

УДК 621.928.3

В.М. Голубцов, профессор, д.т.н.

М.Л. Олейник, магистрант

Д.Ю. Кравченко, студент

К РАСЧЕТУ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОЦИКЛОНА ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОАО «ЗАПОРОЖСКИЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ КОМБИНАТ»

Запорожская государственная инженерная академия

Наведено результати аналітичного дослідження можливості застосування існуючих формул для розрахунку продуктивності гідроциклонів за умов глиноземного виробництва ОАО «Запорізький алюмінієвий комбінат».

Приведены результаты аналитического исследования возможности применения существующих формул для расчета производительности гидроциклонов для условий глиноземного производства ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат».

Введение. В настоящее время на различных производствах широко используются напорные гидроциклоны, применяемые для выделения взвешенных твердых частиц из жидкого раствора (суспензии), впускаемого через входную насадку в циклон [1-3]. Наряду с решением вопросов по качеству очистки или обогащению продукции важным является вопрос определения производительности гидроциклонов.

Анализ практических данных и достижений. В настоящее время [1] существует множество формул для расчета производительности гидроциклонов, которые представлены в табл. 1.

Данные формулы распределены на четыре группы.

К первой группе относятся простейшие формулы [4-9], которые отличаются между собой лишь величиной поправочного коэффициента k , которая составляет 18,5...26,6. Формулы учитывают только давление на входе в циклон P (H) и диаметр питающего отверстия d_n :

$$Q = k \cdot d_n^a \cdot P^{0,5} . \quad (1)$$

Ко второй группе относятся формулы [10-15], учитывающие, наряду с диаметром питающего отверстия d_n , еще и диаметр сливного патрубка d :

Таблица 1 – Формулы для расчета производительности гидроциклонов

Автор	Формула в единицах, принятых автором	Размерность величин	Результат расчета, Q м ³ /ч
1	2	3	4
[4]	$Q = 21d_n^2 \cdot P^{0,5}$, л/мин	d_n - см; P - кгс/см ²	433,6
[5]	$Q = 1,53k \cdot F \cdot H^{0,5}$, м ³ /ч	F - см ² ; H - м. вод. ст.; $k = 0,42$	549
[6]	$Q = 1,53d_n^2 \cdot H^{0,5}$, м ³ /ч	d_n - см; H - кгс/см ²	526,5
[7]	$Q = 23,6F \cdot H^{0,5}$, л/мин	F - см ² ; H - кгс/см ²	382,5
[8]	$Q = 0,36F \cdot (2g \cdot H)^{0,5}$, м ³ /ч	F - см ² ; H - кгс/см ² ; $g = 9,81$ м/с ²	430,81
[9]	$Q = 0,75 \pi \cdot d_n^2 \cdot \left(\frac{2g \cdot H}{\xi \cdot \rho} \right)^{0,5}$, м ³ /ч	d_n - см; H - кгс/см ² ; ρ - г/см ³ ; $g = 9,81$ м/с ² ; $\xi = 6$	488,55
[10]	$Q = 5k \cdot d_n \cdot d \cdot (g \cdot H)^{0,5}$, л/мин; $k = 0,81 / \alpha^{0,2}$	α - радиан; d_n, d - см; H - кгс/см ² ; $g = 9,81$ м/с ²	345,36
[11]	$Q = 0,25\pi \cdot d_n \cdot d \cdot (2g \cdot H)^{0,5}$, м ³ /ч	d_n, d - см; H - кгс/см ² ; $g = 9,81$ м/с ²	326,02
[12]	$Q = 15,8d_n \cdot d \cdot \left(\frac{H}{\rho} \right)^{0,5}$, л/мин	d_n, d - см; H - кгс/см ² ; ρ - г/см ³	355,5
[13]	$Q = k \cdot (d_n \cdot d)^{0,9} \cdot (H)^{0,5}$, м ³ /ч	d_n, d - см; H - м. вод. ст.	300,7
[14]	$Q = \mu \cdot d_n \cdot d \cdot \Delta \cdot (2g \cdot H)^{0,5}$, м ³ /ч; $\mu = 0,27$	d_n, d, Δ - см; H - кгс/см ² ; $g = 9,81$ м/с ²	448,66
[15]	$Q = d_n \cdot d \cdot (P)^{0,5}$, м ³ /ч	d_n, d - см; P - кгс/см ²	375,05

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
[16]	$Q = 2,4F \cdot \frac{d}{D} \cdot \left(\frac{2g \cdot H}{\rho} \right)^{0,5}, \text{ м}^3/\text{с}$	$F - \text{см}^2; d, D - \text{м}; H - \text{м. вод. ст.};$ $\rho - \text{т/м}^3$	1106
[17]	$Q = 1,7F \cdot \frac{d}{D} \cdot (2g \cdot H)^{0,5}, \text{ см}^3/\text{с}$	$F - \text{см}^2; d, D - \text{см}; H - \text{м. вод. ст.};$ $g = 9,81 \text{ м/с}^2$	787
[18]	$Q = 3,48k_k \cdot d_i^2 \cdot H^{0,5}, \text{ м}^3/\text{ч}$ $K_k = k_n \left[\left(1,45 - 3,72 \frac{\Delta}{D} \right) \cdot \frac{d}{D} + 1,35 \frac{\Delta}{D} - 0,17 \right];$ $k_n = \frac{1}{27,3 \frac{d_n}{D}} - \frac{1}{51,8 \left(\frac{d_n}{D} \right)^2} - \frac{1}{2,56}$	$d_n - \text{см};$ $H - \text{кгс/см}^2$	423,9
[19]	$Q = 8(d_n \cdot d)^{0,9} \cdot D^{0,5} \cdot \sqrt{\text{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{P}{\rho}}, \text{ л/мин}$	$D, d_n \text{ и } d - \text{см}; P - \text{кгс/см}^2;$ $\rho - \text{г/м}^3$	289,9
[20]	$Q = 28,5 \cdot (D \cdot d_n \cdot d \cdot H)^{0,5}, \text{ л/мин}$	$D, d_n, d - \text{см}; H - \text{кгс/см}^2;$	278,47
[21]	$Q = \frac{k_n \cdot S_n \cdot H^{0,5}}{\frac{S}{S_n} - 1}; S = 0,75 \pi \cdot D^2$	нет информации	–
[22]	$Q = k_F \cdot D \cdot \frac{d_n}{D} \cdot \frac{d_0}{D} \cdot \left(\text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right)^{0,5} \cdot H^{0,5}, \text{ л/мин}$	нет информации	–
[22]	$Q = k_F \cdot d_i^{0,95} \cdot d^{0,85} \cdot D^{0,2} \cdot \left(\text{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{-0,45} \cdot H^{0,5}, \text{ л/мин}$	$D, d_n \text{ и } d - \text{см}; H - \text{кгс/см}^2;$ $k_F = 1,8$	115,6
[23]	$Q = 22d_i \cdot d \cdot P^{0,5} \cdot \left(\text{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{0,23} \cdot D^{-0,17}, \text{ л/мин}$	$d_n, d, D, - \text{см};$ $P - \text{кгс/см}^2$	166,6

1	2	3	4
[24]	$Q = k \cdot \frac{d_n \cdot d}{\sqrt{\frac{d_n}{d} + 1 + \frac{d}{d_n}}} \cdot \sqrt{\frac{H}{\rho_n}}, \text{ л/мин}$ $k = 20,8 + \frac{1,189D - 4,75}{0,073D - 0,311 + \text{tg}(0,5\alpha)}$	Q - л/мин; d_n, d - см; H - кгс/см ² ; ρ_n - г/м ³	472,8
[25]	$Q = 15,5k_D \cdot k_\alpha \cdot d_i \cdot d \cdot P^{0,5}, \text{ л/мин}$ $k_D = 0,8 + \frac{1,2}{1 + 0,1 \cdot D}; k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \text{tg}(\alpha/2)}$	d_n, d - см; H - кгс/см ² ; α - градус; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;	353,7
[26]	$Q = 26,4 d_n^2 \cdot \sqrt{\frac{H + h_c}{1 + \left(\frac{0,4 d_n^2}{0,4 d^2 + 0,7 \Delta^2}\right)^2}}, \text{ л/мин}$	d, d_n, Δ - см; H, h_c - кгс/м ²	расчет невозможен, нет данных по величинам H, h_c
[27]	$Q = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \left(\frac{d}{d_n}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot (H - H_{амм})}{\rho \cdot \left[\left(\frac{d}{d_n}\right)^4 \cdot (\xi - 1) + (1 - \beta) + (1 - \alpha)^2\right]}}, \text{ м}^3/\text{с}$	H - кгс/м ² ; d, d_n - м; ρ - кг/м ³ ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ β - выход пульпы в пески по массе; α - объемный выход песков, доли ед.	расчет невозможен, нет данных по величинам ξ, β, α
[28]	$Q_0 = k_B \cdot k_D \cdot 10^{\frac{T_u}{100}} \cdot \left(\frac{T_u}{100}\right) \cdot F \cdot H^{0,5}, \text{ т/ч}$ $k_B = \left(1 - \frac{T_u}{T_m}\right)^{0,5}; k_D = \frac{0,008D + 2}{0,01D + 1}; T_i = \frac{100\delta}{\delta + 0,665}$	F - см ² ; D - мм; H - в кгс/см ² ; δ - г/см ³ ; T_u - содержание твердого в исходной пульпе, %; T_m - максимальное содержание твердого в пульпе, %; k_D - поправка на диаметр циклона	расчет невозможен, нет данных по величинам δ, T_m, T_u
[29]	$Q = k_B \cdot d_n \cdot d \cdot \left[\left(1 - \frac{d_n}{D}\right) \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\right)\right]^{0,5} \cdot \Delta H^n, \text{ л/мин}$ $k_B = \left(3,4 + \frac{0,3}{0,03 + \text{tg} \frac{\alpha}{2}}\right) \cdot \frac{D + 20}{D + 10} \cdot f(k)$	d_n, d - см; ΔH - м. вод. ст.; α - градус; $n = 0,52 \dots 0,58$	расчет невозможен, нет данных по величинам $f(k)$

$$Q = k_2 \cdot d_n^a \cdot d^b \cdot P^{0,5} . \quad (2)$$

В формулах третьей группы [16-25], наряду с параметрами d_n и d , сделана попытка учесть также угол конусности α и диаметр гидроциклона D :

$$Q = k_2 \cdot d_n^a \cdot d^b \cdot P^{0,5} . \quad (3)$$

К четвертой группе относятся формулы сложного типа [26-29], в которых авторы пытаются учесть влияние некоторых дополнительных факторов, таких как выход пульпы в слив и в пески, содержание твердого в исходной пульпе и сливе с использованием эмпирических коэффициентов, сильно усложняющих формулы:

$$Q = k_4 \cdot f(D, d_n, d, \alpha, T, \delta) \cdot P^{0,5} . \quad (4)$$

Многообразие эмпирических формул для расчета производительности гидроциклонов затрудняет использование их в практической деятельности.

Задачей исследования является исследование возможности применения существующих формул для расчета производительности гидроциклона ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат».

Изложение материалов исследований. Для определения возможности применения формул из табл. 1 выполняли расчет производительности гидроциклона ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат» следующих параметров:

- диаметр гидроциклона $D = 500$ мм;
- диаметр питающего патрубка $d_n = 156$ мм;
- диаметр сливного патрубка $d = 170$ мм;
- диаметр песковой насадки $\Delta = 40$ мм;
- давление на входе $P_{вх} = 0,2$ МПа;
- плотность суспензии ρ принята 1 г/см³.

Результаты расчета приведены в табл. 1. Из нее следует, что производительность гидроциклона ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат» может составить следующие величины:

- по первой группе формул: $Q = (380 \dots 549)$ м³/ч;
- по второй группе формул: $Q = (300 \dots 448)$ м³/ч;
- по третьей группе формул: $Q = (87 \dots 787)$ м³/ч;
- по четвертой группе формул рассчитать производительность гидроциклона не удалось из-за наличия большого количества неизвестных коэффициентов (табл. 1).

Таким образом, производительность гидроциклона могла бы составить от 87 до 787 м³/ч. На самом деле производительность гидроциклона по данным указанного предприятия составляет 353 м³/ч. Наиболее близким к этому значению является результат расчета по формуле [26], в соответствии с которой производительность определяется по формуле:

$$Q = 15,5 k_D \cdot k_\alpha \cdot d_n \cdot d \cdot P^{0,5} , \quad (5)$$

где k_D – поправочный коэффициент на диаметр циклона D ; $k_D = 0,8 + \frac{1,2}{1 + 0,1 \cdot D}$; k_α – поправочный коэффициент на угол конуса циклона $k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \operatorname{tg}(0,5\alpha)}$, при этом диаметры питающего (d_n) и сливного (d) отверстий приняты в сантиметрах, а давление на входе в циклон (P) – в кгс/см².

Выводы:

- существующее многообразие эмпирических формул для расчета производительности гидроциклонов затрудняет использование их в практической деятельности;
- каждая из формул применима для циклонов, подобных испытанным авторами формулы, и не может быть использована для расчета производительности любого циклона, то есть формулы, приведенные в табл. 1, не являются универсальными;
- существующие формулы являются эмпирическими зависимостями и не раскрывают физической сущности процессов, происходящих в циклоне, поэтому не могут быть использованы при проектировании новых циклонов;
- совпадение значения производительности гидроциклона ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат» с рассчитанным по формуле [26] может оказаться простым совпадением, так как эмпирические формулы не могут учесть всех факторов, определяющих производительность циклона. Необходимо разработать единую теорию расчета производительности гидроциклонов, чему будут посвящены дальнейшие работы авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Поваров А. И.* Гидроциклоны на обогатительных фабриках / А. И. Поваров. – М.: Недра, 1978. – 232 с.
2. *Скирдов И. В.* Очистка сточных вод / И. В. Скирдов, В. Г. Пономарев. – М.: Обогащение руд, 1960. – 249 с.
3. *Богданов О.С.* Справочник по обогащению руд: подготовительные процессы / О. С. Богданов. – М.: Недра, 1982. – 225 с.
4. *Chaston J. P. M.* A simple formula for calculating the approximate capacity of a hydro-cyclone / J. P. M. Chaston // Bull. of the Instn. of Min. and Metall. – 1958. – N 615. – P. 203-208; N 617, p. 358-365; N 621, p. 601-603.
5. *Смирняков В. В.* Исследование путей механизации и повышения качества очистки промывочных растворов при бурении шахтных стволов: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. «05.05.06» / В. В. Смирняков. – Ленинград, 1958. – 18 с.
6. *Замбровский В. А.* Использование гидроциклонов для очистки известкового молока от песка / В. А. Замбровский. – М.: ГосИНТИ, 1958. – С. 17.
7. *Акопов М. Г.* Основы обогащения углей в гидроциклонах / М. Г. Акопов. – М.: Недра, 1967. – 178 с.
8. *Курбатов В. П.* К исследованию некоторых конструктивных параметров и технологических условий работы гидроциклона как аппарата для обогащения угольной мелочи в суспензии: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. «05.05.08» / В. П. Курбатов. – Томск, 1959. – С. 14.
9. *Нехороший И. Х.* Исследование обогащения мелкого угля в гидроциклонах с применением пирито-глинистой суспензии: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. «05.05.08» / И. Х. Нехороший. – Харьков, 1963. – С. 15.
10. *Поваров А. И.* Технологический расчет гидроциклонов / А. И. Поваров // Обогащение руд. – 1960. – № 1. – С. 29-33.
11. *Жапгарин А. И.* Режим работы гидроциклона низкого давления: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. «05.05.08» / А. И. Жапгарин. – Алма-Ата, 1962. – С. 24.
12. *Trawinski H.* Der hydrozyclon als hilfsgerat zur grundstoffveredelung / H. Trawinski // Chemie - Ing. Techn. – 1953. – Jg. 25, N 6. – 331-340.
13. *Moder J. A.* Fine-size, close-specific-gravity solid separation with the liquid-solid cyclone / J. A. Moder, D. A. Dahlstrom // Chem. Engng. Progr. – 1952. – V. 48, N 2. – P. 75-88.
14. *Измайлова А. Н.* Исследование работы гидроциклонов на суспензиях полимерных материалов: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. «05.05.08» /

- А. Н. Измайлова. – Ленинград, 1969. – С. 17.
15. *Fontein F. J.* Wirking des hydrozyklons und des bogensiebs sowie-deren anwen dungen / F. J. Fontein // *Aufbereitungs-Technik*. – 1961. – N 3. – S. 85.
 16. *Циперович М. В.* Испытание гидроциклона на углемойке Днепродзержинского завода / М. В. Циперович, М. Ю. Долинский // *Кокс и химия*. – 1941. – № 5. – С. 6-12.
 17. *Фальстром П.* Изучение гидроциклона как классифицирующего аппарата / П. Фальстром // *Горнорудная промышленность*. – 1963. – № 42. Реф. 231. – С. 32 (Экспресс-информация).
 18. *Курочицкий Ч. К.* Гидроциклоны в крахмало-упаточной промышленности / Ч. К. Курочицкий, Н. С. Шипунова. – М.: Пищевая промышленность, 1964. – С. 86.
 19. *De Kak S. K.* A review symposium on recent developments in the use of hydrocyclones in mill operation / S. K. De Kak // *Jorn. Chem. Met. and Min. Soc.* – 1956. – V. 56. – P. 281.
 20. *Рундквист В.А.* К расчету процесса классификации в гидроциклоне / В. А. Рундквист // *Обогащение руд*. – 1966. – № 2. – 266 с.
 21. *Herkenhoff E. C.* Factors affecting ore separations in a 4-in. DSM Cyclone Separator / E. C. Herkenhoff // *Eng. and Min. Journ.* – 1953. – V. 154, N 8. – P. 88-91.
 22. *Fuimoto T.* Experiment on the pressure, drop, flow ratio in hydrocyclones with similar figures / T. Fuimoto, T. Moro // *Jorn. Min., Metallurg. Inst.* – 1963. – V. 79. – P. 491.
 23. *Bednarski S.* Hydrocyclony w przerobce rud i mineralow / S. Bednarski // *Rudy i metale nieze-lazne*. – 1958. – Cz. 1, Nr. 1– s. 7; Cz. 2, Nr. 2, s. 37.
 24. *Battaglia A.* Nowe badania nad natezeniem przeplywu przez hydro-cyklony / A. Battaglia, J. Blaschke, W. Cieslik // *Przeglad Gorniczny*. – 1969. – T. XXV (LVI). – № 3(847). – S. 114-119.
 25. *Поваров А. И.* Расчет производительности гидроциклонов / А. И. Поваров, А. А. Щербаков // *Обогащение руд*. – 1965. – № 2. – С. 3-10.
 26. *Барский В. Г.* О методе расчета производительности гидроциклона / В. Г. Барский // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 1963. – № 6. – С. 51-63.
 27. *Шмачков И. А.* К вопросу определения производительности гидроциклона / И. А. Шмачков // *Научные труды Харьковского горного института*. – Харьков: ХГИ, 1962. – Т. XII. – С. 157-161.
 28. *Клячин В. Т.* Расчет гидроциклонов / В. Т. Клячин, В. И. Ревнивцев // *Труды института Уралмеханобр*. – 1963. – Вып. 10. – С. 51-78.
 29. *Bendarski S.* Doktorarbeit Akademi Gornicza-Hutnicza, 1968.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2009 р.
Рецензент – проф. Є.М. Крючков