

ПОВІТРЯНИЙ СТОВП НАПІРНОГО ГІДРОЦИКЛОНУ ІЗ ПНЕВМАТИЧНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Юрій Копаниця

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037
канд. техн. наук, доцент, kopanytsia.iud@knuba.edu.ua,
orcid.org//0000-0002-9470-1902

DOI: 10.32347/2524-0021.2021.36.4-10

Анотація. Запропоновано надійний безконтактний пневматичний регулятор напірного гідроциклону. Регулятор встановлено у зоні піскового насадку. Пневматичний регулятор стандартного напірного циліндро-конічного гідроциклону забезпечує безконтактне згущення продукту в зоні піскового насадку. У процесі керування роботою гідроциклону по його осі утворюється повітряний стовп. Особливості роботи регулятора впливають на процес утворення повітряного стовпа гідроциклону. Тиск в повітряному стовпі манометричний. Поставлена задача дослідити вплив тиску пульпи на вході гідроциклону, згущення пульпи й тиску у повітряному стовпі. Експериментальні дослідження проведено у лабораторних умовах на моделі стандартного промислового циліндро-конічного гідроциклону ГЦ360. Досліджено зв'язок технологічних параметрів роботи гідроциклону й тиску у повітряному стовпі. встановити можливості керування роботою гідроциклону по тиску у повітряному стовпі. Планування експерименту у лабораторних умовах на моделі гідроциклону проведено у програмі Statgraphics Centurion XV. Експериментальні дослідження проведено для оптимальних параметрів кута й щільності пневматичного регулятора. Обрано критерію оптимізації - максимальний ефект згущення пульпи при мінімізації місцевих втрат енергії у соплі. У лабораторних умовах змодельовано зміну тиску й густини пульпи на вході гідроциклону на всьому робочому діапазоні. Лабораторну модель гідроциклону виконано у масштабі М1:10. У якості пульпи використано відходи флотації. Проведено моделювання роботи гідроциклону у складі водно-шламової системи на збагачувальній фабриці. Густина твердої фази 1500 кг/м³. Вміст твердої фази на вході 10 г/л. Проби відбирались об'ємним способом мірним сосудом. Встановлено статистично значущу залежність між тиском у повітряному стовпі гідроциклону й ефектом згущення пульпи у стандартному циліндро-конічному гідроциклоні. Перевірено наявність лінійного характеру залежності коефіцієнту згущення та тиску у повітряному стовпі гідроциклону із пневматичним регулятором. Встановлено відсутність статистично значущого впливу тиску живлення гідроциклону на залежність решти обраних факторів. Експериментальні дослідження проведено при оптимальних конструктивних параметрах пневматичного регулятора за критеріями мінімізації втрат енергії повітряного струму у соплі й мінімізації об'ємних витрат повітря.

Ключові слова: напірний гідроциклон; повітряний стовп; пневматичний регулятор.

ВСТУП

Гідроциклони широко використовуються у процесах згущення, освітлення або класифікації. Запропоновано надійний безконтактний пневматичний регулятор напірного гідроциклону [1, 2]. Ре-

гулятор встановлено у зоні піскового насадку. Безконтактний спосіб регулювання роботою гідроциклону виключає фізичне перекриття отвору піскового насадку й забезпечує надійне керування роботою апарату. У процесі керування роботою гідроциклону по його осі утворю-

ється повітряний стовп [4,5,6,7]. Тиск в повітряному стовпі манометричний. Це особливість означеного способу керування [1, 2].

МЕТА І МЕТОДИ

Поставлена задача дослідити вплив тиску пульпи на вході гідроциклону, згущення пульпи й тиску у повітряному стовпі. Експериментальні дослідження проведено у лабораторних умовах на моделі стандартного промислового циліндро-конічного гідроциклону ГЦ360. Мета дослідження – встановити можливості керування роботою гідроциклону по тиску у повітряному стовпі та виключаючи контакт датчиків із високошвидкісною, абразивною й руйнівною пульпою.

Керування роботою напірного гідроциклону по вакууметричному тиску у повітряному стовпі є відомим стандартним способом керування апаратом [1]. Існує особливість керування роботою гідроциклону із пневматичним насадком. За рахунок направленою керуючого повітряного струму в зоні піскового насадка у повітряному стовпі гідроциклону утворюється надлишковий манометричний тиск.

Планування експерименту у лабораторних умовах на моделі гідроциклону проведено у програмі Statgraphics Centurion XV. Експериментальні дослідження проведено для оптимальних параметрів кута й щільності пневматичного регулятора [1,2]. Критерії оптимізації керування роботою напірного гідроциклону із пневматичним регулятором:

- максимальний ефект згущення піскового продукту при оптимальних витратах повітря;
- мінімізація тиску повітря у регуляторі;
- мінімізація витрат повітря.

У якості критерія оптимізації обрано перший варіант критерію оптимізації процесом керування роботою напірного гідроциклону із пневматичним регулятором – максимальний ефект згущення

пульпи при мінімізації місцевих втрат енергії у соплі. У такий спосіб ми маємо оптимальні витрати повітря у порівнянні із другим вищезначеним критерієм. Також ми зменшуємо максимальну величину тиску повітря у насадку у порівнянні із вимогами за останнім критерієм.

Фактор за яким ми маємо можливість об'єктивно порівнювати за різними критеріями ефективність керування роботою гідроциклону із різними типами насадок – ефект згущення пульпи при однакових вихідних технологічних параметрах. У лабораторних умовах змодельовано зміну тиску й густини пульпи на вході гідроциклону на всьому робочому діапазоні.

Лабораторну модель гідроциклону виконано у масштабі М1:10. У якості пульпи використано відходи флотації. Проведено моделювання роботи гідроциклону у складі водно-шламової системи на збагачувальній фабриці. Густина твердої фази 1500 кг/м³. Вміст твердої фази на вході 10 г/л. Проби відбирались об'ємним способом мірним сосудом. Густина пульпи на виході гідроциклону перераховувалась із використанням означених вище даних [1].

Точність, похибка й кількість вимірювань значення випадкової величини кожного досліджуваного фактору визначено за стандартними статистичними критеріями із урахуванням загальнотехнічних норм –похибка виміру не перевищує 5% при обраній 95% довірчій ймовірності. На початковому діапазоні при мінімальному тиску повітря густина піскового продукту відрізняється від густини пульпи на незначну величину. За такими умовами вимір об'ємним способом густини піскового продукту у першій точці має похибку, яка безумовно перевищує 5%. Але це не є робочим режимом гідроциклону оскільки згущення пульпи ще не відбувається.

Експериментальний стенд, модель гідроциклону, незалежні й залежні фактори детально представлено у роботах автора [1, 2].

Незалежні фактори:

- тиск на вході гідроциклону P_{in} (Па);
- коефіцієнт згущення (відношення густини пісового продукту до густини пульпи) безрозмірна величина – Bout/Bin.

Вихідні данні незалежних факторів та їх діапазон варіацій представлено на скріншоті програми Statgraphics Centurion (рис. 1).

Response Surface Design Attributes

Design class: Response Surface
 Design name: Central composite design: 2² + star
 Design characteristic: Rotatable
 File name: j1.sfx
 Comment: air pole

Base Design

Number of experimental factors: 2
 Number of blocks: 1
 Number of responses: 1
 Number of runs: 10, including 2 centerpoints per block
 Error degrees of freedom: 4
 Randomized: Yes

Factors	Low	High	Units	Continuous
Ppulp	70000	130000	Pa	Yes
Bout Bin	5	16		Yes

Responses	Units
Pair	Pa

The StatAdvisor

You have created a Central composite design: 2² + star design which will study the effects of 2 factors in 10 runs. The design is to be run in a single block. The order of the experiments has been fully randomized. This will provide protection against the effects of lurking variables.

Рис. 1. Центральний композиційний план із зоряною точкою 2²+1.

Fig. 1. Central composite design 2²+1

Обрано два незалежних фактори: тиск пульпи на вході гідроциклону (Ppulp) та коефіцієнт згущення пульпи, який визначаємо безрозмірним комплексом у вигляді відношення густини пісового продукту до густини пульпи на вході (Bout/Bin). Варіації вихідних параметрів:

- Ppulp 70000 Па – 130000 Па;
- Bout/Bin 5 – 16.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Результати Дисперсійного аналізу, що представлені на рис. 2, не підтверджують статистичну значущість впливу ефектів квадратичний членів.

Статистична значущість квадратичних членів перевірено стандартними картами Парето (рис. 3), графіками нормального (рис. 4) та напівнормального розподілу (рис. 5) [3].

Analysis of Variance for Pair - air pole

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Ppulp	3533,72	1	3533,72	5,21	0,0845
B:Bout_Bin	119870,	1	119870,	176,79	0,0002
AA	679,026	1	679,026	1,00	0,3736
AB	6806,25	1	6806,25	10,04	0,0339
BB	3379,08	1	3379,08	4,98	0,0894
Total error	2712,09	4	678,024		
Total (corr.)	136303,	9			

R-squared = 98,0102 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 95,523 percent
 Standard Error of Est. = 26,0389
 Mean absolute error = 13,2145
 Durbin-Watson statistic = 2,42162 (P=0,5421)
 Lag 1 residual autocorrelation = -0,256814

Рис.2. Дисперсійний аналіз для тиску повітряного стовпа
Fig. 2. Analysis of Variant for Pair – air pole

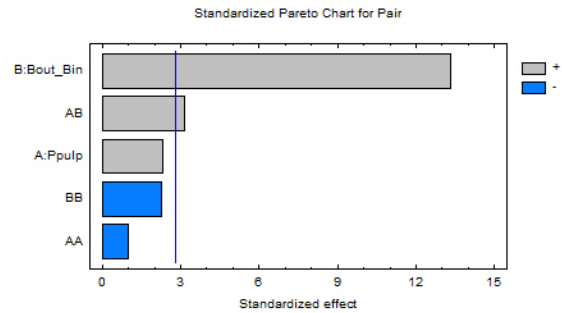


Рис.3. Карта Парето для тиску повітряного стовпа
Fig. 3. Standartized Pareto Chart for Pair

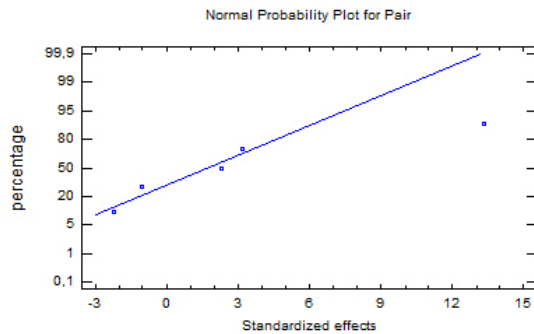


Рис.4. Графік нормальної ймовірності
Fig. 4. Normal Probability Plot

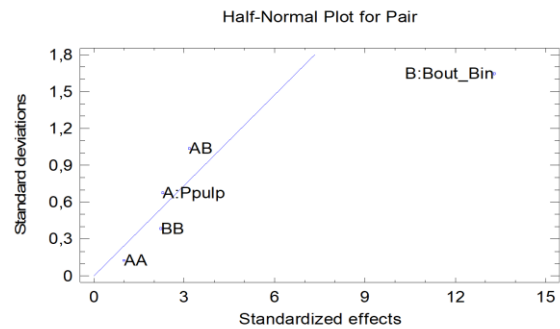


Рис.5. Графік полу-нормальної ймовірності
Fig. 5. Half-Normal Probability Plot

Дисперсійний аналіз (рис. 2), карти Парето (рис. 3) й графік “Half-Normal Probability Plot” (рис. 5) показують незначний сумісний вклад квадратичного члену, який позначено “АВ”. Скористаємось опцією «Кореляційно-регресійного аналізу» у модулі «Планування експерименту». Результати аналізу (таблиця 1) величини коефіцієнтів при квад-

ратичних членах показують, що їх вклад на 3-8 порядків менше ніж величина вільного члену рівняння та коефіцієнт фактору «коефіцієнт згущення» (Bout/Bin). Вклад фактору «тиск пульпи» (Ppulp) також на 5 порядків менше фактору «коефіцієнт згущення» (Bout/Bin).

Таблиця 1. Коефіцієнти рівняння регресії
Table 1. Regression coeffs. for Pair – air pole

Coefficient	Estimate
constant	-105,752
A:Ppulp	0,000783939
B:Bout_Bin	16,1301
AA	-1,35419E-8
AB	0,00025
BB	-0,898766

Всебічний аналіз графіків відповідних статистичних критеріїв показує, що вплив квадратичних членів не є статистично значущим. Максимальний ефект

взаємодії ми маємо між параметрами, які ми досліджуємо – незалежним фактором коефіцієнтом згущення (Bout/Bin)

та залежним тиском повітря у повітряному стовпі (Pair).

Вплив квадратичних членів – незначущий (рис. 2, 3, 4, 5). Як показали дослідження головних ефектів та пар факторів – взаємодія незалежних факторів відсутня (рис. 6,7).

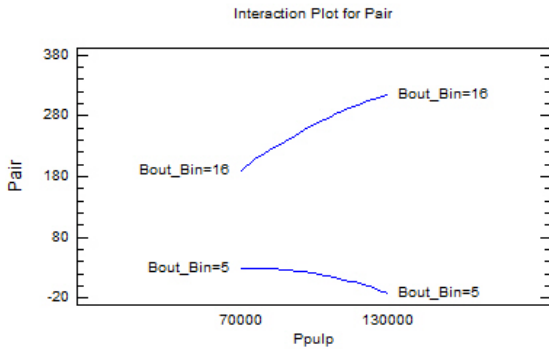


Рис.6. Графік пар незалежних факторів
Fig. 6. Interaction Plot for Pair

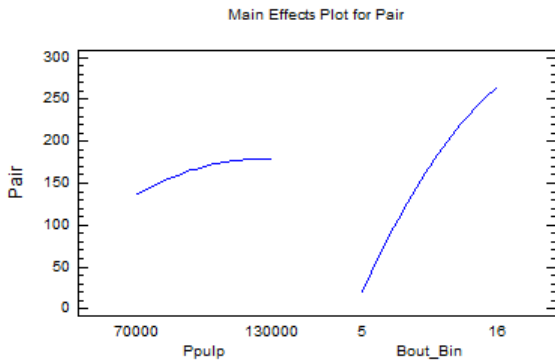


Рис.7. Графік головних ефектів пар незалежних факторів
Fig. 7. Main effects Plot for Pair

Побудуємо поверхню відгуку (рис. 8). Візуалізацію залежності факторів також представлено контурним графіком (рис. 9).

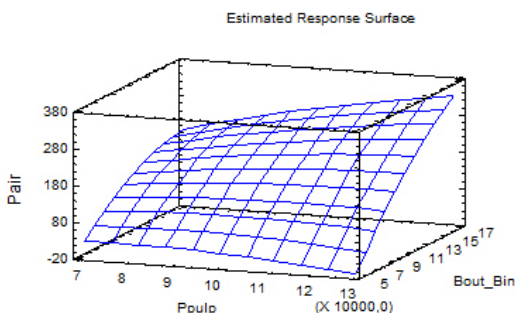


Рис.8. Графік оцінки поверхні відгуку
Fig. 8. Estimated Response Surface

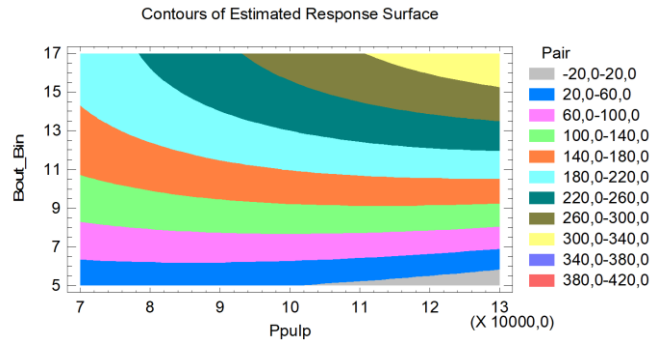


Рис.9. Контурний графік оцінки поверхні відгуку

Fig. 9. Contours of Estimated Response Surface

Аналіз поверхні відгуку й контурного графіку також підтверджують лінійну статистично значущу залежність між тиском у повітряному стовпі гідроциклону й коефіцієнтом згущення пульпи.

На поверхні відгуку ми маємо паралельні лінії вздовж осі тиску на вході гідроциклону, які відповідають фіксованому значенні ефекту згущення. Іншими словами, величина тиску живлення гідроциклону не впливає на залежність між тиском у повітряному стовпі й згущенням пульпи.

ВИСНОВКИ

Встановлено статистично значущу залежність між тиском у повітряному стовпі гідроциклону й ефектом згущення пульпи у стандартному циліндроконічному гідроциклоні. Підтверджено відсутність взаємного впливу незалежних факторів. Визначені ефекти взаємодії перевірено при оптимальних параметрах пневматичного регулятора: ширина щілини конфузора дорівнює 0,75 мм, а кут напряму керуючого потоку повітря відносно горизонтальної площини становить 30°.

На основі обмеженого об'єму експериментальних вимірів за обраним нами планом, який згенеровано статистичним пакетом, можна зробити попередні висновки про наявність лінійного характеру залежності коефіцієнту згущення та тиску у повітряному стовпі гідроциклону із пневматичним регулятором.

Встановлено відсутність статистично значущого впливу тиску живлення гідроциклону на залежність решти обраних факторів. Виключається необхідність контролю тиску на вході гідроциклону. Із системи автоматичного контролю можна виключити елементи, які контактують із високошвидкісним, абразивним й руйнівним потоком пульпи. Означений факт дозволяє суттєво підвищити надійність системи автоматичного керування роботи гідроциклону за тиском у повітряному стовпі.

Експериментальні дослідження проведено при оптимальних конструктивних параметрах пневматичного регулятора за критеріями мінімізації втрат енергії повітряного струму у соплі й мінімізації об'ємних витрат повітря. Означений критерій доцільно обирати в умовах, коли ми у промислових умовах маємо обмеження по максимальному тиску повітря й маємо оптимізувати об'ємні витрати.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Копаниця Ю. Д.** Очистка шламових вод збагачувальних фабрик в напірних гідроциклонах з пневматичним регулятором. дис... канд. техн. наук: 05.23.04. К: КНУБА, 159 с.
2. **Копаниця Ю. Д., Поляков В. Л.** Теоретичне дослідження керування потоку пульпи в зоні піскового насадка напірного гідроциклону повітряним струмом. Харків: Коммунальное хозяйство городов, 2007, 79. С. 241-247.
3. **Sun Jingchao, Kong Maiying, Pal Subhadip** The Modified-Half-Normal distribution: Properties and an efficient sampling scheme. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, 2021. P. 1–23.
4. **Hararah M. A., Endres Dueck E. J. Minkov L., Neeße T.** Flow conditions in the air core of the hydrocyclone. *Minerals Engineering*, 2010, 23(4), P. 295-300.
5. **ShiboKuang Li. Ji., Zheng Qi. Yuan W., Jiang Chen Aibing Yu** Computational analysis and optimization of hydrocyclone size to mitigate adverse effect of particle density. *Separation and Purification Technology*, 2017, 174, P. 251-263.
6. **Maysam Saidi, Reza Maddahian, Bijan Farhanieh, Hosse inAfshin** Modeling of flow field and separation efficiency of a deoiling hydrocyclone using large eddy simulation. *International Journal of Mineral Processing*, 2021, 112-113, P. 84-93.
7. **Nathacha K. G. Silva, Luiz O., VieiraMarcos G. M., Barrozo A. S.** Effects of underflow diameter and vortex finder length on the performance of a newly designed filtering hydrocyclone. *Powder Technology*, 2015, 286, P. 305-310.

REFERENCES

1. **Kopanitsa, Yu. D. (2007)** *Sludge treatment of concentrators in pressure hydrocyclones with pneumatic regulator*. (Doctoral thesis, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine). Retrieved from [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9A%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8F%20%D0%AE\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9A%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8F%20%D0%AE$)
2. **Kopanitsa, Yu. D. & Polyakov V. L. (2007)** Theoretical study of pulp flow control in the area of the sand nozzle of a pressure hydrocyclone by air current. *Municipal services of cities*, 79. 241-247. Retrieved from https://scholar.google.ru/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=SSFoG0QAAAAJ&citation_for_view=SSFoG0QAAAAJ:eQOLeE2rZwMC
3. **Sun, Jingchao, Kong, Maiying & Pal, Subhadip (2021)** The Modified-Half-Normal distribution: Properties and an efficient sampling scheme. *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 0 (0): 1–23. <https://doi.org/10.1080/03610926.2021.1934700>
4. **Hararah, M.A. Endres, Dueck, E. J. Minkov, L. & Neeße, T. (2010)** Flow conditions in the air core of the hydrocyclone. *Minerals Engineering*, 23(4), 295-300. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.12.013>
5. **ShiboKuang, Li. Ji., Zheng, Qi. Yuan, W. & Jiang Chen Aibing, Yu (2017)** Computational analysis and optimization of hydrocyclone size to mitigate adverse effect of particle

density. *Separation and Purification Technology*, 174, 251-263.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.034>

6. Maysam, Saidi, Reza, Maddahian, Bijan, Farhanieh & Hosse, in Afshin (2021) Modeling of flow field and separation efficiency of a deoiling hydrocyclone using large eddy simulation. *International Journal of Mineral*

Processing, 112-113, 84-93.

<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.06.002>

7. Nathacha, K.G.Silva, Luiz, O., Vieira Marcos, G. M. & Barrozo, A. S. (2015) Effects of underflow diameter and vortex finder length on the performance of a newly designed filtering hydrocyclone. *Powder Technology*, 286, 305-310. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.036>

Air column of pressure hydrocyclone with pneumatic regulator

Yuri Kopanytsia

Abstract. A reliable non-contact pneumatic pressure regulator of a pressure hydrocyclone is offered. The regulator is installed in the area of the sand nozzle. The pneumatic regulator of the standard pressure cylindrical-conical hydrocyclone provides non-contact thickening of the product in the area of the sand nozzle. In the process of controlling the operation of the hydrocyclone along its axis, an air column is formed. Features of the regulator affect the formation of the air column of the hydrocyclone. The pressure in the air column is manometric.

The task is to investigate the effect of pulp pressure at the inlet of the hydrocyclone, pulp thickening and air column pressure. Experimental studies were performed in the laboratory on a model of a standard industrial cylindrical-conical hydrocyclone HC360. The connection between the technological parameters of the hydrocyclone operation and the pressure in the air column has been studied. To establish possibilities of control of work of a hydrocyclone on pressure in an air column. The planning of the experiment in the laboratory on a hydrocyclone model was performed in the program Statgraphics Centurion XV.

Experimental studies were performed for the optimal parameters of the angle and slit of the pneumatic regulator. The optimization criterion is chosen – the maximum effect of pulp thickening while minimizing local energy losses in the nozzle. In laboratory conditions, the change in pulp pressure and density at the inlet of the hydrocyclone over the entire operating range is simulated. The laboratory model of the hydrocyclone was made on a scale of M1:10. Flotation waste was used as pulp. Modeling of hydrocyclone operation as a part of water-sludge system at the concentrator is carried out. The density of the solid phase is 1500 kg/m³.

The solids content at the inlet is 10 g/l. Samples were taken by volumetric measurement with a measuring vessel. A statistically significant relationship between the pressure in the air column of the hydrocyclone and the effect of pulp thickening in a standard cylindrical-conical hydrocyclone was established. The presence of the linear character of the dependence of the coefficient of thickening and pressure in the air column of the hydrocyclone with the pneumatic regulator is checked. The absence of a statistically significant effect of hydrocyclone supply pressure on the dependence of other selected factors was established.

Experimental studies were carried out at the optimal design parameters of the pneumatic regulator according to the criteria of minimizing the loss of energy of air current in the nozzle and minimizing the volumetric flow of air.

Keywords: pressure hydrocyclone; air column; pneumatic regulator.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2021