

К РАСЧЕТУ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАПОРНЫХ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Запорожская государственная инженерная академия

Наведено результати аналітичного й експериментального досліджень щодо розрахунків коефіцієнта опору гідроциклонів за умов сумісної роботи ліній зливної та шламової насадок.

Приведены результаты аналитического и экспериментального исследований по расчетам коэффициента сопротивления гидроциклонов в условиях совместной работы линий сливной и шламовой насадок.

Введение. В настоящее время на различных производствах широко используют напорные гидроциклоны [1,2], применяемые для выделения взвешенных твердых частиц из жидкого раствора (суспензии), подаваемого в аппарат через входную насадку. Наряду с решением вопросов качества очистки или обогащения продукции важным остается и определение производительности данного аппарата.

Анализ практических данных и достижений. В гидроциклонах, в отличие от газовых циклонов [3], часть вошедшей жидкости (суспензии) в виде обогащенной пульпы непрерывно отводится через шламовую насадку, а остальная ее часть в виде осветленной воды покидает гидроциклон через сливную насадку. Наличие непрерывного отвода пульпы через шламовую насадку осложняет гидродинамические процессы в гидроциклоне и сложным образом влияет на его сопротивление, что приводит к наличию большого количества формул [1], применяемых различными авторами для расчета производительности напорных гидроциклонов.

Данные формулы имеют эмпирический характер и не раскрывают физическую сущность процесса, а результаты расчетов с их использованием, выполненных в работе [4], свидетельствуют, о том что один и тот же гидроциклон при неизменной величине давления на его входе может иметь различные значения производительности.

Задача исследования. В работе [5] установлено, что производительность гидроциклонов можно определить с использованием коэффициента его гидравлического сопротивления. Однако ввиду отсутствия зависимости для расчета данного коэффициента определение производительности по формуле, предложенной в данной работе, имеет частный характер и не может быть распространено на любые конструкции гидроциклонов. В этой связи задачей настоящего исследования является разработка методики расчетного определения коэффициента гидравлического сопротивления данного аппарата.

Изложение материалов исследований. Гидроциклон рассматриваем как гидравлическое сопротивление, которое имеет один вход и две гидравлические линии сливной и шламовой насадок, при этом каждая линия характеризуется

гидравлическим сопротивлением, величина которого определяется собственным коэффициентом сопротивления:

– по линии сливной насадки

$$\xi_{ex1} = \frac{2\Delta P_{0-1}}{\rho_0 \cdot W_{01}^2} ; \quad (1)$$

– по линии шламовой насадки

$$\xi_{ex2} = \frac{2\Delta P_{0-2}}{\rho_0 \cdot W_{02}^2} , \quad (2)$$

где $\Delta P_{0-1} = P_0^* - P_1$ – перепад давления по линии сливной насадки (разность между полным давлением на входе в гидроциклон и статическим давлением в сливной насадке); $\Delta P_{0-2} = P_0^* - P_2$ – перепад давления по линии шламовой насадки (разность между полным давлением на входе в гидроциклон и статическим давлением в шламовой насадке); W_{01}, W_{02} – соответственно скорость потоков жидкости по линии сливной и шламовой насадок, отнесенная к входной площади гидроциклона; ρ_0 – плотность суспензии на входе в гидроциклон.

С учетом этого производительности гидроциклона по указанным гидравлическим линиям, отнесенные к его входной площади, можно определить как:

$$m_{01} = \rho_0 \cdot \Sigma f \cdot W_{01} ; \quad (3)$$

$$m_{02} = \rho_0 \cdot \Sigma f \cdot W_{02} , \quad (4)$$

где Σf – суммарная площадь патрубков подвода суспензии в гидроциклон; $\Sigma f = z \cdot a \cdot b = 0,5z \cdot \pi \cdot d_{экв}^2$ (a, b – ширина и высота одного патрубка подвода соответственно, $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр одного патрубка подвода, z – количество патрубков подвода).

Производительность циклона определяем суммой производительностей его вышеуказанных линий:

$$m_0 = m_{01} + m_{02} = \rho_0 \cdot \Sigma f \cdot W_0 . \quad (5)$$

Откуда, с учетом уравнений (1) и (2), скорость на входе в циклон, соответствующая общей производительности гидроциклона, может быть определена как

$$W_0 = W_{01} + W_{02} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{0-1}}{\rho_0}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\xi_{ex1}}} + \sqrt{\frac{1}{\xi_{ex2}} \cdot \frac{\Delta P_{0-2}}{\Delta P_{0-1}}} \right) . \quad (6)$$

Тогда выражение для определения гидравлического сопротивления по линии сливной насадки можно записать следующим образом:

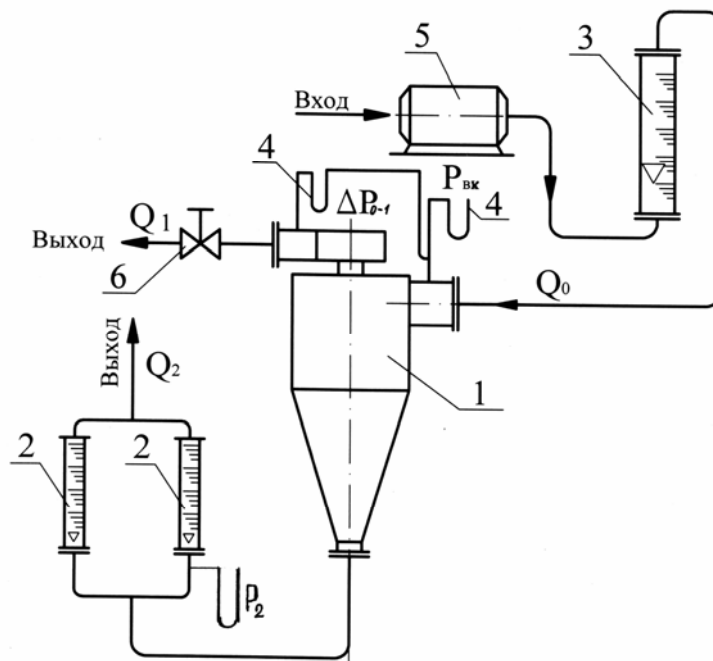
$$\Delta P_{0-1} = \frac{\rho_0 \cdot W_0^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{ex}1}} + \sqrt{\xi_{\text{ex}2} \cdot \frac{\Delta P_{0-2}}{\Delta P_{0-1}}}} \right)^2. \quad (7)$$

После деления левой и правой частей уравнения (7) на $\rho_0 \cdot W_0^2/2$ получаем выражение для определения коэффициента сопротивления гидроциклона:

$$\frac{2\Delta P_{0-1}}{\rho_0 \cdot W_0^2} = \xi_{\text{ex}0} = \left(\frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{ex}1}} + \sqrt{\xi_{\text{ex}2} \cdot \frac{\Delta P_{0-2}}{\Delta P_{0-1}}}} \right)^2. \quad (8)$$

Следовательно, общий коэффициент сопротивления гидроциклона, отнесенный к площади его входного сечения, определяется коэффициентами сопротивления по линиям сливной и шламовой насадок, а также отношением сопротивлений линий указанных насадок.

На первом этапе исследований вышеуказанные коэффициенты определяли экспериментальным путем (рис. 1). В качестве рабочего тела использовали воздух.



1 - модель циклона; 2 - ротаметр РС-5; 3 - ротаметр РС-7;
4 - микроманометр; 5 - пылесос; 6 - вентиль

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В процессе опытов измеряли общий расход рабочего тела Q_0 через гидроциклон (ротаметр РС-7), расход по линии шламовой насадки Q_{01} (ротаметр РС-5), расход по линии сливной насадки Q_{02} рассчитывали как разницу $Q_0 - Q_{01}$. При этом измеряли также давления на входе в гидроциклон $P_{\text{вх}}$ и на выходе по линии шламовой насадки P_2 , перепад давления по линии сливной насадки ΔP_{0-1} (микроманометры типа ММН), перепад давления по линии шламовой насадки ΔP_{0-2} рассчитывали как $\Delta P_{0-2} =$

$P_{\text{вх}}$ - P_2 . Опыты проводили при постоянной степени открытия дросселя, установленного на выходе линии сливной насадки гидроциклона. Перепады давления и давление на входе изменяли варьированием подачи воздуха в гидроциклон. Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментов

Давление, на входе, кПа, $P_{\text{вх}}$	Перепад давлений, кПа			Производительность, м ³ /ч		
	ΔP_{0-1}	ΔP_{0-2}	$\Delta P_{0-1} - \Delta P_{0-2}$	Q_0	Q_{01}	Q_{02}
16,42	1,41	1,56	0,15	11,74	9,81	1,93
18,34	1,62	1,78	0,16	13,92	10,60	3,32
19,22	1,65	1,81	0,16	14,55	10,83	3,72
20,37	1,77	1,92	0,15	15,58	11,23	4,35
21,86	1,89	2,04	0,15	16,18	11,44	4,74
22,00	2,11	2,27	0,16	17,86	13,01	4,85

Из данных, представленных в табл.1, следует, что отношение перепада давлений по линии сливной насадки к перепаду давлений по линии шламовой насадки может быть принято равным единице, тогда $\Delta P_{0-1} - \Delta P_{0-2} = \Delta P$ и равно перепаду давления на гидроциклоне, а общий коэффициент сопротивления гидроциклона, отнесенный к площади входного сечения гидроциклона, может определяться следующей зависимостью:

$$\xi_{\text{вх}0} = \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{вх}1}}} + \sqrt{\frac{1}{\xi_{\text{вх}2}}}} \right)^2. \quad (9)$$

В соответствии с этим на рис. 2 представлено изменение производительности гидроциклона по линиям его шламовой и сливной насадок при изменении перепада давления.

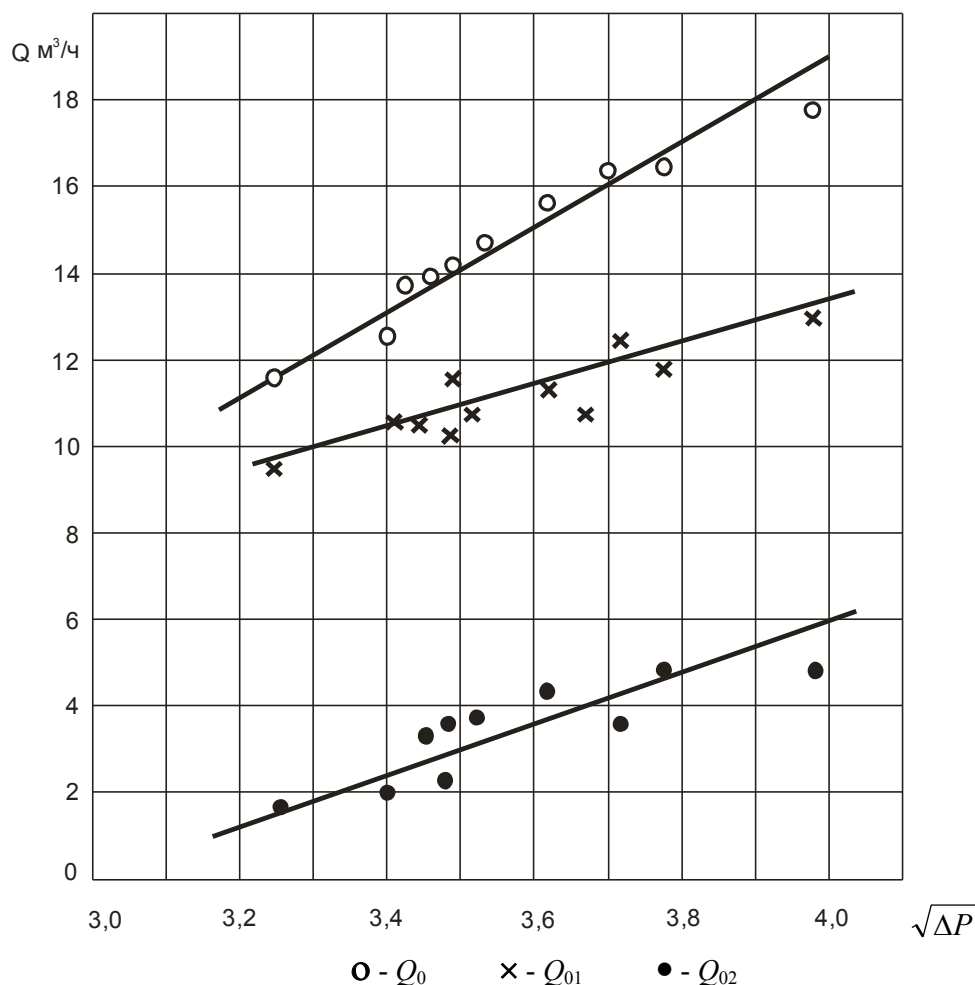


Рисунок 2 — Изменение производительности гидроциклона по линиям шламовой и сливной насадок при изменении перепада давления на гидроциклоне

Видно, что изменение производительности по линиям шламовой и сливной насадок гидроциклона в зависимости от перепада давления на гидроциклоне $\sqrt{\Delta P}$ имеет линейный характер, как и для производительности существующих гидравлических устройств.

Значения общего коэффициента сопротивления гидроциклона $\xi_{ex,0}$, коэффициентов сопротивления по линиям сливной ξ_{ex1} и шламовой насадок ξ_{ex2} , а также значения скорости движения воздуха на входе в гидроциклон и линиям сливной и шламовой насадок, рассчитывали по данным табл. 1 с использованием формул:

– коэффициенты сопротивлений по линиям

$$\xi_{exi} = \frac{2g \cdot \Delta P}{\rho_0 \cdot W_{0i}^2}, \quad (10)$$

где ρ_0 – плотность воздуха, при температуре 20 °C, $\rho_0 = 1,205 \text{ кг/м}^3$.

– скорости движения воздуха

$$W_{0i} = \frac{Q_{0i}}{F_{горл} \cdot 3600}, \quad (11)$$

где $F_{горл}$ – площадь горловины гидроциклона, $F_{горл} = 0,0011 \text{ м}^2$.

Общий теоретический коэффициент сопротивления гидроциклона вычисляли по формуле (9). Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения скоростей и коэффициентов сопротивления циклона

W_0 , м/с	W_{01} , м/с	W_{02} , м/с	ξ_{ex1}	ξ_{bx0}	ξ_{ex2}	ξ_0
2,020	2,020	0	23,139	23,139	-	-
2,955	2,475	0,480	28,181	19,771	749,723	19,77
3,207	2,664	0,543	26,611	18,363	640,742	18,357
3,232	2,753	0,480	29,227	21,194	961,909	21,19
3,510	2,576	0,934	29,941	16,123	227,541	16,12
3,510	2,677	0,833	27,269	15,858	281,356	15,82
3,510	2,942	0,568	22,951	16,123	615,314	16,12
3,662	2,727	0,934	27,144	15,059	231,271	15,06
3,914	2,841	1,073	26,630	14,029	186,594	14,02
4,040	3,194	0,846	22,019	13,764	313,973	13,76
4,091	2,879	1,212	27,899	13,815	157,365	14,5
4,495	3,283	1,212	23,871	12,733	175,096	12,24

Как следует из табл. 2, самое большое значение коэффициента сопротивления наблюдается по линии шламовой насадки, уменьшаясь при увеличении перепада давлений. Коэффициент сопротивления по линии сливной насадки изменяется незначительно и в пределах погрешности измерений можно считать его постоянным, что можно объяснить наличием свободного слива по данной линии. Суммарный коэффициент сопротивления определяется, в основном, коэффициентом сопротивления по линии сливной насадки. Характер поведения коэффициента сопротивления по линии шламовой насадки можно объяснить наличием противодействия, создаваемого ротаметром РС-5, и уменьшаемым при этом параметром крутки в направлении удаления шлама.

Сопоставление значений общего коэффициента сопротивления гидроциклона, рассчитанного по входной скорости в циклон с использованием формул (9) и (10), представленных в табл. 2, показали одинаковые результаты, то есть

$$\xi_{ex0} = \xi_0 = \frac{2g \cdot \Delta p}{\rho_0 \cdot W_0^2} = \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\xi_1}} + \sqrt{\frac{1}{\xi_2}}} \right)^2. \quad (11)$$

Выводы:

- получена в общем виде аналитическая зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления гидроциклона;
- коэффициент сопротивления гидроциклона определяется коэффициентами сопротивления по линиям сливной и шламовой насадок, но, в основном, зависит от коэффициента сопротивления по линии сливной насадки;
- разработка аналитических зависимостей по определению коэффициентов сопротивления гидроциклона по линиям сливной и шламовой насадок даст возможность расчетным путем определить коэффициент сопротивления гидроциклона и его производительность.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. *Голубцов В. М.* К расчету коэффициентов сопротивления пылевых циклонов / В. М. Голубцов, С. В. Михайличенко // Теплоэнергетика. – 1985. – № 4. – С. 41-44.
4. *Голубцов В. М.* К расчету производительности гидроциклона глиноземного производства ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат» / В. М. Голубцов, М. Л. Олейник, Д. Ю. Кравченко // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – Вип. 20. – С. 147-154.
5. *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. – 15 с.

Стаття надійшла до редакції 08.12..2009 р.

Рецензент, проф. Є.М. Крючков