

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

### ТЕМА ЗАНЯТЬ: Особливості проектування відкритих та напірних гідроциклонів

**Мета занять:** закріпити навички роботи з нормативною та технічною літературою, пошуку розрахункових параметрів для проектування та розрахунку гідроциклонів різного типу, отримання навичок гідравлічного розрахунку гідроциклонів.

**Завдання 1.** Вибрати гідроциклон та орієнтовно розрахувати параметри його роботи. Призначення: класифікація хвостів першої стадії флотажі з метою відокремлення відвального зливу та піску, які надходять на додаткове подрібнення та флотацію. На обробку надходить пульпа  $Q_n$ , м<sup>3</sup>/год з вмістом твердої фази  $a$ , % густиною 2.8 г/см<sup>3</sup>. Пульпа надходить в гідроциклон самопливом під напором  $H$  8,5 м. вод. ст. До зливу треба видалити матеріал, що вміщує 80% часток розміром –  $\mathcal{D}$ , мм.

**Завдання 2.** В результаті подрібнення продукту класу  $\mathcal{D}$ , мм з вмістом твердої фази  $a$ , %, треба отримати злив з вмістом цього класу  $c$ , % у кульовому подрібнювачі продуктивністю  $Q_{под}$ , т/год, що працює за схемою на рис. з циркуляційним навантаженням  $C_n$ , %.

**Завдання 3.** У гідроциклоні оптимальної конструкції діаметром  $D_{hc}$ , мм очищується паперова маса густиною 1000 кг/м<sup>3</sup>, в'язкістю 1,5 спуз, густиною часток 2800 кг/м<sup>3</sup>. продуктивність гідроциклоні  $Q_{вх}$ , л/хв. Визначити мінімальний діаметр часток, які затримуються. Поверхня гідроциклоні гладка (коефіцієнт шорсткості  $\varepsilon = 1$ ).

**Завдання 4.** Яким буде ефект очищення у гідроциклоні з характеристиками, які вказано в попередньому завданні, якщо його продуктивність буде збільшено на  $X$ , %?

#### Приклади розв'язання завдань.

Завдання 1.

Вихідні дані:  $Q_n = 85,8$  м<sup>3</sup>/год;  $a = 44$  %,  $\mathcal{D} = 0,074$  мм.

За таблицею В.1 визначається, що для заданої продуктивності 85,8 м<sup>3</sup>/год (1430 л/хв) потрібний один гідроциклон діаметром 350 мм. Продуктивність гідроциклоні визначаємо за формулою:

$$Q = 15.5 \cdot K_D \cdot K_a \cdot d_{num} \cdot d_{зл} \cdot \sqrt{P_{вх}}, \quad (47)$$

де  $d_{num}$  – еквівалентний діаметр отвору для живлення, м;

$d_{зл}$  – діаметр зливного патрубку, м;

$P_{вх}$  – тиск на вході, МПа.

$d_{шт}$  – діаметр зливного патрубку, м;

$$K_D = 0.79 + \frac{0.044}{0.0379 + \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (48)$$

Для визначення розмірів живлючого та розвантажувального отворів знаходиться вираз  $d_{зл} \cdot d_{num}$ , враховуючи, що гідроциклон стандартний з кутом конусності  $20^\circ$ , для якого  $K_D = 1.05$ ,  $K_\alpha = 1.00$ . Тиск на вході в гідроциклон визначається з умови  $P_{вх} = 0.85 \cdot \rho_n$ , де  $\rho_n$  – щільність вихідної пульпи. Звідки

$$P_{вх} = 0.85 \cdot \frac{1}{0.56 + \frac{0.44}{2.8}} = 1.18 \text{ кгс/см}^2.$$

Приймається  $P_{вх} = 1 \text{ кгс/см}^2$ , тоді

$$1430 = 15.5 \cdot 1 \cdot 1.05 \cdot d_{num} \cdot d_{зл} \cdot \sqrt{1},$$

$$d_{num} \cdot d_{зл} = 88.$$

Звідси  $d_{num} = 0.8 \cdot d_{зл}$ , значить  $d_{зл}^2 = \frac{88}{0.8} = 110 \text{ см}^2$ ,  $d_{зл} = 10.5 \text{ см}$ ;  $d_{num} = 8.4 \text{ см}$ .

Ці розміри відповідають стандартним. Приймається розвантажувальне відношення  $= 0.4$ , визначається крупність граничного зерна за формулою:

$$\delta_2 = 1.5 \cdot \sqrt{\frac{d_{зл} \cdot D \cdot a}{\Delta \cdot K_D \cdot \sqrt{P_{вх}} \cdot (\rho_m - \rho_{ж})}}, \quad (46)$$

де  $D, d_{зл}, \Delta$  – діаметр відповідно гідроциклону, зливного патрубку та насадки, см;

$a$  – вміст твердої фази у живленні, %;

$\rho_m, \rho_{ж}$  – щільність твердої та рідинної фази у пульпі, г/см<sup>3</sup>;

1.5 – емпіричний коефіцієнт.

$$\delta_2 = 1.5 \cdot \sqrt{\frac{35 \cdot 44}{0.4 \cdot 1.05 \cdot \sqrt{1} \cdot 1.8}} = 68 \text{ мкм}.$$

Визначається вихід зливу та піску за рис. 7.

За кривою 1 граничному зерну крупністю 68 мкм відповідає вихід зливу 42%, а вихід піску – 58%. Визначається навантаження на піскову насадку. Кількість твердої фази у живленні:

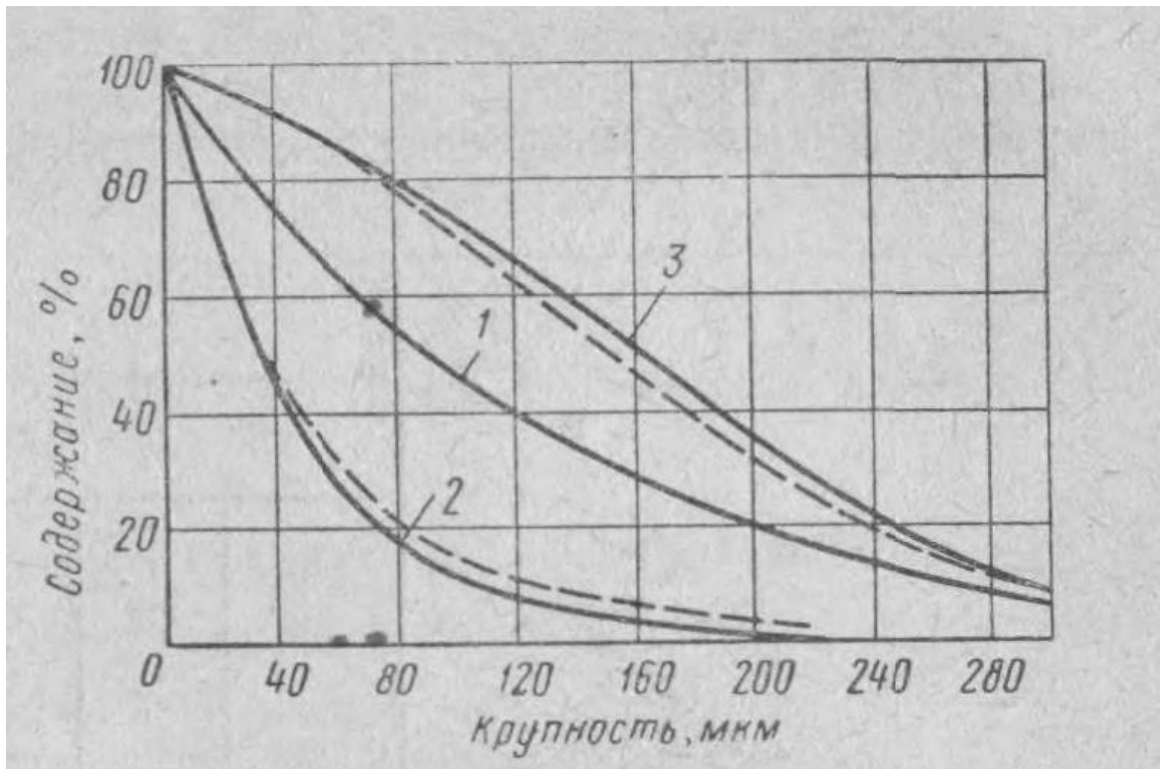


Рисунок 7. Характеристика крупності продуктів гідроциклону: 1-живлення; 2-злив; 3-піски.

$$T = \frac{Q}{\alpha' + \frac{1}{\rho_m}} = \frac{85,8}{\frac{56}{44} + \frac{1}{2,8}} = 52,7m \quad (47)$$

де  $\alpha'$  – співвідношення твердої та рідинної фази у вихідній пульпі. Тобто кількість піску та зливу відповідно дорівнює

$$T_n = 52,7 \cdot 0,58 = 30,5m / год;$$

$$T_{зл} = 52,7 \cdot 0,42 = 22,2m / год$$

Навантаження на піскову насадку при її діаметрі:  $\Delta = 0,4 \cdot d_{зл} = 0,4 \cdot 10,5 = 4,2cm$  становить

$$\frac{30,5}{0,786 \cdot 4,2^2} = 2,2m / cm^2 год.$$

Питоме навантаження на піскову насадку в середньому складає  $0,5 \div 2,5$  т/год на  $1cm^2$ . Розрахункове навантаження в межах нормативного. Загальна кількість води в пульпі

$$85,8 - \frac{52,7}{2,8} = 66m^3 / год .$$

При навантаженні на піскову насадку  $2,2$ т/год можна прийняти вміст твердої фази у піску  $b = 70\%$ , тоді кількість води, що видаляється з піском, дорівнює

$$30.5 \cdot \frac{30}{70} = 13 \text{ м}^3 / \text{год} .$$

Тобто разом із зливом видаляється

$$66 - 13 = 53 \text{ м}^3 / \text{год} ,$$

а вміст твердої фази у зливі

$$\frac{22,2}{22,2 + 53} = 29,2\% .$$

Видалення води у злив

$$\frac{53}{67} = 0,791 = 79,1\% .$$

Враховуючи, що крупність зливу задається вмістом класу - 0,074 мм, а його вміст у живленні становить 44%, то видалення цього класу у злив становить

$$\varepsilon_{-0,074} = \frac{42 \cdot 80}{44} = 76,4\% .$$

Вміст класу 0,074 мм знаходиться з рівняння балансу

$$g_{-0,074} = \frac{44 \cdot 100 - 42 \cdot 80}{58} = 17,9\% .$$

Завдання 2.

Вихідні дані:  $Q_{\text{год}} = 52,7$  т/год;  $a = 44\%$ ,  $g = 0,074$  мм,  $c = 80\%$ ;  
 $C_H = 138\%$ .

Визначаємо вихід зливу за формулою

$$\gamma = \frac{1}{1 + C_H} , \quad (48)$$

де  $C_H$  - циркулююче навантаження, долі одиниці.

$$\gamma = \frac{1}{1 + 1,38} = 0,42$$

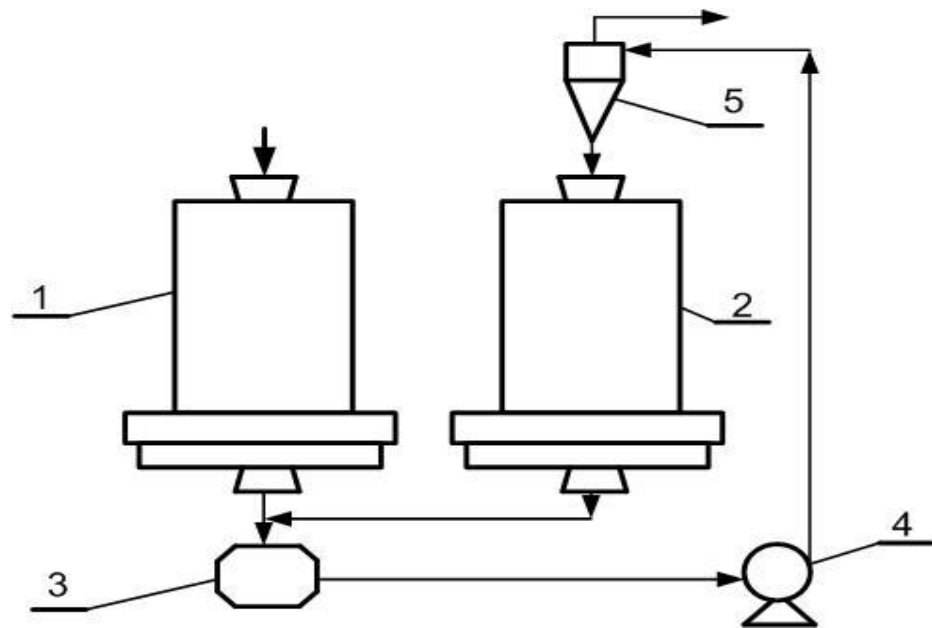


Рисунок 8. Гідроциклон подрібнення закритого типу : 1-стрижневий подрібнювач; 2-кульовий подрібнювач; 3-збірник; 4-насос; 5-гідроциклон

Орієнтовно вміст твердої фази у зливі визначається за рис.9.

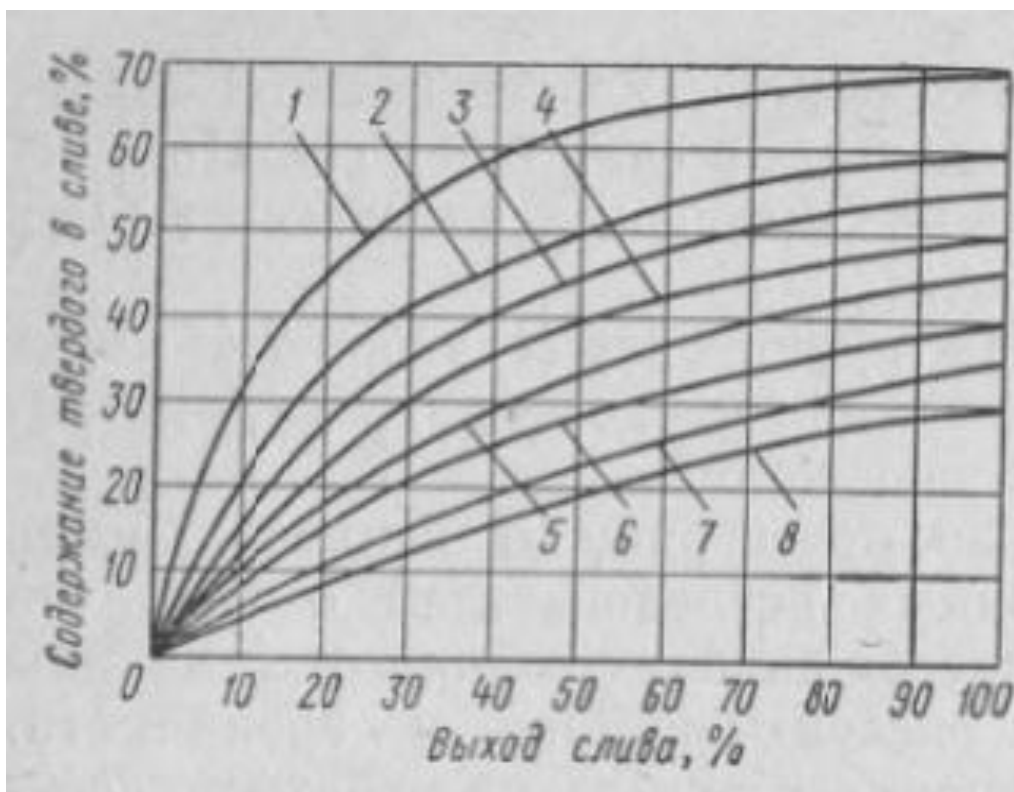


Рисунок 9. Графік для визначення вмісту твердої фази у зливі гідроциклонів замкнутого циклу подрібнення: 1- вміст твердої фази в живленні 70%, в пісках-80%; 2-те ж 60 та 75%.; 3- теж, 55% та 72%; 4- те ж, 50% і 70%; 5-те ж, 45% і 70%; 6- теж, 40 % і 70%; 7- те ж, 35% і 67%; 8- те ж, 30% і 65 %.

$$c \cong 30 - 36\%$$

Прийнято  $c \cong 30\%$ .

Витрата води зі зливом:

$$52.7 \cdot \frac{70}{30} = 123 \text{ м}^3 / \text{год} ,$$

з вихідним живленням

$$52.7 \cdot \frac{56}{44} = 86.3 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Тобто, у збірник перед насосом треба додати води

$$123 - 86.3 = 36.7 \text{ м}^3 / \text{год} .$$

Об'ємна продуктивність

$$Q_n = T_c \cdot \left( \frac{1}{\rho_m} - \frac{1-C}{C} \right), \quad (49)$$

$\Delta e T_c$  – продуктивність подрібненого циклу, т/год;

$\rho_m$  – густина твердої фази пульпи, г/см<sup>3</sup>.

$$Q_n = \frac{52.7}{2.8} + 123 = 142 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Продуктивність за піском

$$T_n = T_c \cdot C_H, \quad (50)$$

$$T_n = 52.7 \cdot 1.38 = 73.3 \text{ т} / \text{год}$$

Якщо вміст твердої фази у піску  $b = 70\%$ , тоді витрата води з піском

$$73.3 \cdot \frac{30}{70} = 31.4 \text{ м}^3 / \text{год} .$$

Об'ємна продуктивність за піском:

$$Q_n = \frac{73.3}{2.8} + 31.4 = 58 \text{ м}^3 / \text{год} .$$

Об'ємна продуктивність за вихідною пульпою:

$$Q_o = 142 + 58 = 200 \text{ м}^3 / \text{год} .$$

Продуктивність за твердою фазою:

$$52.7 + 73.3 = 126 \text{ м}^3 / \text{год} .$$

Вміст твердої фази у живленні гідроциклону, враховуючи, що ні в подрібнювач, ні у розвантаження не додається вода, становить:

$$\frac{126}{154.4 + 52.7 + 73.3} \times 100 = 45\%.$$

Орієнтуючись на стандартний гідроциклон діаметром 500 мм, визначаються розміри його живлючого та зливного отворів, тиск на вході приймається 1.5 кгс/см<sup>2</sup>:

$$200 = 15.5 \cdot 1 \cdot 1.05 \cdot d_{num} \cdot d_{zl} \cdot \sqrt{1.5},$$

$$d_{num} \cdot d_{zl} = 174.$$

Враховуючи, що  $d_{num} = 0.8 \cdot d_{zl}$ , можна отримати

$$d_{zl}^2 = 216 \text{ см}^2; \quad d_{zl} = 14.7 \text{ см}; \quad d_{num} = 11.7 \text{ см}.$$

Діаметр піскової насадки визначається за формулою:

$$A = C \left( \frac{\Delta}{d_{zl}} \right)^3, \quad (51)$$

де  $A$  - розвантажувальне відношення.

$$\Delta = 14.7 \cdot \sqrt[3]{\frac{58}{4.4 \cdot 142}} = 6.6 \text{ см}.$$

Задаючись розвантажувальним відношенням 0,4, визначаємо крупність граничного зерна за формулою:

$$\delta_z = 1.5 \cdot \sqrt{\frac{14.7 \cdot 50 \cdot 45}{6.6 \cdot 1.8 \cdot \sqrt{1.5}}} = 72 \text{ мкм}.$$

Далі визначаються характеристики крупності живлення та пісків по вузьким класам.

Вилучення води до зливу

$$\varepsilon_e = \frac{123}{154.4} = 0.8 (80\%).$$

Вилучення вузьких класів до зливу:

$$\varepsilon_k = \frac{0.8}{0.9 \cdot \left( \frac{\delta_i}{\delta_z} \right)^2 + 1} \quad (52)$$

Вміст в живленні гідроциклонів найбільш крупного класу (+0,3мм) складе:

$$\Delta\alpha'_{\max} = \frac{0.05}{1+1.38} = 0.021(2.1\%).$$

Завдання 3.

Вихідні дані:  $Q_{\text{вх}} = 80$  л/хв.;  $D_{\text{hc}} = 76$  мм.

Робоча довжина гідро циклону  $L = 5 \cdot 76 = 380$  мм. Діаметр вхідного патрубку  $d_{\text{nut}} = 0.28 \cdot 76 = 21.3$  мм. Швидкість у вхідному патрубку:

$$u_{\text{вх}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{вх}}}{\pi \cdot d_{\text{ПНТ}}}. \quad (53)$$

$$u_{\text{вх}} = \frac{4 \cdot 80}{60 \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot 0,0213^2} = 3,74 \text{ м/с.}$$

Критерій Рейнольдса у вхідному патрубку

$$\text{Re}_{\text{вх}} = \frac{d_{\text{nut}} \cdot u_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{рід}}}{\mu_{\text{рід}}}, \quad (54)$$

$$\text{Re}_{\text{вх}} = \frac{3,74 \cdot 0,0213 \cdot 1000}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 53200$$

За рис.10 визначається параметр  $A=1,5$ .

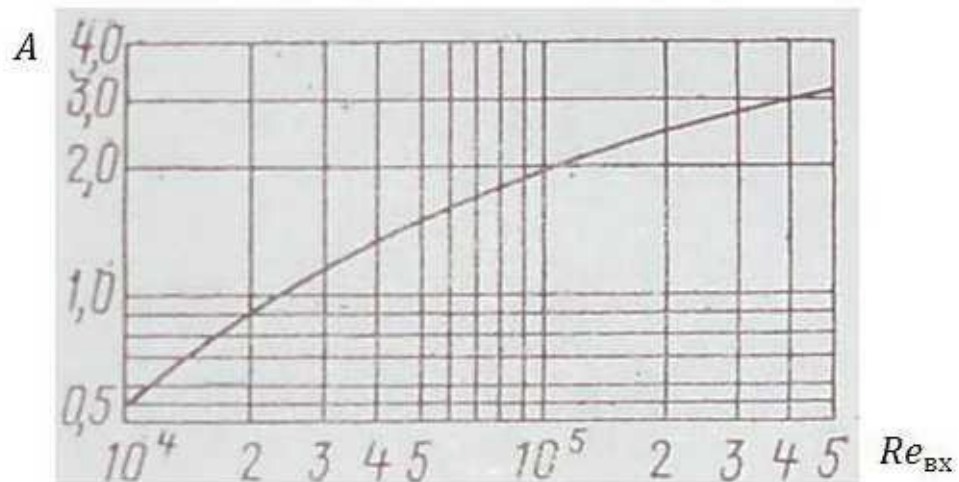


Рисунок 4.8 – Графік залежності  $A = f(Re_{\text{вх}})$

Рисунок 10. Графік залежності  $A = f(Re_{\text{вх}})$

При співвідношенні  $\frac{Q_{\text{оч}}}{Q_{\text{вх}}} = 0,9$  критерій Ейлера дорівнює:



$$\varepsilon_u = 1 + 3.5 \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{Q_{оч}}{Q_{вх}} \right)^{0.8} \quad (55)$$

$$\varepsilon_u = 1 + 3.5 \cdot 1.5 \cdot (0.9)^{0.8} = 5.82$$

$$\Delta p = 5.82 \cdot 1000 \cdot 3.74^2 = 81500 \text{ н/м}^2 \text{ або } 0,83 \text{ ат.}^2$$

Мінімальний діаметр часток, які уловлюються, визначається з формули для визначення  $Re_{вх}$  для гідроциклону оптимальної конструкції:

$$Re_{вх} = 6.5 \cdot \frac{d^2_{ч} \cdot (\rho_m - \rho_{рід}) \Delta p}{\mu_{рід}^2}, \quad (56)$$

$$d_{ч} = \sqrt{\frac{53200 \cdot (1.5 \cdot 10^{-3})^2}{6.5 \cdot (2800 - 1000) \cdot 81500}} = 11.2 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

або 11,2 мкм.

Завдання 4.

Вихідні дані:  $X=25\%$ .

Швидкість у вхідному патрубку

$$u_{вх} = \frac{4 \cdot 100}{60 \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot 0,0213^2} = 4,68 \text{ м/с.}$$

Критерій Рейнольдса у вхідному патрубку

$$Re_{вх} = \frac{4,68 \cdot 0,0213 \cdot 1000}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 66500$$

За рис.10 визначається параметр  $A=1,67$ . При співвідношенні  $\frac{Q_{оч}}{Q_{вх}} = 0,9$  критерій Ейлера дорівнює:

$$\varepsilon_u = 1 + 3.5 \cdot 1.67 \cdot (0.9)^{0.8} = 6.4$$

$$\Delta p = 6.4 \cdot 1000 \cdot 4.68^2 = 140000 \text{ н/м}^2 \text{ або } 1,43 \text{ ат.}^2$$

Мінімальний діаметр часток, які затримуються:

$$d_{ч} = \sqrt{\frac{66500 \cdot (1.5 \cdot 10^{-3})^2}{6.5 \cdot (2800 - 1000) \cdot 140000}} = 9.6 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$$

або 9,6 мкм.

Тобто збільшення ефективності очистки супроводжується зростанням енергетичних витрат на прощтовування маси через гідроциклон. Продуктивність гідроциклону при цьому збільшується.

## Питання для самоконтролю

1. З яких елементів складається гідроциклон?
2. Які матеріали застосовують для виготовлення гідроциклонів?
3. Чим відрізняються апарати, в яких розділення фаз відбувається під дією відцентрових сил?
4. Назвіть основні види гідроциклонів.
5. Види конічних гідроциклонів
6. В чому різниця між мультициклоном та батарейним циклоном?
7. Які позначення рекомендують для маркіровки гідроциклонів?
8. Який вид гідроциклонів найчастіше застосовують у промисловості?

## Література

1. Айрапетян Т. С. Технологія очистки промислових стічних вод : конспект лекцій Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 73 с.  
[https://eprints.kname.edu.ua/45126/1/2016%2064%D0%9B%20%D0%A2%D0%9E%D0%9F%D0%A1%D0%92\\_%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D1%8C.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/45126/1/2016%2064%D0%9B%20%D0%A2%D0%9E%D0%9F%D0%A1%D0%92_%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D1%8C.pdf).
2. Боброва Т.Б., Високос С.М., Глушко Ю.Ю., Сашко В.О., Терещенко Т.М., Черниш В.В. Водовідведення : навчальний посібник. Київ : Гурт, 2019 148 с. URL:  
<https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8/2020/04/28/1vodovidvedennya.pdf>.
3. Благодарна Г. І. Водовідвідні мережі і споруди. Споруди і обладнання водовідведення : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 145 с. URL:  
[https://eprints.kname.edu.ua/50031/1/%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D0%B7%2082%D0%9B\\_2017\\_VSS\\_Konsp\\_lekciy\\_RVVR\\_VVb.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/50031/1/%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D0%B7%2082%D0%9B_2017_VSS_Konsp_lekciy_RVVR_VVb.pdf).
4. Душкін С.С., Коваленко О.М., Благодарна Г.І. Експлуатація і ремонт водопровідноканалізаційних систем : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 165 с. URL :  
<https://eprints.kname.edu.ua/40512/1/2013%20%D0%BF%D0%B5%D1%87%20172%D0%9B%20%D0%94%D0%B5%D0%B3%D1%82%D1%8F%D1%80%20%D0%9C.%20%D0%BD%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%B9%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C.pdf>