бетону або металу), який заклинило між стрижнями та граблиною.

Рішення. Аварійна зупинка обладнання (кнопка Stop). Відкачати воду або підняти ґрати (якщо це передбачено конструкцією) та видалити предмет вручну. Перевірити цілісність стрижнів та зубців грабель.

Ситуація 3. Неякісне затримання сміття (Проскок)

Симптом. У пісковловлювачах (наступна споруда) виявлено велике сміття (ганчір'я, пластик), яке мали затримати ґрати.



Причина. Механічне пошкодження стрижнів решітки (вигин) або занадто висока швидкість потоку ($v > 1.2\text{ м/с}$), що буквально "продавлює" сміття крізь прозори.

Рішення. Перевірити прозори на наявність деформацій. Якщо швидкість занадто висока, необхідно відрегулювати засувки на вході або перерозподілити потік на інші канали.

Ситуація 4. Осідання піску перед ґратами

Симптом. На дні каналу безпосередньо перед спорудою утворюється товстий шар піску та важких домішок.

Причина. Неправильно розрахована гідравліка камери (занадто широке розширення (l_1) або робота на занижених витратах, через що швидкість потоку впала нижче $0,6\text{ м/с}$).

Рішення. Регулярне промивання дна каналу під тиском. У разі постійної проблеми — встановити в каналі напрямні пластини (дефлектори) для штучного звуження потоку та підтримання швидкості.

Ситуація 5. Відмова автоматичного пуску

Симптом. Рівень води перед ґратами високий, проте механізм очищення не вмикається автоматично.

Причина. Забруднення або запітніння лінз ультразвукових датчиків рівня; обрив сигнального кабелю або помилка в налаштуваннях диференціального рівня (Delta-P) у шафі керування.

Рішення. Очистити поверхні датчиків сухою тканиною. Перевірити налаштування контролера. До моменту виправлення — залишити ґрати в режимі роботи за таймером.

Ситуація 6. Критичні запахи та антисанітарія

Симптом. У павільйоні ґрат відчувається стійкий запах сірководню та гниття, незважаючи на роботу витяжки.

Причина. Відходи в накопичувальному бункері занадто вологі та містять багато органіки (не працює система промивки покидьків) або контейнер вивозиться рідше ніж раз на добу.

Рішення. Відрегулювати форсунки промивки сміття на самих ґратах (це зменшує кількість органіки у відходах). Збільшити частоту вивезення або герметизувати контейнер.

Ситуація 7. Зимове обледеніння

Симптом. На верхній частині ґрат та скидному лотку утворюється лід, що заважає скиданню сміття в бункер.

Причина. Температура в приміщенні нижче $+5^\circ\text{C}$ через несправність опалення або відсутність теплової ізоляції на вузлах скидання.

Рішення: Включити примусовий підігрів камери. Якщо конструкція дозволяє — накрити відкриті частини каналу кришками. Перейти на



безперервне обертання механізму, щоб запобігти примерзанню ланцюгів.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Яка головна мета встановлення ґрат на першому етапі очищення стічних вод?

А) Насичення стічної води киснем для біологічного очищення.

Б) Затримання великих забруднень для захисту насосів та наступних споруд від засмічення.

В) Видалення розчинених органічних речовин та фосфатів.

Г) Зниження температури стічної води перед відстійниками.

2. Якою має бути розрахункова швидкість руху води (v) у прозорах ґрат для запобігання випаданню осаду в каналі?

А) 0,1 – 0,3 м/с.

Б) 0,8 – 1,0 м/с.

В) 2,0 – 2,5 м/с.

Г) Швидкість не регламентується нормами ДБН.

3. Чому дорівнює коефіцієнт (K), що враховує збільшення втрат напору внаслідок накопичення сміття на стрижнях?

А) $K = 1,0$.

Б) $K = 1,5$.

В) $K = 3,0$.

Г) $K = 5,0$.

4. Яка форма стрижнів ґрат має найкращі гідравлічні характеристики (найменший коефіцієнт форми β)?

А) Прямокутна.

Б) Прямокутна з закругленою лобовою частиною.

В) Кругла.

Г) Обтічна (каплеподібна).

5. Відповідно до нормативних вимог, площа прозорів («живий переріз») механізованих ґрат повинна бути не меншою за:

А) Площу перерізу підвідного каналу.

Б) 1,2 площі перерізу підвідного каналу.

В) Подвійну площу перерізу підвідного каналу.

Г) Половину площі перерізу підвідного каналу.

6. Що є основною причиною накопичення піску та мулу в камері безпосередньо *перед* ґратами?

А) Занадто велика кількість прозорів.

Б) Зниження швидкості потоку нижче 0,6 м/с через надмірне розширення камери.

В) Використання обтічних стрижнів замість прямокутних.



Г) Високий кут нахилу ґрат до горизонту ($\alpha = 80^\circ$).

7. З якою метою дно камери безпосередньо за ґратами виконується з уступом (зниженням) на величину розрахованих втрат напору ($h_{\text{втр}}$)?

А) Для зручності монтажу механічного обладнання.

Б) Для компенсації втрат енергії потоку та збереження розрахункового рівня води в наступних спорудах.

В) Для додаткового затримання важких мінеральних домішок.

Г) Для зменшення швидкості потоку перед пісковловлювачами.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Водопостачання та водовідведення : курс лекцій. Для студентів денної форми навчання. Спеціальність 101 «Екологія» Освітньо кваліфікаційний ступінь «магістр». / уклад. О. В. Рибалова. Харків : НУЦЗУ, 2017. 195 с. URL: repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/5274/1/ВОДОПОСТАЧАННЯ%20ТА%20ВОДОВІДВЕДЕННЯ.pdf

2. Левандовський Л. В., Бублієнко Н. О., Семенова О. І. Природоохоронні технології та обладнання : підруч. Київ : НУХТ, 2013. 243 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f56ff878-efc9-41ec-bb4e-3c354bb664df>

3. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 2. Методи очищення стічних вод : підручник / В. Г. Петрук та ін. Херсон : Олді-плюс, 2019. 298 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Petruk_P2_2014_258.pdf

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ РОБОТИ АЕРОТЕНКА

МЕТА РОБОТИ:

Опанувати методику інженерного розрахунку споруд біологічного очищення стічних вод (аеротенків) та засвоїти принципи експлуатаційного контролю за станом активного мулу для забезпечення стабільно високої ефективності видалення органічних забруднень і біогенних елементів.

ТЕОРЕТИЧНИЙ ЧАСТИНА:

Біологічне очищення — це процес мінералізації органічних забруднень стічних вод за допомогою діяльності мікроорганізмів. В основі методу лежить природна здатність бактерій використовувати органічні речовини (бруд) як джерело живлення та енергії.

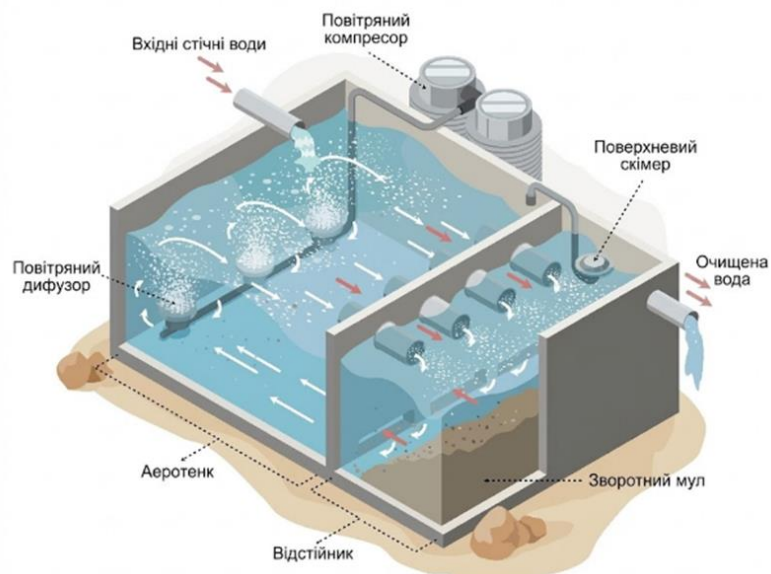


Рисунок 7.1- Конструктивна схема аеротенка-витискувача

В умовах очисних споруд цей процес інтенсифікується у сотні разів завдяки штучній подачі кисню (аерації).

Головним "робочим інструментом" в аеротенку є активний мул. Це складна екосистема (біоценоз), що складається з:

- 1) Бактерій-деструкторів. Основна маса, яка окислює забруднення.
- 2) Найпростіших . Інфузорії, амеби, коловертки (виконують роль санітарів, поїдаючи старі бактерії та освітлюючи воду).



3) Зооглеї. Слизової речовини, яка склеює бактерії у пластівці (флокули), що дозволяє їм швидко осідати у відстійниках. Стадії процесу очищення в аеротенку. Процес очищення проходить у три умовні стадії:

1) Адсорбція (5–30 хв). При контакті стічної води з активним мулом забруднення миттєво "прилипають" до поверхні пластівців мулу. На цій стадії вилучається до 70% завислих та колоїдних речовин.

2) Окислення та синтез клітин (кілька годин). Бактерії виділяють ферменти, розщеплюють органіку (БСК) і використовують її для розмноження. Для цього етапу критично необхідний кисень.

Реакція: Органіка + O_2 + Бактерії \rightarrow CO_2 + H_2O + Нові бактерії + Енергія.

3) Нітрифікація (додатково. Якщо час аерації довгий (як у вашому проєкті — 12 годин), спеціальні бактерії (нітросомонас, нітробактер) окислюють токсичний амоній (NH_4^+) до безпечних нітратів (NO_3^-).

4. Технологічні параметри контролю

Для керування аеротенком технолог використовує такі параметри:

1) Доза мулу (a_t , г/л). Концентрація сухої речовини мулу в аеротенку. Норма: 2–4 г/л. Якщо менше — очищення повільне; якщо більше — мул важко відділити.

2) Муловий індекс (J_t , мл/г). Об'єм, який займає 1 грам мулу після 30 хвилин відстоювання.

Норма: 80–120 мл/г.

$J_t > 150$: Мул "спухає" (хворіє), погано осідає і виноситься з водою.

3) Розчинений кисень. Має бути не менше 2 мг/л.

4) Рециркуляція (R). Повернення мулу з вторинного відстійника в аеротенк. Без цього концентрація бактерій впаде, і процес зупиниться.

Класифікація аеротенків — це важлива тема для розуміння того, чому ми обираємо ту чи іншу споруду для проєкту. В залежності від того, як рухається вода, як подається повітря і чи "відпочиває" мул, аеротенки поділяються на кілька основних груп.

Детальна класифікація.

1. За гідродинамічним режимом (Найважливіша класифікація)

Це поділ залежить від того, як стічна вода змішується з активним мулом всередині резервуара.

А) Аеротенки-витискувачі.

Принцип. Вода рухається довгим коридором, наче "поршень". На вході концентрація забруднень максимальна, на виході — мінімальна. Вода не змішується з тією, що надійшла раніше.



Особливість. Забезпечують найвищу якість очищення, оскільки немає "проскоку" брудної води до виходу.

Застосування. Для глибокого очищення побутових та промислових стоків.

Б) Аеротенки-змішувачі.

Принцип. Стічна вода подається і миттєво перемішується з усім об'ємом аеротенка. Концентрація забруднень однакова в будь-якій точці резервуара.

Особливість. Дуже стійкі до залпових скидів токсичних речовин (концентрація отрути миттєво падає через розбавлення). Але якість очищення трохи нижча, ніж у витискувачів.

Застосування. Для концентрованих промислових стоків.

В) Аеротенки з розосередженим впуском

Принцип: Проміжний варіант. Вода подається не в одну точку, а в кілька точок уздовж коридору. Це дозволяє вирівняти навантаження на мул.

2. За наявністю регенерації активного мулу

Активний мул "втомлюється" і насичується брудом. Йому іноді треба час, щоб "перетравити" накопичене без додавання нової їжі.

Без регенератора. Мул з вторинного відстійника одразу повертається в початок аеротенка і знову змішується зі стічною водою. (Підходить для слабких стоків).

З регенератором. Зворотний мул спочатку потрапляє в окремий коридор (регенератор), де продувається повітрям без стічної води. Там він відновлює свою активність (окислює сорбовані забруднення) і лише потім іде в процес. Це збільшує ефективність роботи на 20-30%.

3. За навантаженням на активний мул

Цей параметр визначає, як швидко і глибоко пройде очищення.


Високонавантажені (Неповне очищення). Мул працює на межі можливостей, вилучає тільки частину органіки. Використовується як перший ступінь перед іншими спорудами.

Класичні (Повне біологічне очищення). Забезпечують зниження БСК до 15–20 мг/л.

Низьконавантажені (Продовжена аерація). Час перебування води дуже довгий (24+ години). В таких аеротенках відбувається не тільки очищення води, а й аеробна стабілізація самого мулу (він самоокислюється і його стає менше).

4. За конструктивними ознаками

Коридорні. Прямокутні резервуари, розділені поздовжніми перегородками. Довжина коридору значно перевищує ширину (зазвичай 2-4 коридори).



Карусельні (Окситенки). Вода рухається по замкнутому колу (овалу). Зазвичай використовуються з механічними аераторами.

Шахтні. Дуже глибокі резервуари (до 30–100 м під землею). Завдяки високому тиску кисень розчиняється у воді набагато краще.

Комбіновані (Аеротенки-відстійники). В одній споруді поєднано зону аерації і зону відстоювання (наприклад, аероакселератори).

5. За системою аерації (подачі кисню)

Пневматична. Повітря подається компресорами через труби і виходить бульбашками через аератори (дискові, трубчасті) на дні.

Дрібнобульбашкова (найефективніша).

Середньо- та крупнобульбашкова (менш ефективна, але не забивається).

Механічна. На поверхні води стоять турбіни або щітки, які розбризкують воду, насичуючи її киснем з атмосфери.

Струменева (Ежекторна). Вода під тиском змішується з повітрям у спеціальних соплах.

Приклад розрахунку

Вхідні дані.

- Витрата стічних вод ($Q_{\text{доб}}$): 600м³/добу (після усереднювача — рівномірна).
- БСК повне на вході ($L_{\text{ВСКвхід}}$): 300мг/л.
- БСК повне на виході ($L_{\text{ВСКвихід}}$): 15мг/л (вимога для оборотної води).
- Доза активного мулу (a_i): 4,0 г/л (робоча концентрація в аеротенку).
- Швидкість окислення ($r_{\text{но}}$): 6,0 мг БСК/(г мулу·год).

Хід розрахунку.

Завдання 1. Розрахунок геометричних параметрів

Визначте необхідний час перебування води в споруді та її об'єм.

1. Необхідний ступінь очищення (E)

$$E = \frac{L_{\text{ВСКвхід}} - L_{\text{ВСКвихід}}}{L_{\text{ВСКвхід}}} \cdot 100\% = \frac{300 - 15}{300} \cdot 100\% = 95\% \quad (7.1)$$

2. Період аерації ($t_{\text{аер}}$). Це час, за який бактерії встигнуть "з'їсти" органіку.

$$t_{\text{аер}} = \frac{L_{\text{ВСКвхід}} - L_{\text{ВСКвихід}}}{a_i \cdot \rho} \quad (7.2)$$

3. Робочий об'єм аеротенка (W)

$$W = \frac{Q_{\text{доб}} \cdot t_{\text{аер}}}{24} = \frac{600 \cdot 12}{24} = 300 \text{ м}^3 \quad (7.3)$$

(Приймаємо типовий залізобетонний резервуар 310 м³).

Завдання 2. Забезпечення дихання бактерій

Бактерії — це живі організми, їм потрібен кисень. Якщо компресор подасть мало повітря, мул "задихнеться" і почне гнити.

1. Маса знятих забруднень (БСК) за добу

$$M_{BOD} = Q_{\text{доб}} \cdot (L_{\text{ВСКвхйд}} - L_{\text{ВСКвихйд}}) \cdot 10^{-3} \quad (7.4)$$
$$= 600 \cdot 285 \cdot 0,001 = 171 \text{ кг/доб}$$

2. Потреба в повітрі. Питома витрата повітря (q_{air}) для аеротенків-витискувачів складає $\approx 50 \text{ м}^3$ повітря на 1 кг знятого БСК.

$$q_{air} = 171 \cdot 50 = 8550 \text{ м}^3/\text{год}$$

Потужність повітродувки: $\frac{8550}{24} \approx 356 \text{ м}^3/\text{год}$

Завдання 3. Лабораторний контроль (Симуляція)

Уявіть, що ви технолог цеху. Вам принесли проби з аеротенка.

Дано. Ви відібрали 1 літр суміші з аеротенка в мірний циліндр. Через 30 хвилин відстоювання осад зайняв об'єм $V_{30} = 320$ мл. Вагова концентрація сухого мулу в цій пробі (після висушування) склала $a_i = 4,0$ г/л.

Розрахувати. Муловий Індекс (J_i):

Це показник "здоров'я" мулу. Він показує, який об'єм займає 1 грам мулу.

$$J_i = \frac{V_{30}}{a_i} = \frac{320}{4,0} = 80 \text{ мл/г} \quad (7.5)$$

Аналіз результату.

Норма: 80-120 мл/г.

Ваш висновок (приклад). Мул у відмінному стані, добре осідає. Вторинний відстійник працюватиме ефективно, виносу мулу не буде.

В таблиці 1 надані дані для розрахунку блоку біологічного очищення стічних вод (Аеротенк + Вторинний відстійник). У кожному варіанті змінено основні параметри, що впливають на об'єм споруд та кількість повітря.

Використовуючи свій номер варіанту, виконайте наступні розрахунки:

1. Розрахунок Усереднювача:

- 1) Визначити максимальну годинну витрату $Q_{\text{max.год}} = \frac{Q_{\text{доб}} \cdot K_{\text{max.нер}}}{24}$.
- 2) Визначити корисний об'єм усереднювача, приймаючи час пікового навантаження $t_{\text{пик}} = 3$ години.

2. Розрахунок Аеротенка:

- 1) Розрахувати необхідний ступінь очищення (E), якщо норма на виході $L_{\text{ВСКвихйд}} = 15$ мг/л.

- 2) Визначити час аерації (t_{aep}), приймаючи швидкість окислення $\rho=6$ мг/(г·год).
- 3) Визначити будівельний об'єм аеротенка (W).
- 4) Розрахувати добову потребу в повітрі (Q_{air}), приймаючи питому витрату 50 м³/кг БСК.

3. Розрахунок Вторинного відстійника:

- 1) Визначити площу дзеркала води (F), приймаючи гідравлічне навантаження $q_{en} = 1,5$ м³/(м²·год).
- 2) Підібрати діаметр відстійника (D).

ЗАВДАННЯ:

1) Розрахунок усереднювача: визначення максимальної годинної витрати; визначення корисного об'єму усереднювача.

2) Розрахунок аеротенка: розрахунок необхідного ступеня очищення; визначення часу аерації; визначення будівельного об'єму аеротенка; розрахунок добової потреби в повітрі.

3) Розрахунок вторинного відстійника: визначення площі дзеркала води; підбір діаметра відстійника.

Таблиця 7.1- Варіанти для розрахунку

№ Варіанту	Витрата стічних вод, Q_{dob} (м ³ /добу)	БСК повне на вході, $L_{BCKвхід}$ (мг/л)	Завислі речовини, $C_{зр}$ (мг/л)	Доза активного мулу, a_i (г/л)	Коеф. нерівномірності, $K_{max.нер}$
1	600	250	300	3,0	2,5
2	650	280	320	3,5	2,8
3	700	300	350	4,0	3,0
4	750	320	380	4,5	2,6
5	800	350	400	3,0	3,1
6	850	220	280	2,5	2,4
7	900	260	310	3,2	2,9
8	950	290	340	3,8	2,5
9	1000	310	360	4,2	3,0
10	1100	330	390	4,0	3,2
11	1200	380	450	5,0	2,8
12	550	400	500	3,5	3,5
13	680	240	290	2,8	2,7
14	720	275	330	3,6	2,9
15	1500	200	250	3,0	2,2



Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)

Розбір ситуацій "Проблема → Причина → Рішення".

Це інтерактивна частина. Необхідно озайомившись з "симптом" і визначити "причину" та "дію".

Ситуація 1. Спухання активного мулу

Проблема: Мул погано осідає у вторинному відстійнику, муловий індекс (SVI) перевищує 150–200 мл/г.

Причина: Розвиток нитчастих бактерій через низьку концентрацію кисню (DO), дефіцит поживних речовин (азоту/фосфору) або низьке значення рН.

Рішення: Збільшити подачу повітря, перевірити та збалансувати співвідношення БПК:N:P (100:5:1), за потреби додати хлорну воду для пригнічення нитчастих бактерій.

Ситуація 2. "Спливання" мулу у вторинному відстійнику

Проблема: Великі пластівці мулу піднімаються на поверхню вторинного відстійника.

Причина: Процес денітрифікації у відстійнику (виділення бульбашок азоту, які піднімають мул) через занадто довге перебування мулу без кисню.

Рішення: Збільшити швидкість рециркуляції зворотного активного мулу (RAS), зменшити час перебування мулу в зоні без аерації.

Ситуація 3. Поява густої коричневої піни на поверхні

Проблема: Поверхня аеротенка вкрита стійкою маслянистою піною шоколадного кольору.

Причина: Розвиток специфічних організмів (*Nocardia*) через занадто великий вік мулу або наявність великої кількості жирів у стічній воді.

Рішення: Зменшити вік мулу (збільшити відведення надлишкового мулу), перевірити роботу жировловлювачів на етапі механічної очистки.

Ситуація 4. Різке падіння розчиненого кисню при стабільній роботі аераторів

Проблема: Концентрація кисню падає нижче 1 мг/л, незважаючи на максимальну потужність повітрорудовок.

Причина: Гідравлічне перевантаження або різкий "залповий" скид органічних забруднень (високе БПК).

Рішення: Тимчасово обмежити вхідний потік, задіяти резервні секції аеротенків, перевірити роботу усереднювача.

Ситуація 5. Мул стає чорним і має запах тухлих яєць

Проблема: Зміна кольору мулової суміші з коричневого на чорний, поява запаху сірководню.



Причина: Анаеробні умови (дефіцит кисню), застійні зони в аеротенку ("мертві зони").

Рішення: Оптимізувати розподіл повітря, промити аератори, перевірити гідродинаміку потоків (можливо, за допомогою моделювання в Autodesk CFD для виявлення зон без перемішування).

Ситуація 6: Дрібні пластівці мулу у вихідній воді (Pin-point floc)

Проблема: Очищена вода каламутна через дрібні частки мулу, які не осідають.

Причина: Надмірне окиснення активного мулу (занадто довга аерація або "голодування" мікроорганізмів).

Рішення: Зменшити інтенсивність аерації, збільшити подачу сирової стічної води або зменшити кількість активного мулу в системі.

Ситуація 7: Винос мулу при дощі (гідравлічний удар)

Проблема: Під час зливи активний мул вимивається з аеротенків у відстійники та далі у водойму.

Причина: Відсутність або неефективність роздільної системи каналізації; різке зростання витрати (Q).

Рішення: Переведення аеротенків у режим регенерації, тимчасове зберігання надлишкового мулу в запасних ємностях, регулювання роботи байпасних ліній.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Який основний параметр визначає технологічний об'єм аеротенка (W)?

А) Глибина споруди та кількість аераторів;

Б) Розрахункова витрата стічних вод та необхідна тривалість аерації;

В) Діаметр вторинного відстійника;

Г) Швидкість обертання валу повітродувки.

2. Яка концентрація розчиненого кисню вважається оптимальною в аеротенку-змішувачі?

А) 0,5 мг/л;

Б) 2,0 мг/л;

В) 5,0 мг/л;

Г) 10,0 мг/л.

3. Що характеризує муловий індекс (SVI)?

А) Колір та запах активного мулу;

Б) Здатність активного мулу до осідання та його ущільнення;

В) Кількість бактерій у 1 м³ води;

Г) Концентрацію азоту та фосфору.



4. Головна мета рециркуляції активного мулу (RAS) з вторинного відстійника:

А) Охолодження мулової суміші;

Б) Підтримання робочої дози біомаси (активного мулу) в аеротенку;

В) Очищення дна відстійника від піску;

Г) Збільшення напору в системі подачі повітря.

5. Як впливає зниження температури стічної води на розрахунковий час аерації?

А) Час аерації необхідно збільшити;

Б) Час аерації необхідно зменшити;

В) Температура не впливає на тривалість очищення;

Г) Аеротенк необхідно перевести в режим відстійника.

6. Вік мулу — це параметр, що визначається як:

А) Час від моменту запуску очисних споруд;

Б) Відношення загальної маси мулу в системі до маси надлишкового мулу, що видаляється за добу;

В) Термін придатності аераційних систем;

Г) Час перебування води в усереднювачі.

7. Від чого найбільше залежить добова потреба в повітрі для аеротенка?

А) Від атмосферного тиску;

Б) Від кількості видаленого забруднення за БПК та інтенсивності дихання мулу;

В) Від матеріалу, з якого виготовлено аератори;

Г) Від відстані до повітродувної станції.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Водопостачання та водовідведення : курс лекцій. Для студентів денної форми навчання. Спеціальність 101 «Екологія» Освітньо кваліфікаційний ступінь «магістр». / уклад. О. В. Рибалова. Харків : НУЦЗУ, 2017. 195 с. URL: repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/5274/1/ВОДОПОСТАЧАННЯ%20ТА%20ВОДОВІДВЕДЕННЯ.pdf

2. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 2. Методи очищення стічних вод : підручник / В. Г. Петрук та ін. Херсон : Олді-плюс, 2019. 298 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Petruk_P2_2014_258.pdf

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8 РОЗРАХУНОК ЗЕРНИСТИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ДООЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

МЕТА РОБОТИ:

Навчитися розраховувати площу фільтрування, кількість фільтрів та параметри промивки для стадії глибокого очищення стічних вод (доведення до норм скиду у водойми).

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

Фільтрування — це процес проходження води крізь пористе середовище, яке затримує завислі речовини. У схемах очищення стічних вод найчастіше використовуються швидкі безнапірні (гравітаційні) фільтри з зернистим завантаженням (кварцовий пісок, антрацит, керамзит).

Принципова схема роботи

Вода подається зверху, проходить крізь шар завантаження та дренажну систему, і відводиться як фільтрат. Коли фільтр забруднюється (зростають втрати напору), його виводять на промивку (подача води та/або повітря знизу вгору).

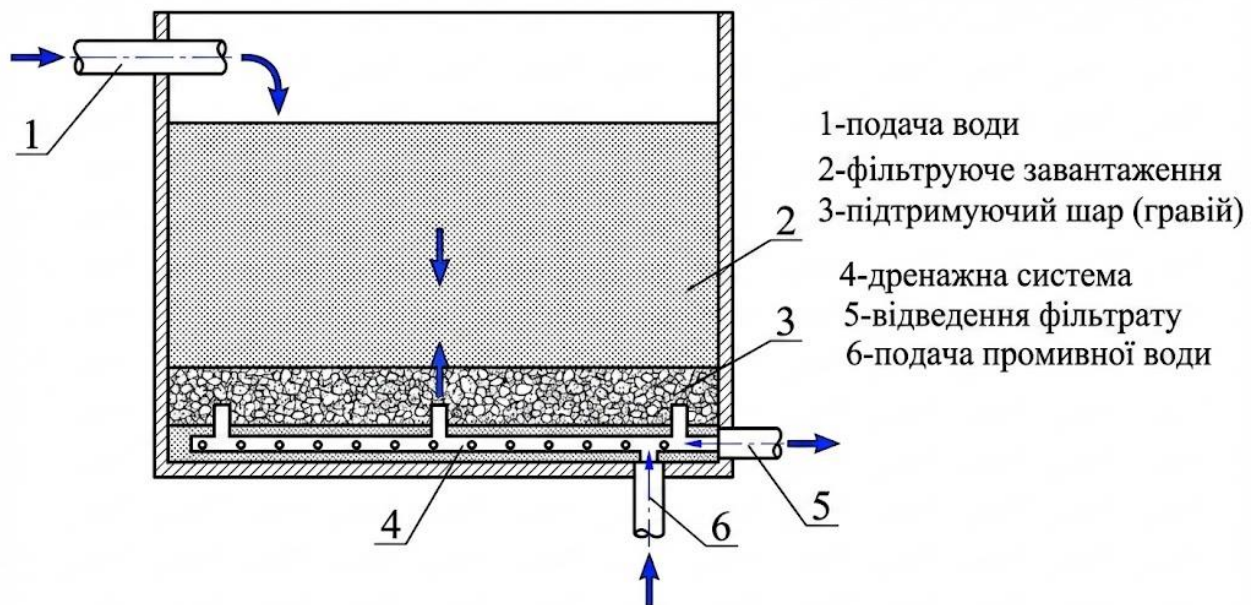


Рисунок 8.1. -Схема швидкого гравітаційного фільтра: 1-подача води, 2-фільтруюче завантаження, 3-підтримуючий шар (гравій), 4-дренажна система, 5-відведення фільтрату, 6-подача промивної води.

Основні параметри процесу:

1. Швидкість фільтрування ($v_{\text{філ}}$). Зазвичай 6–12 м/год для швидких фільтрів.
2. Грязеємність. Кількість забруднень, яку може затримати об'єм завантаження до проскоку каламутності або критичної втрати напору.
3. Розширення завантаження. Під час промивки шар піску повинен "кипіти" (збільшуватися в об'ємі на 30-50%), щоб відмити бруд.

Завдання для всіх варіантів наданих в таблиці 1:

1. Розрахувати площу та кількість фільтрів.
2. Підібрати розміри (довжина/ширина).
3. Перевірити форсовану швидкість.
4. Розрахувати об'єм води на одну промивку.

2. Приклад розрахунку

Приклад.

Вихідні дані:

Витрата стічних вод (повна): $Q_{\text{доб}} = 5000$ м³/добу.

Швидкість фільтрування (нормальна): $v_{\text{філт}} = 8$ м/год.

Час роботи станції: $T = 24$ год.

Інтенсивність промивки: $q_{\text{пром}} = 15$ л/(с · м²).

Час промивки: $t_{\text{пром}} = 6$ хв.

Хід розрахунку:

1. Визначення загальної площі фільтрування ($F_{\text{філ}}$)

Використовуємо формулу:


$$F_{\text{філ}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{T \cdot v_{\text{філт}}} \cdot k_{\text{витр}}, \quad (8.1)$$

де T — ефективний час роботи (за вирахуванням часу на промивку, зазвичай беруть 22-23 години, або розраховують точно). Для спрощення прийmemo роботу 24 год, але врахуємо $k_{\text{витр}} = 1,04 \dots 1,06$ — коефіцієнт витрати води на власні потреби станції, приймається за СНІП або ДБН, зазвичай беруть 1.05

$$F_{\text{філ}} = \frac{5000}{24 \cdot 8} \cdot 1,05 = 27,34 \text{ м}^2$$

2. Визначення кількості фільтрів ($N_{\text{фільт}}$).

Емпірична формула: $N_{\text{фільт}} = 0,5 \cdot \sqrt{F_{\text{філ}}}$.


$$N_{\text{фільтр}} = 0,5 \cdot \sqrt{27,34} = 2,6 .$$

Приймаємо $N_{\text{фільтр}} = 3$ робочих фільтри.

4. Розрахунок площі одного фільтра ($f_{1\phi}$)

5.

$$f_{1\phi} = \frac{F_{\text{філ}}}{N_{\text{фільтр}}} = \frac{27,34}{3} = 9,11 \text{ м}^2 \quad (8.2)$$

Розміри у плані: наприклад, 3×3 м (або 3×3.05 м).

4. Перевірка швидкості при форсованому режимі ($v_{\text{форс.р}}$)

Коли один фільтр на ремонті/промивці, інші беруть на себе навантаження. Швидкість не повинна перевищувати 12-14 м/год.

$$v_{\text{форс.р}} = \frac{Q_{\text{годин}}}{f_{1\phi} \cdot (N_{\text{фільтр}} - 1)} = \frac{208,3}{9,11 \cdot 2} = 11,43 \text{ м/год} \quad (8.3)$$

Висновок: $11.43 < 12$. Умова виконується.

6. Витрата води на промивку ($Q_{\text{пром}}$)

7.

$$Q_{\text{пром}} = f_{1\phi} \cdot q_{\text{пром}} \quad (8.4)$$

Переводимо $q_{\text{пром}}$ м³/год: $15 \text{ л/с} \cdot \text{м}^2 = 0.015 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2$.

$$Q_{\text{пром}} = 9,11 \cdot 15 = 136,65 \text{ л/с}$$


ЗАВДАННЯ:

Здійснити інженерний розрахунок станції фільтрування для доочищення виробничих стічних вод:

1. Розрахувати площу та кількість фільтрів.
2. Підібрати розміри (довжина/ширина).
3. Перевірити форсовану швидкість.
4. Розрахувати об'єм води на одну промивку. Вибіримо варіант відповідно до списку в журналі.

Таблиця 8.1- Варіанти завдань

Вар.	$Q_{\text{доб}}$ (м ³ /добу)	Тип стічних вод	$v_{\text{філт}}$ (м/год)	Завантаження
1	1200	Побутові (селище)	6	Пісок кварцовий
2	2500	Побутові (місто)	7	Пісок кварцовий
3	8000	Промислові (текстиль)	8	Антрацит
4	15000	Міські очисні	10	Двошарове (пісок+антрацит)
5	450	Локальні (автомийка)	5	Керамзит
6	3200	Харчова пром.	6	Пісок кварцовий
7	6000	Паперова фабрика	8	Полімери (пінополістирол)
8	50000	Мегаполіс	12	Гравійний каркас
9	200	Санаторій	5	Цеоліт
10	1800	Нафтопереробка	7	Антрацит
11	9500	Хім. виробництво	9	Двошарове
12	4000	Молокозавод	6	Пісок кварцовий
13	11000	Змішані стоки	8	Керамзит
14	700	Котеджне містечко	5	Пісок кварцовий
15	22000	Металургія	10	Гранодіорит

 **Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)**

Розбір ситуацій "Проблема → Причина → Рішення".

Це інтерактивна частина. Необхідно ознайомитись з "симптомом" і визначити "причину" та "дію".

Сценарій 1: "Грязьові кульки"

Симптом: При розкритті фільтра виявлено злиплі грудки бруду та піску на поверхні або в товщі.

Причина: Недостатня інтенсивність промивки; відсутність поверхневої промивки.

Рішення: Збільшити інтенсивність подачі води, перевірити систему повітряної промивки, механічне розпушення.

Сценарій 2: Виніс завантаження

Симптом: Рівень піску у фільтрі знижується з часом, пісок з'являється у каналі відведення промивної води.

Причина: Занадто висока інтенсивність промивки; жолоби розташовані занадто низько.



Рішення: Відрегулювати засувки на лінії промивки, перевірити горизонт жолобів.

Сценарій 3: Повітряні пробки- проблеми дренажу

Симптом: Різке зростання втрат напору, "вибухи" повітря під час початку промивки.

Причина: Виділення розчиненого повітря у порах завантаження через вакуум або нагрів води. Проблеми дренажу: засмічення або корозія ковпачків (дюз), що веде до "мертвих зон" при промивці.

Рішення: Підтримувати достатній рівень води над завантаженням, частіше промивати.

Сценарій 4: "Канальний ефект"

Симптом: Якість очищеної води різко погіршується, хоча фільтр щойно промитий; візуально спостерігаються заглиблення або "лійки" на поверхні завантаження.

Причина: Нерівномірний розподіл води по площі фільтра; пошкодження дренажної системи (сопел/ковпачків) або забруднення частини поверхні фільтра, через що вода "пробиває" собі шлях у місцях найменшого опору.

Рішення: Перевірка та чищення розподільчих лотків; огляд дренажної системи; вирівнювання поверхні завантаження; перевірка рівномірності подачі повітря при промивці.

Сценарій 5: Прорив забруднень

Симптом: Мутність очищеної води зростає, хоча критичних втрат напору (засмічення) ще не досягнуто.

Причина: Занадто висока швидкість фільтрування; значні коливання витрати стічних вод (гідравлічні удари); завантаження вичерпало свою брудоемність через зміну складу вхідної води.

Рішення: Стабілізація швидкості фільтрування; перевірка дозування коагулянтів/флокулянтів (якщо вони використовуються); скорочення фільтроциклу (часу між промивками).

Сценарій 6. "Сліплення" поверхні завантаження (Blinding)

Симптом: Фільтр дуже швидко (через 2–4 години) досягає критичного опору, втрата напору зростає майже миттєво.

Причина: Висока концентрація завислих речовин або наявність липких біологічних плівок/водоростей у воді, що надходить на доочищення; утворення щільної кірки на самому верху піску.

Рішення: Покращення роботи попередніх ступенів очищення (вторинних відстійників); введення стадії повітряного розпушення перед водяною промивкою; дезінфекція завантаження для видалення біоплівки.

Сценарій 7: Нерівномірне розширення завантаження при промивці



Симптом: Під час промивки вода в одній частині фільтра "кипить", а в іншій завантаження залишається нерухомим.

Причина: Засмічення або поломка окремих дренажних ковпачків; зміщення шарів гравійної підтримки (якщо вона є); потрапляння повітря в дренажну систему.

Рішення: Капітальний огляд дренажної системи та її промивка; перевантаження підтримуючих шарів гравію; перевірка та очищення повітровідвідних клапанів.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Оператор помітив, що на поверхні піску утворилися "грязьові кульки" (зліплі грудки мулу). Яка найбільш ймовірна причина цього явища?

- А) Занадто висока швидкість фільтрування
- Б) Недостатня інтенсивність промивки
- В) Занадто великий розмір зерен завантаження
- Г) Низька температура води

2. Під час промивки фільтра спостерігається виніс фільтруючого матеріалу (піску) у жолоби. Що слід зробити в першу чергу?

- А) Збільшити час промивки
- Б) Знизити інтенсивність промивки
- В) Додати коагулянт у промивну воду
- Г) Зменшити рівень води над завантаженням

3. Що таке "повітряна пробка" у фільтрі і як вона проявляється?

А) Накопичення повітря в дренажі, що викликає вібрацію труб
Б) Виділення бульбашок повітря в порах завантаження, що різко збільшує опір

- В) Потрапляння повітря з компресора в очищену воду
- Г) Утворення піни на поверхні фільтра

4. Який параметр визначає момент виведення фільтра на промивку?

- А) Тільки час роботи фільтра (за графіком)
- Б) Досягнення граничної втрати напору або проскок каламутності
- В) Зменшення витрати води на вході в станцію
- Г) Підвищення температури води

5. Для чого використовується гравійний підтримуючий шар під піском?

А) Для додаткової доочистки води від вірусів
Б) Щоб запобігти вимиванню піску в дренаж та рівномірно розподілити воду



- В) Для зменшення жорсткості води
Г) Для створення вакууму під фільтром
6. Розрахункова площа фільтрації становить 30 м². Скільки фільтрів краще запроєктувати?
- А) 1 фільтр площею 30 м²
Б) 3-4 фільтри
В) 10 фільтрів по 3 м²
Г) 2 фільтри (один робочий, один резервний)
7. Чому важливо не допускати утворення від'ємного тиску (вакууму) в товщі завантаження?
- А) Це призводить до руйнування дренажних труб
Б) Це викликає виділення розчиненого повітря і блокування пор
В) Це збільшує витрату реагентів
Г) Це призводить до корозії бетону

ЛІТЕРАТУРА:

1. Водопостачання та водовідведення : курс лекцій. Для студентів денної форми навчання. Спеціальність 101 «Екологія» Освітньо кваліфікаційний ступінь «магістр». / уклад. О. В. Рибалова. Харків : НУЦЗУ, 2017. 195 с. URL: repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/5274/1/ВОДОПОСТАЧАННЯ%20ТА%20ВОДОВІДВЕДЕННЯ.pdf
2. Левандовський Л. В., Бублієнко Н. О., Семенова О. І. Природоохоронні технології та обладнання : підруч. Київ : НУХТ, 2013. 243 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f56ff878-efc9-41ec-bb4e-3c354bb664df>
3. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 2. Методи очищення стічних вод : підручник / В. Г. Петрук та ін. Херсон : Олді-плюс, 2019. 298 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Petruk_P2_2014_258.pdf

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 9 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВЕНТИЛЯТОРНОЇ ГРАДИРНІ ДЛЯ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

МЕТА РОБОТИ:

Формування у слухачів навичок інженерного проектування систем оборотного водопостачання, зокрема засвоєння методики теплового розрахунку градирень та глибоке розуміння фізичних процесів тепломасообміну при випарному охолодженні.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

Градирня — це теплообмінний пристрій, у якому вода охолоджується потоком атмосферного повітря (рисунок 9.1, 9.2).

Основні принципи роботи градирні:

1. Випарне охолодження. Основна частина тепла (близько 80-90%) відводиться за рахунок випаровування невеликої частини циркулюючої води. Решта — за рахунок конвективного теплообміну (контакту води з холоднішим повітрям).
2. Зрошувач. Ключовий елемент, який збільшує площу контакту води та повітря.
3. Тяга. Може бути природною (гіперболічні вежі) або примусовою (вентиляторні градирні).

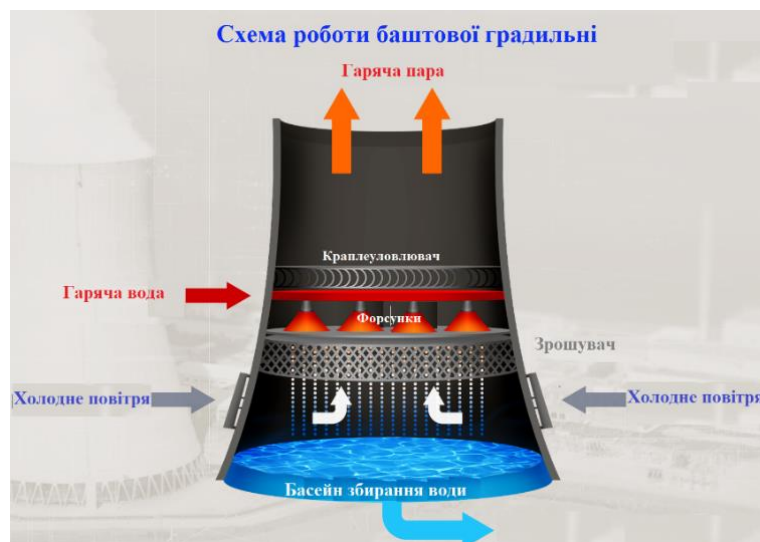


Рисунок 9.1- Схема роботи баштової градирні

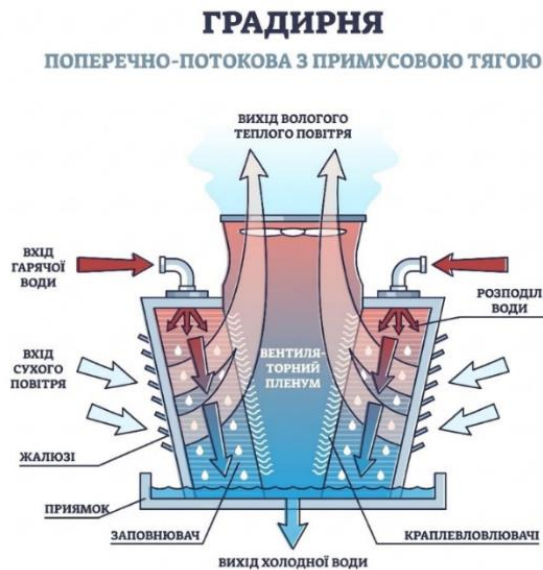


Рисунок 9.2- Схема роботи градирні з примусовою тягою

Градирні класифікують за декількома основними ознаками: способом подачі повітря, напрямком руху води та повітря, а також за типом теплообміну.

1. За способом подачі повітря (тягою) і є найпоширеніший спосіб поділу.

1) Вентиляторні (з примусовою тягою). Повітря прокачується через градирню за допомогою вентиляторів. Це найефективніший тип, який дозволяє регулювати охолодження.

- Нагнітальні. Вентилятор розташований збоку або знизу і нагнітає повітря всередину.
- Витяжні. Вентилятор розташований зверху і витягує повітря з градирні (саме такий тип був на вашому попередньому малюнку).

2) Баштові (з природною тягою). Високі труби (часто гіперболоїдної форми), де рух повітря створюється за рахунок різниці густини нагрітого вологого повітря всередині та холодного зовні (тяга труби). Використовуються на великих ТЕС та АЕС.

3) Ежекційні (безвентиляторні): Повітря засмоктується всередину за рахунок розпилення води під високим тиском через спеціальні форсунки (ефект ежекції). Не мають рухомих частин.

2. За напрямком руху води та повітря

1) Протиточні. Вода падає зверху вниз, а повітря рухається строго знизу вгору назустріч воді. Це забезпечує найвищу теплову ефективність.



2) Поперечно-потоківі / Перехресноточні. Вода падає вертикально вниз, а повітря проходить горизонтально (поперек потоку води). Такі градирні нижчі за висотою і простіші в обслуговуванні (ваш малюнок відносився до цього типу).

3) Змішаного типу. Поєднання обох принципів.

3. За способом теплообміну (контакту середовищ)

Відкритого типу (Мокрі / Випарні): Вода безпосередньо контактує з повітрям. Охолодження відбувається переважно за рахунок випаровування частини води (латентна теплота пароутворення). Найефективніші, але потребують підживлення водою.

1) Закритого типу (Сухі / Радіаторні). Вода (або інший теплоносій) циркулює в закритих трубках (теплообмінниках), які обдуваються повітрям. Прямого контакту немає, втрат води немає. Працюють як радіатор автомобіля. Менш ефективні влітку.

2) Гібридні. Поєднують елементи "сухих" і "мокрих" градирень для зменшення видимого парового шлейфу ("туману") та економії води.

4. За матеріалом зрошувача (насадки)

1) Плівкові. Вода стікає тонкою плівкою по поверхні пластин (найпоширеніші зараз, зазвичай з ПВХ).

2) Крапельні. Вода розбризкується і падає у вигляді крапель.

3) Бризгальні. Відсутній зрошувач як такий, вода просто розпилюється соплами у великому об'ємі.

Ключові терміни:

1) Теплова потужність (Q). Кількість тепла, яку треба відвести за одиницю часу.

2) Температурний перепад (Δt). Різниця між температурою води на вході ($t_{гор}$) та на виході ($t_{охл}$).

3) Температура мокрого термометра ($t_{терм}$). Теоретична межа охолодження води при даних параметрах вологості повітря.

Приклад розрахунку

Вхідні дані:

– Витрата води, що циркулює: $G_{цир} = 500 \text{ м}^3/\text{год} (500000 \text{ кг}/\text{год})$

– Температура гарячої води: $t_{гор} = 38^\circ\text{C}$.

– Необхідна температура охолодженої води: $t_{охл} = 28^\circ\text{C}$.

– Теплоємність води: $c_{тпл} = 4,187 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$.

Рішення.

Крок 1: Визначення теплового навантаження

Формула теплового балансу



$$Q = \frac{G_{\text{цир}} \cdot c_{\text{тпл}} \cdot (t_{\text{гор}} - t_{\text{охл}})}{3600}, \quad (9.1)$$

де, 3600 — коефіцієнт переведення годин у секунди (для отримання кВт).

$$Q = \frac{500000 \cdot 4,187 \cdot (38 - 28)}{3600} \approx 5815 \text{ кВт}$$

Крок 2: Розрахунок втрат води на випаровування (E). Емпірична формула для оцінки втрат

$$E = 0,00153 \cdot G_{\text{цир}} \cdot (t_{\text{гор}} - t_{\text{охл}}) \quad (9.2)$$

$$E = 0,00153 \cdot 500 \cdot 10 = 7,65 \text{ м}^3/\text{год}$$

Це обсяг води, який необхідно постійно додавати в систему (підживлення).

ЗАВДАННЯ:

1. Зрозуміти фізику процесу охолодження води (випаровування vs конвекція).
2. Визначити теплову потужність установки та обсяг втрат води на випаровування
3. Навчитися ідентифікувати типові поломки та методи їх усунення.
4. Закріпити знання через тестування.

Необхідно розрахувати теплову потужність (Q , кВт) та втрати на випаровування (E , м³/год).

Примітка: Прийняти густину води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$

Таблиця 9.1- Варіанти завдань

Варіант	Витрата води $G_{\text{цир}}$, (м ³ /год)	$t_{\text{гор}}$, °C	$t_{\text{охл}}$, °C
1	200	35	25
2	450	40	30
3	1000	32	27
4	50	45	30
5	1200	38	28
6	300	42	32
7	800	36	29
8	150	50	35
9	600	34	24
10	2500	33	26
11	90	60	40
12	350	37	30
13	750	39	31
14	1800	41	33
15	400	30	22



Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)

Розбір ситуацій "Проблема → Причина → Рішення".

Ситуація 1. Вода на виході тепліша за норму (T_2 висока)

Причина 1. Забиті форсунки (вода не розподіляється рівномірно по зрошувачу) або зруйнований зрошувач.

Причина 2: Неправильний кут атаки лопатей вентилятора (мало повітря).

Рішення: Чистка системи розподілу води, перевірка вентилятора.

Ситуація 2: "Дощ" біля градирні (великий винос води)

Причина: Пошкоджений краплевловлювач (Drift Eliminator).

Рішення: Заміна блоків краплевловлювача.

Ситуація 3. Сильна вібрація

Причина: Дисбаланс вентилятора (налипання бруду на одну лопать), знос підшипників, неспіввісність валів.

Рішення: Балансування крильчатки, заміна підшипників.

Ситуація 4. Швидке падіння рівня води в басейні

Причина: Протікання чаші або несправність клапана підживлення.

Рішення: Герметизація басейну, налаштування поплавкового клапана.

Ситуація 5. Обледеніння повітрязабірних решіток або зрошувача (зимовий період)

Причина: Неправильний тепловий режим при низьких температурах (занадто великий об'єм повітря) або нерівномірне змочування периферійних зон.

Рішення: Тимчасове включення реверсу вентилятора для прогріву вхідних вікон теплим повітрям, регулювання витрати води через байпас.

Ситуація 6. Біологічне обростання та накип на заповнювачі (зрошувачі)

Причина: Неефективна хімічна водопідготовка, розмноження водоростей та бактерій (наприклад, Legionella) у теплому середовищі, висока жорсткість підживлювальної води.

Рішення: Проведення шокової біоцидної обробки (хлорування), механічне очищення блоків зрошувача, налаштування автоматичної системи продувки та дозування інгібіторів накипу.

Ситуація 7: Скрегіт або сторонні металеві шуми в зоні дифузора

Причина: Деформація корпусу (дифузора) або ослаблення кріплення лопатей, що призводить до зачіпання лопатями об



стілки. Також може бути ознакою критичного зносу зубчастої передачі редуктора.

Рішення: Перевірка геометрії дифузора та зазорів між лопатями і корпусом, підтяжка кріплень маточини, діагностика та заміна мастила в редукторі.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Який процес забезпечує основне охолодження в градирні?
 - А) Нагрівання повітря
 - Б) Випаровування води
 - В) Радіаційне випромінювання
2. Що таке "температура мокрого термометра"?
 - А) Температура гарячої води
 - Б) Температура кипіння
 - В) Теоретично найнижча температура, до якої можна охолодити воду випаровуванням
3. Яка функція зрошувача (насадки)?
 - А) Фільтрувати бруд
 - Б) Збільшувати площу контакту води та повітря
 - В) Утримувати краплі води
4. Для чого потрібен краплевловлювач?
 - А) Щоб збирати дощову воду
 - Б) Щоб зменшити втрати води через винос крапель вентилятором
 - В) Щоб охолоджувати повітря
5. Якщо температура мокрого термометра 25°C, чи можна охолодити воду в градирні до 20°C?
 - А) Так, якщо поставити потужний вентилятор
 - Б) Ні, це фізично неможливо
 - В) Так, але тільки вночі
6. Як називається вода, яку додають у систему для компенсації випаровування?
 - А) Продувка
 - Б) Дренаж
 - В) Підживлення
7. Що таке "Range" (Температурний перепад)?
 - А) Різниця між температурою входу і виходу води
 - Б) Різниця між температурою води і повітря
 - В) Висота градирні



ЛІТЕРАТУРА:

1. Водопостачання та водовідведення : курс лекцій. Для студентів денної форми навчання. Спеціальність 101 «Екологія» Освітньо кваліфікаційний ступінь «магістр» / уклад. О. В. Рибалова. Харків : НУЦЗУ, 2017. 195 с. URL: repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/5274/1/ВОДОПОСТАЧАННЯ%20ТА%20ВОДОВІДВЕННЯ.pdf



ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 10

РОЗРАХУНОК ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ В СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

МЕТА РОБОТИ:

Вивчити особливості роботи насосних агрегатів у замкнутих циклах водопостачання; навчитися виконувати підбір насосів за робочими характеристиками; набути навичок діагностики та усунення типових несправностей насосного обладнання.

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА:

Системи оборотного водопостачання використовуються для охолодження технологічного обладнання або повторного використання води після очищення. Головна вимога до насосів у таких системах — стабільність подачі та стійкість до тривалої безперервної роботи.

У системах оборотного водопостачання (СОВ) найчастіше використовуються відцентрові насоси (тип К, 1Д, ЦНС) через їх високий ККД, рівномірність подачі та простоту автоматизації.

Основні параметри для вибору насоса.

1. Подача (Q , $\text{м}^3/\text{год}$): Об'єм рідини, що перекачується за одиницю часу.
2. Напір (H , м): Енергія, яку насос передає рідині для подолання гідравлічного опору системи.

Формула для розрахунку необхідного напору

$$H = H_{\text{геом}} + \sum h_{\text{тр+арм}} + h_{\text{зал}} \quad (10.1)$$

де:

$H_{\text{геом}}$ — геометрична висота підйому рідини;

$h_{\text{тр+арм}}$ — сума втрат напору в трубах та арматурі;

$h_{\text{зал}}$ — залишковий напір у кінцевій точці.

3. Кавітаційний запас (Δh). Мінімальний тиск на вході в насос, необхідний для запобігання кавітації (утворення бульбашок пари, що руйнують робоче колесо).
4. Характеристика насоса (Q - H)

Це графічна залежність, що показує, який напір H (м) може створити насос при певній подачі Q ($\text{м}^3/\text{год}$).

Геометрія кривої. Для відцентрових насосів крива Q - H є спадною -зі збільшенням подачі напір падає. Крім основної кривої, у паспорті наводяться криві потужності $N=f(Q)$, ККД $\eta=f(Q)$ та допустимого кавітаційного запасу $\Delta h_{\text{кав}} = f(Q)$.

5. Характеристика мережі трубопроводу)

Це залежність втрат енергії в системі від витрати рідини. Вона описується рівнянням параболи

$$H_{\text{сис}} = H_{\text{геом}} + S \cdot Q^2 \quad (10.2)$$

де:

$H_{\text{геом}}$ — геометрична висота підйому (різниця рівнів води в нижньому та верхньому резервуарах);

S — опір системи (залежить від діаметра, довжини труб та шорсткості стінок).

6. Робоча точка (РТ)

Це точка перетину характеристики насоса ($Q-H$) та характеристики мережі.

Геометричний сенс. Тільки в цій точці енергія, що генерується насосом, дорівнює енергії, необхідній для переміщення рідини через систему.

Мета вибору. Підібрати насос так, щоб РТ знаходилася в зоні максимального ККД насоса (зазвичай це діапазон 0.8...1.1 від номінальної подачі).

Паралельна робота насосів

У системі оборотного постачання часто встановлюють декілька насосів паралельно.

Геометрія додавання. Для побудови сумарної характеристики потрібно скласти абсциси (подачі Q) при однакових ординатах (напорах H).

Результат. Сумарна крива стає більш пологою, що дозволяє збільшити витрату, але менше, ніж у 2 рази (через зростання опору мережі).

4. Методика вибору насоса (Робота з довідниками та геометрією)

Щоб виконати вибір, потрібно використовувати "Зведені графіки полів $Q-H$ (містяться в довідниках виробників, наприклад, "Насосенергомаш", Grundfos, Wilo або старих радянських довідниках). Надаємо кілька графіків

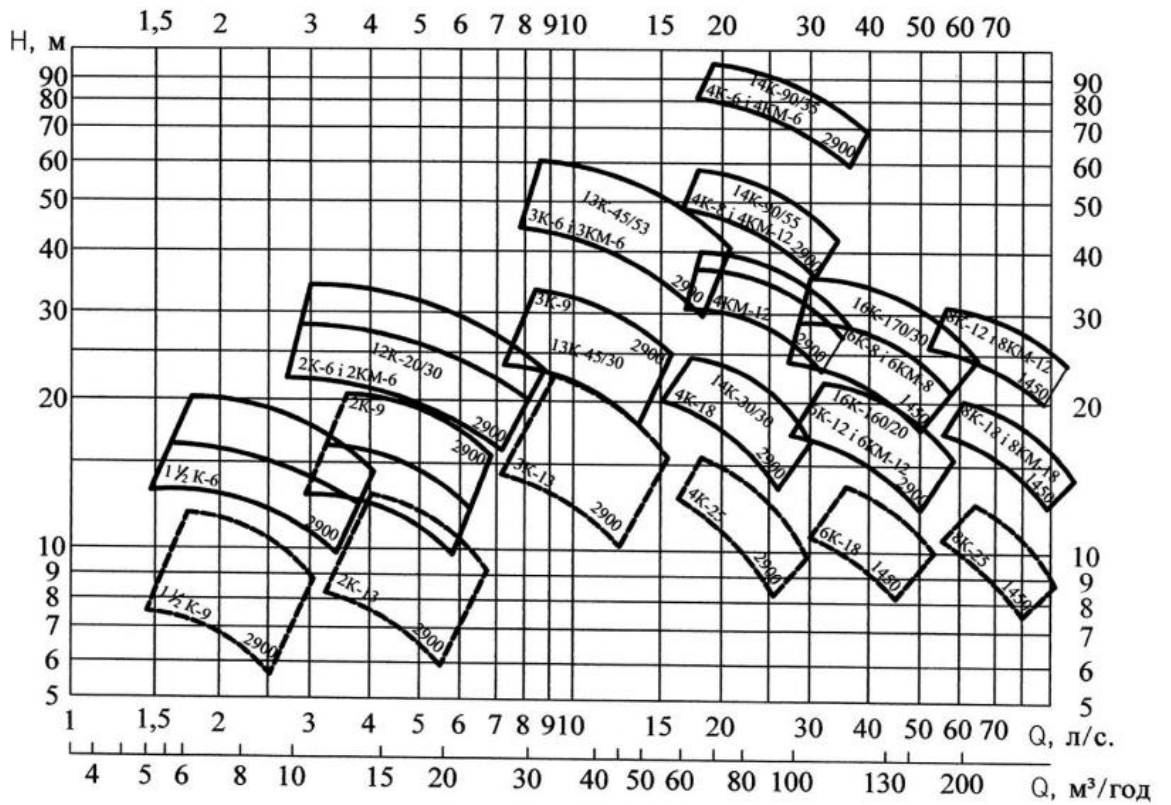


Рисунок 10.1- Зведений графік полів Q-H насосів типів К і КМ

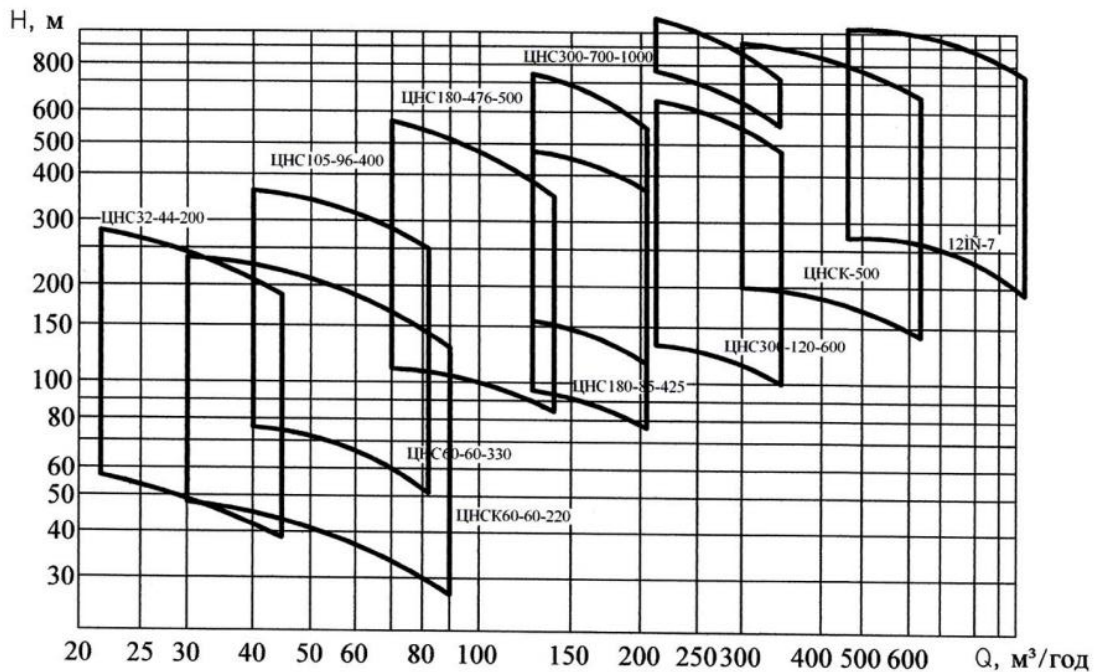


Рисунок 10.2- Зведений графік полів Q-H насосів типу ЦНС

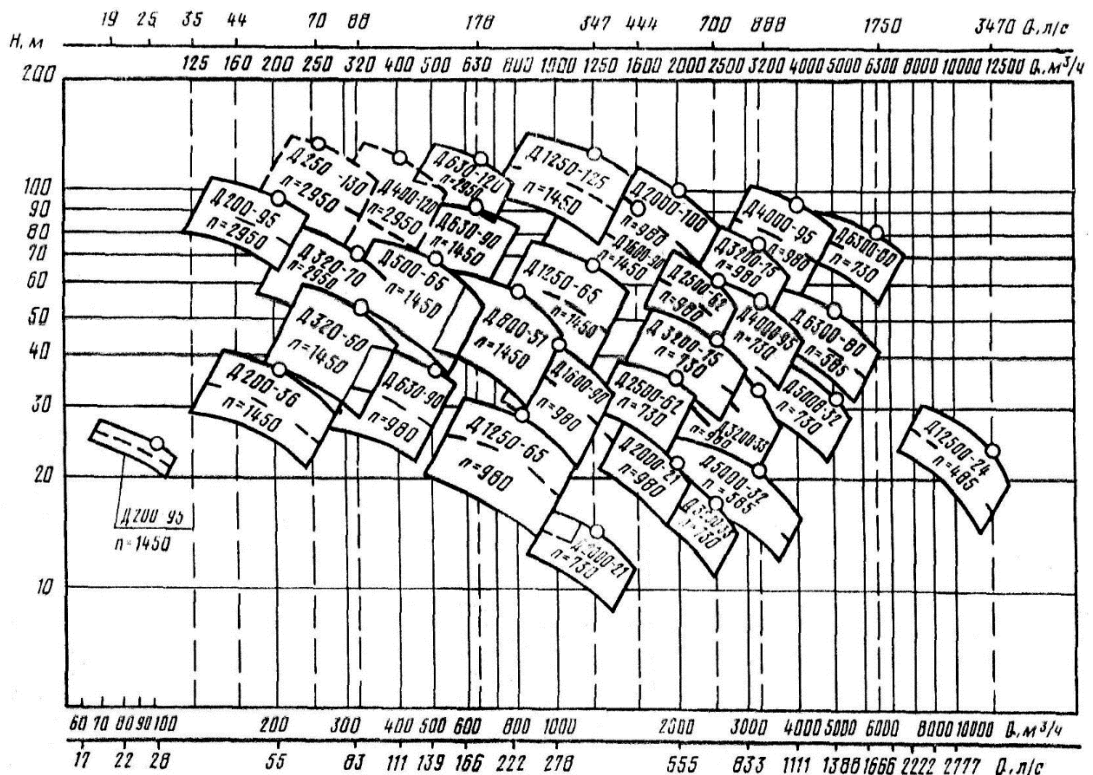


Рисунок 10.3- Зведений графік полів Q-H насосів типу Д

Крок 1: Побудова характеристики мережі

Студент будує графік потреби системи.

1. Відкладає на осі Y точку $H_{стат}$ (статичний напір).
2. Розраховує 3-4 точки для різних витрат (наприклад, $0.5Q$, Q , $1.2Q$) за формулою втрат $h_{тр+арм} = S \cdot Q^2$ і з'єднує їх плавною лінією.

Крок 2: Попередній вибір за зведеним графіком (Поля Q-H)

На рисунках 1,2,3, представлені загальні діаграми, де зображені робочі зони всіх серій насосів (наприклад, серія К, серія Д).

Студент знаходить точку із заданими координатами (Q, H) на цьому полі (вибираєте згідно ваших розрахунків).

Далі, визначаємо марку насоса, в "квадрат" якого потрапляє точка (наприклад, насос 1Д 315-71).

Розшифровка: 1 — модернізація, Д — двостороннього входу, 315 — номінальна подача (м³/год), 71 — номінальний напір (м).

Крок 3: Графоаналітична перевірка

Відкриваєте детальну характеристику вибраного насоса.

- 1) На міліметрівку або в Excel переносить криву Q-H для максимального діаметра робочого колеса.
- 2) Накладає на неї свою характеристику мережі.
- 3) Аналіз:

- якщо точка перетину вища за потрібну — насос надлишковий, потрібно обточування колеса.
- якщо точка перетину нижча — насос не підходить, потрібна потужніша модель або більші оберти.

Крок 4: Обточування робочого колеса (Геометричний перерахунок)

Якщо насос створює надлишковий напір, економічно вигідно зменшити діаметр робочого колеса (D_2). Нові параметри розраховуються за законами подібності (формули перерахунку)

$$D_{\text{кут}} = D_{\text{под}} \cdot \sqrt{\frac{H_{\text{max}}}{H_{\text{под}}}} \quad (10.3)$$

або більш точно для Q та H

$$\frac{Q_{\text{кут}}}{Q_{\text{под}}} = \frac{D_{\text{кут}}}{D_{\text{под}}}; \quad \frac{H_{\text{кут}}}{H_{\text{под}}} = \left(\frac{D_{\text{кут}}}{D_{\text{под}}}\right)^2 \quad (10.4)$$

Далі необхідно на графіку провести параболу подібних режимів від початку координат через задану точку і знайти перетин з характеристикою насоса, щоб визначити необхідний ступінь обточування (зазвичай позначається індексами "а" або "б" в маркуванні, наприклад 1Д 315-71а).

Крок 5: Перевірка на кавітацію

За графіком $\Delta h_{\text{кав}}$ (кавітаційний запас) для знайденої робочої точки перевіряємо умову

$$H_{\text{атм}} - H_{\text{геом}} - h_{\text{втрат}} - h_{\text{пар}} > \Delta h_{\text{кав}} + 0,5 \quad (10.5)$$

Розшифровка позначень:

1) $H_{\text{атм}}$ (Атмосферний тиск)

Одиниця виміру: метри водяного стовпа (м. в. ст.).

Пояснення. Це тиск повітря на вільну поверхню води у приймальному резервуарі. Саме він "штовхає" воду вгору по трубі, коли насос створює розрідження.

Значення. На рівні моря приймають $\approx 10,33$ м. Якщо об'єкт в горах — тиск буде меншим.

2) $H_{\text{геом}}$ (Геометрична висота всмоктування)

Одиниця виміру: метри (м).

Пояснення. Це вертикальна відстань від рівня води в нижньому резервуарі (звідки беремо воду) до осі робочого колеса насоса.

Важливо:



- 1) Якщо насос стоїть вище рівня води (режим всмоктування) — значення береться зі знаком мінус (як у формулі).
- 2) Якщо насос стоїть нижче рівня води (режим "під заливом") — цей доданок збільшує тиск, тобто фактично додається.

3) $h_{\text{втрат}}$ (Втрати напору у всмоктувальній лінії)

Одиниця виміру: метри (м).

Пояснення. Енергія, яка втрачається на тертя води об стінки труби та на подолання місцевих опорів (приймальний клапан із сіткою, коліна, переходи) на шляху від резервуара до насоса. Чим довша і тонша труба, тим більші втрати і тим гірше для всмоктування.

4) $h_{\text{пар}}$ (Тиск насиченої пари рідини)

Одиниця виміру: метри водяного стовпа (м. в. ст.).

Пояснення. Це тиск, при якому рідина закипає при даній температурі.

Фізичний зміст. Чим гарячіша вода, тим легше вона перетворюється на пару. Цей тиск "з'їдає" частину атмосферного тиску.

1) Для води 10°C $h_{\text{пар}} \approx 0.12$ м.

2) Для води 100°C $h_{\text{пар}} \approx 10.33$ м (вода закипає, насос не зможе всмоктувати).

5) Допустиме значення кавітаційного запасу насоса $\Delta h_{\text{кав}}$

Одиниця виміру: метри (м). Паспортна характеристика конкретного насоса (часто позначається як NPSHr). Це той мінімальний надлишковий тиск, який вимагає завод-виробник, щоб вода не закипіла на лопатках робочого колеса. Знаходиться за графіками в каталозі.

6) 0.5 (Запас надійності)

Одиниця виміру: метри (м). Інженерний запас, який враховує можливі похибки розрахунків, коливання рівня води або раптові зміни атмосферного тиску. Зазвичай приймається в межах 0.5...1.0 м.

Якщо умова не виконується — насос кавітуватиме. Потрібно опустити насос нижче або збільшити діаметр всмоктувальної труби. Ліва частина нерівності (NPSHa — *Available*) — це те, скільки "запасу тиску" у нас є реально в системі. Права частина (NPSHr — *Required*) — це те, скільки "запасу тиску" вимагає насос. Умова: Те, що ми маємо, повинно бути більшим за те, що вимагає насос (з урахуванням запасу).

Практичний приклад розрахунку

Умова:

Необхідно підібрати насос для подачі води на градирню.

Витрата води: $Q = 150\text{м}^3/\text{год}$.



Геометрична висота підйому (висота градирні): $H_{\text{геом}} = 12$ м.

Гідравлічні втрати в трубопроводі: $h_{\text{втрат}} = 8$ м.

Тиск на форсунках градирні: $h_{\text{фор}} = 5$ м.

Рішення:

1. Визначаємо повний напір:

$$H = 12 + 8 + 5 = 25 \text{ м}$$

2. Визначаємо корисну потужність ($N_{\text{кор}}$)

$$N_{\text{кор}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000} \quad (10.6)$$

Приймаємо густину води $\rho = 1000$ кг/м³, $g = 9.81$ м/с². Переводимо Q у м³/с: $150 / 3600 = 0.0417$ м³/с.

$$N_{\text{кор}} = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 0,0417 \cdot 25}{1000} \approx 10.23 \text{ кВт}$$

3. Вибір: Обираємо відцентровий насос із каталогу з робочою точкою, близькою до $Q=150$, $H=25$, та запасом потужності двигуна (ККД 0.75)

$$N_{\text{двиг}} = \frac{10,23}{0,75} \cdot 1.1 \approx 15 \text{ кВт}$$

Давайте розберемо цей крок «під мікроскопом». Тут працює інженерна логіка, яка перетворює "чисту фізику" (гідравлічну потужність) на "реальне залізо" (потужність двигуна).

Ось покрокова розшифровка того, як ми отримали 15 кВт з розрахункових 10.23 кВт:

1. Звідки взялося $\eta = 0.75$ (ККД)?

У першому наближенні (поки ми ще не вибрали конкретну модель з каталогу) ми мусимо припустити коефіцієнт корисної дії (ККД).

Фізичний зміст: Насос не може передати воді 100% енергії двигуна. Частина втрачається на тертя підшипників, тертя води об стінки корпусу та перетікання всередині насоса.

Інженерний стандарт:

- Для маленьких насосів ($Q < 50$ м³/год) ККД зазвичай 0.60–0.70.
- Для середніх насосів ($Q = 100 \dots 300$ м³/год, як у нашому прикладі) ККД зазвичай 0.75–0.80.
- Для великих насосів ($Q > 1000$ м³/год) ККД може бути 0.85–0.90.

Оскільки у нас $Q=150$, ми взяли середнє значення 0.75 (75%).

2. Розрахунок потужності на валу

Ми знаємо, що воді потрібно передати 10.23 кВт корисної енергії ($N_{\text{кор}}$). Щоб насос це зробив з ККД 75%, двигун повинен крутити вал сильніше.

$$N_{\text{вал}} = \frac{N_{\text{кор}}}{\eta} = \frac{10,23}{0,75} = 13,64 \text{ кВт} \quad (10.7)$$

Це "чиста" потужність, яку споживатиме насос у цій точці. Але ставити двигун на 13.64 кВт не можна.

3. Коефіцієнт запасу потужності ($K_{\text{зап}}$)

Ніколи не вибирають двигун "впритул". Потрібен запас на випадок:

- Пускових струмів (запуск важчий за роботу).
- Зношення обладнання з часом.
- Можливого відхилення робочої точки (якщо опір системи впаде, насос почне качати більше води і споживатиме більше енергії).

Стандартні коефіцієнти запасу (ISO 9906):

- Для двигунів до 4 кВт — запас 1.5 (50%).
- Для двигунів 4...20 кВт — запас 1.15–1.2 (15-20%).
- Для двигунів > 20 кВт — запас 1.1 (10%).

У нашому випадку (близько 13 кВт) ми беремо коефіцієнт 1.1 (або 1.15).

$$N_{\text{двиг}} = N_{\text{вал}} \cdot 1,1 \approx 15,004 \text{ кВт} \quad (10.8)$$

4. Приведення до стандарту

Електродвигуни не випускають будь-якої потужності (наприклад, не існує двигуна на 14.2 кВт). Існує стандартна лінійка потужностей (ряд R20)

... 7.5 кВт → 11 кВт → 15 кВт → 18.5 кВт → 22 кВт ...

Ми отримали розрахункове 15.004 кВт.

Ми дивимось на стандартний ряд і обираємо найближче в більшу сторону (або рівне).

В даному випадку ідеально підходить двигун на 15 кВт.

Цей вибір записується одним рядком

$$N_{\text{двиг}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta} \cdot K_{\text{пот}} \quad (10.2)$$

де:

- $\frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000}$ - це корисна робота (10.23).
- $1/\eta$ — врахування втрат у насосі ($1/0.75 \rightarrow 13.64$).
- $K_{\text{пот}}$ — врахування надійності ($\cdot 1.1 \rightarrow 15.0$).

4. Завдання №1. Розрахунок параметрів насосної установки

Завдання: Для заданого варіанта розрахувати (таблиця 1)

1. Повний напір насоса H (м).

2. Корисну гідравлічну потужність $N_{\text{кор}}$ (кВт).
3. Потужність на валу насоса $N_{\text{вал}}$ (кВт), враховуючи ККД.
Прийняти густину води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

ЗАВДАННЯ:

1. Ознайомитися зі схемою оборотної системи водопостачання.
2. Визначити необхідні параметри насоса (подачу та напір) для заданих умов.
3. Розрахувати споживану потужність насосного агрегату.
4. Проаналізувати причини виникнення несправностей на основі ситуаційних задач.

Таблиця 10.1- Варіанти завдань для завдання 1

Варіант	Подача Q , $\text{м}^3/\text{год}$	Геометрична висота $H_{\text{геом}}$, м	Втрати в трубах $\sum h_{\text{тр+арм}}$, м	Вільний напір на виході $h_{\text{зал}}$, м	ККД насоса η
1	120	10	6.5	5.0	0.72
2	150	12	8.0	4.0	0.75
3	80	15	4.5	3.0	0.68
4	200	8	10.0	6.0	0.78
5	300	20	12.5	5.0	0.80
6	45	5	3.0	10.0	0.65
7	500	18	15.0	4.0	0.82
8	250	14	9.0	5.0	0.76
9	90	25	7.0	2.0	0.70
10	350	10	11.0	8.0	0.79
11	600	16	14.0	3.0	0.83
12	180	11	8.5	5.5	0.74
13	400	22	13.0	4.0	0.81
14	50	30	5.0	2.0	0.62
15	100	9	6.0	12.0	0.69

2. Вибір насосного агрегату

Завдання:

1. За заданими параметрами Q та H підібрати марку насоса (використовуючи таблиці Додатку А).
2. Вказати, чи потрапляє робоча точка в рекомендований діапазон.
Підказка. Використовуйте таблиці для насосів типу "К" (малі витрати) та "Д" (великі витрати).

Таблиця 10.2- варіанти завдань для завдання 1

Варіант	Потрібна подача Q, м ³ /год	Потрібний напір Н, м	Призначення системи (контекст)
1	190	88	Подача на градирню (висока)
2	300	48	Оборотний цикл цеху
3	50	48	Локальне охолодження компресора
4	320	68	Магістральний трубопровід
5	480	60	Загальнозаводська мережа
6	45	38	Підживлення системи
7	1300	60	Головна насосна станція ТЕЦ
8	210	92	Подача на висотну градирню
9	100	48	Допоміжний контур
10	600	85	Система пожежогасіння/охолодження
11	230	52	Рециркуляція (потрібен запас)
12	500	66	Охолодження доменних печей
13	175	72	Подача на фільтри очищення
14	95	78	Система високого тиску
15	1200	62	Оборотний цикл великого хім. підприємства

Таблиця 10.3 — Технічні характеристики відцентрових насосів типу "Д" (двостороннього входу)

Використовуються для систем оборотного водопостачання великої продуктивності.

Марка насоса	Частота обертання n, об/хв	Подача Q, м ³ /год (Номінал)	Робочий діапазон подачі, м ³ /год	Напір Н, м (Номінал)	Робочий діапазон напору, м	Потужність двигуна, кВт	ККД, %	Доп. запас Δh, м
1Д 200-90	2900	200	140 — 240	90	96 — 82	90	76	5.5
1Д 200-90а	2900	180	125 — 220	76	82 — 68	75	73	5.8
1Д 315-50	2900	315	220 — 360	50	56 — 44	75	80	5.5
1Д 315-71	2900	315	220 — 360	71	76 — 64	110	77	6.0

1Д 500- 63	1450	500	350 — 550	63	68 — 56	132	81	5.5
1Д 630- 90	1450	630	450 — 700	90	96 — 82	250	82	6.0
1Д 1250- 63	1450	1250	800 — 1400	63	69 — 55	315	86	6.5

Примітка: Індекс "а" або "б" в маркуванні означає варіант з обточеним робочим колесом (зменшений діаметр). Використовуються для допоміжних контурів та локальних систем охолодження.

Таблиця 10.4— Технічні характеристики відцентрових насосів типу "К" (консольні)

Марка насоса	Подача Q, м³/год	Напір Н, м	Потужність, кВт	Кавіт. запас, м
К 80-50-200	50	50	15.0	3.5
К 80-50-200а	45	40	11.0	3.8
К 100-65-200	100	50	30.0	4.5
К 100-65-250	100	80	45.0	4.5
К 150-125-315	200	32	30.0	5.0

Таблиця 10.5- Дані для побудови робочої характеристики Q-Н
Ця таблиця необхідна студентам для побудови точного графіка на міліметровці (або в Excel) і знаходження Робочої Точки.

Насос: 1Д 315-50 (n = 2900 об/хв)

Параметр	Точка 1 (ХХ)	Точка 2 (Opt)	Точка 3 (Nom)	Точка 4 (Max)	Точка 5 (К)
Подача Q, м³/год	0	160	250	315	380
Напір Н, м	58	56	54	50	42
ККД η , %	0	55	72	80	75
Потужність N, кВт	28	48	58	68	72
Доп. Δh , м	-	3.0	4.0	5.5	7.5



Тренінг по розвитку навичок «Troubleshooting» (пошуку та усунення несправності)

1. Ситуація: Насос увімкнено, електродвигун працює, але вода не подається.

Ймовірна причина - система не заповнена водою (повітряна пробка) або закрита засувка на всмоктуванні.

Рішення:

- 1) негайно зупинити насос (щоб не допустити «сухого ходу»).
- 2) Перевірити положення засувки (відкрити вхідну).
- 3) Відкрити повітряний кран у верхній частині корпусу та залити насос водою до повної відсутності бульбашок повітря.

2. Ситуація: Під час роботи чути сильний тріск та вібрацію, корпус насоса нагрівається (звук нагадує перекачування гравію).

Ймовірна причина: Кавітація (тиск на вході впав нижче критичного).

Рішення:

- 1) Частково прикрити засувку на нагнітанні (зменшити подачу Q , що знизить вимоги до кавітаційного запасу).
- 2) Перевірити всмоктувальну лінію на засмічення фільтра.
- 3) Якщо можливо — підняти рівень води в приймальному резервуарі.

3. Ситуація: Насос не розвиває паспортного напору (манометр показує тиск значно нижчий за норму).

Ймовірна причина: Зношення робочого колеса (збільшені зазори) або зворотне обертання двигуна (переплутані фази).

Рішення:

- 1) Зупинити насос та короткочасно увімкнути, щоб візуально перевірити напрямок обертання вентилятора двигуна (має співпадати зі стрілкою на корпусі). Якщо ні — поміняти місцями дві фази на клеммах.
- 2) Якщо обертання вірне — необхідний капітальний ремонт (заміна робочого колеса або ущільнюючих кілець).

4. Ситуація: Підвищене споживання електроенергії (спрацьовує тепловий захист автомата).

Ймовірна причина: Перетягнутий сальник, заклинювання підшипників, погнутий вал або густина рідини вища за розрахункову (наприклад, холодна вода замість гарячої або пульпа).



Рішення:

- 1) Перевірити нагрів букси сальника: якщо гаряча — послабити гайки (вода має капати, а не текти струменем або бути сухою).
- 2) Перевірити легкість прокручування валу вручну (при вимкненому живленні).
- 3) Замінити підшипники.

5. Ситуація: Сильний витік через ущільнення валу.

Ймовірна причина: Зношення торцевого ущільнення або вигорання/знос набивки сальника.

Рішення:

- 1) Для сальникового ущільнення: рівномірно підтягнути гайки букси. Якщо не допомагає — зупинити насос і замінити набивку.
- 2) Для торцевого ущільнення: тільки заміна пошкодженої пари тертя (ремонт не підлягає).

6. Ситуація: Насос працює ривками, стрілка манометра "стрибає" в широкому діапазоні.

Ймовірна причина: Рівень рідини в резервуарі занадто низький, утворюється воронка, через яку періодично засмоктується повітря.

Рішення:

- 1) Долити воду в приймальний резервуар.
- 2) Якщо рівень підняти неможливо — заглибити всмоктувальну трубу.
- 3) Встановити на всмоктуванні "заспокоювачі" (дерев'яні плоти або перегородки), щоб збити воронку.

7. Ситуація: Швидкий перегрів підшипників (вище 60-70°C).

Ймовірна причина: Порушення центрування валів насоса та двигуна (неспіввісність муфти) або відсутність мастила.

Рішення:

- 1) Перевірити рівень масла в картері підшипників (долити за необхідності).
- 2) Перевірити центрування напівмуфт за допомогою лінійки та щупів (або лазерного приладу). Відрегулювати положення двигуна підкладками.

Контрольні тести для самоперевірки

1. Який параметр є визначальним при виборі насоса для системи оборотного водопостачання?

А) Колір корпусу

Б) Робоча точка (співвідношення Q та H)



- В) Діаметр всмоктуючого патрубку
2. Що таке кавітація?
- А) Процес очищення води
Б) Утворення та схлопування бульбашок пари в зоні низького тиску
В) Підвищення температури підшипників
3. Як зміниться напір, якщо два однакових насоси з'єднати послідовно?
- А) Напір подвоїться, подача залишиться тією ж
Б) Подача подвоїться, напір залишиться тим самим
В) Нічого не зміниться
4. Що необхідно зробити перед запуском відцентрового насоса?
- А) Повністю відкрити засувку на нагнітанні
Б) Заповнити корпус насоса та всмоктуючий патрубок рідиною
В) Ослабити кріплення фундаменту
5. Яка основна функція зворотного клапана на нагнітальній лінії?
- А) Регулювання подачі
Б) Захист насоса від гідродару та зворотного потоку при зупинці
В) Вимірювання тиску
6. Якщо манометр на виході показує 0, а двигун працює, що робити в першу чергу?
- А) Перевірити наявність води в системі та напрямок обертання валу
Б) Замінити манометр
В) Збільшити оберти двигуна
7. У чому вимірюється напір насоса в системі СІ?
- А) Паскаль (Па)
Б) Метри водяного стовпа (м)
В) Ват (Вт)

ЛІТЕРАТУРА:

1. Водопостачання та водовідведення : курс лекцій. Для студентів денної форми навчання. Спеціальність 101 «Екологія» Освітньо кваліфікаційний ступінь «магістр» / уклад. О. В. Рибалова. Харків : НУЦЗУ, 2017. 195 с. URL: repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/5274/1/ВОДОПОСТАЧАННЯ%20ТА%20ВОДОВІДВЕННЯ.pdf
2. Левандовський Л. В., Бублієнко Н. О., Семенова О. І. Природоохоронні технології та обладнання : підруч. Київ : НУХТ, 2013. 243 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/f56ff878-efc9-41ec-bb4e-3c354bb664df>



3. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 2. Методи очищення стічних вод : підручник / В. Г. Петрук та ін. Херсон : Олді-плюс, 2019. 298 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Petruk_P2_2014_258.pdf



ПОРЯДОК ПОДАННЯ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Моніторинг виконання, дистанційне подання та представлення результатів практичних робіт реалізується через систему управління навчанням Moodle. Студенти зобов'язані завантажувати виконані завдання у відповідні модулі платформи згідно з затвердженим графіком навчального процесу.

Процедура рецензування та доопрацювання:

1. Перевірка роботи викладачем здійснюється протягом семи календарних днів з моменту її подання.
2. За результатами перевірки викладач надає розгорнутий фідбек, що включає зауваження та рекомендації щодо вдосконалення розрахунків або оформлення.
3. Студент має право на корегування роботи з урахуванням наданих пропозицій.
4. Остаточний бал виставляється після завершення процедури доопрацювання та усунення виявлених недоліків.

Оцінювання кожної роботи базується на комплексному підході та здійснюється за 5-бальною шкалою. Ключовими критеріями оцінки є:

1. Технологічна точність- правильність інженерних розрахунків та дотримання методичного алгоритму.
2. Аналітична якість- здатність до обґрунтування висновків та глибокого аналізу отриманих результатів (зокрема, щодо експлуатаційної надійності та ймовірних несправностей).
3. Академічна відповідність- послідовність викладу матеріалу та відповідність оформлення чинним стандартам.
4. Виконавча дисципліна- дотримання регламентованих термінів подання.

Результати практичної підготовки є обов'язковою складовою підсумкового контролю з дисципліни «Основи проєктування природоохоронного обладнання та систем».

Критерії оцінювання практичної роботи

Бали	Характеристика рівня підготовки
5	Відмінно. Робота свідчить про глибоке засвоєння та творче осмислення матеріалу. Завдання виконані в повному обсязі, висновки логічні та науково обґрунтовані. Продемонстровано високу якість інженерних розрахунків та бездоганне оформлення.
4	Добре. Студент демонструє впевнене володіння теоретичним матеріалом та навички його практичного застосування. Завдання виконані з дотриманням методики, проте висновки потребують уточнень. Оформлення відповідає вимогам з незначними зауваженнями.
3	Задовільно. Робота базується на основних теоретичних положеннях, але містить неточності в розрахунках або непослідовність у висновках. Завдання виконані не в повному обсязі, наявні суттєві огріхи в оформленні матеріалів.
2	Незадовільно. Виявлено фрагментарне розуміння предметної області. Методологія виконання вибрана некоректно, розрахунки містять критичні помилки. Висновки неаргументовані, а оформлення не відповідає встановленим нормам.
1	Мінімально припустимо. Робота виконана формально, без розкриття суті завдання. Практичне вирішення задачі відсутнє або повністю некоректне. Грубі порушення структури та вимог до оформлення.
0	Не атестовано. Робота не подана на перевірку або не виконана.



Додаток А

Приклад титульного аркушу комплекту робіт, виконаних здобувачем

ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Кафедра безпеки праці та охорони довкілля

**ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ПРИРОДООХОРОННОГО ОБЛАДНАННЯ
ТА СИСТЕМ**

Практична робота № __ за варіантом № __

Виконав:
Здобувач(ка) вищої освіти
групи _____
Прізвище І.П.

Перевірила:
доц. Вірич С.О.



mip metinvest
polytechnic



Навчально-методичне видання

Світлана Олександрівна Вірич

**ОСНОВИ ПРОЄКТУВАННЯ ПРИРОДООХОРОННОГО
ОБЛАДНАННЯ ТА СИСТЕМ**

методичні рекомендації до виконання практичних робіт

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції