

ЖАБАГИЕВА К.
phD докторант

АБДУРАМАНОВ А.
доктор технических наук, профессор
Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати, г. Тараз, Казахстан, jabag@list.kz

ПОТЕРИ НАПОРА НА ПЕРЕМЕШИВАНИЕ МАССЫ В ЦИКЛОНЕ

Гидроциклон как классифицирующий (сгущающий) аппарат представляет собой короткую, полую цилиндроконическую трубу, широко применяется почти во всех отраслях производства.

Технологическая и экономическая эффективность гидроциклонных насосных установках всецело зависит от величины потери удельной энергии при классификации (сгущения) гидросмеси в гидроциклоне. Этот вид потери напора совершается в конической части аппарата, где движение каждого из потоков происходит с переменным расходом вдоль пути.

Ключевые слова: гидроциклон, потеря напора, внешний (нисходящий) и внутренний (восходящий) потоки.

Классический гидроциклон (рис.1) состоит из цилиндроконического корпуса 1 с тангенциальным вводом 2, коаксиально расположенных сливного патрубка 3 и песковой насадки 4. Технологический процесс в гидроциклоне протекает следующим образом.

Промысловая жидкость под давлением подается в корпус гидроциклона по тангенциальному вводу, благодаря чему приобретает вращательное движение, обеспечивающее за счет действия центробежных сил классификацию (разделение) исходного материала на тонкий и грубый продукты. Грубый продукт (шлам) отбрасывается к конической поверхности гидроциклона, по ней, вращаясь, перемещается к песковой насадке и выходит через нее из гидроциклона. Обусловленная вращением потока центробежная сила вблизи оси гидроциклона настолько значительна, что жидкость в центральной части гидроциклона разрывается, в результате чего образуется воздушный столб в виде вихревого шнура, вдоль которого движется восходящий поток, выносящий в слив через сливной патрубок более тонкий продукт. Таким образом, в гидроциклоне создаются два вращающихся в одну сторону спиральных потока: внешний (нисходящий) и внутренний (восходящий).

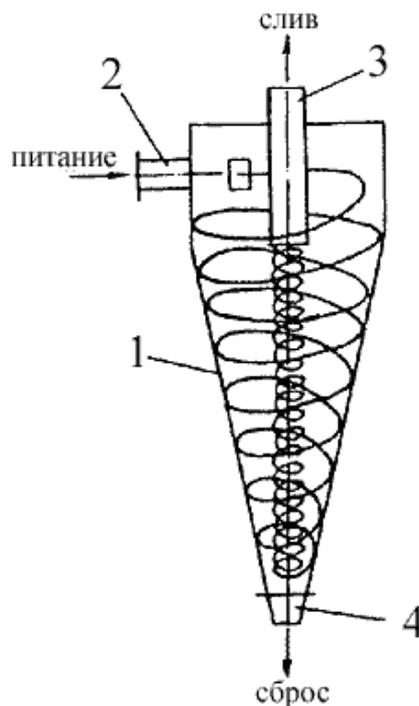


Рис.1. Гидроциклон

Общие потери напора в гидроциклоне [1,2,3,4] складывается из потери на перемешивание массы в циклоне $h_{w.c.}$, на местные сопротивления $h_{w.m.}$ на внутреннюю вязкость $h_{w.в.}$ на трение о стенки аппарата $h_{w.мп.}$, то есть

$$\Sigma h_w = h_{w.c.} + h_{w.m.} + h_{w.e.} + h_{w.mp.} \quad (1)$$

Рассматриваются два сечения, I-I и II-II, отстоящих друг от друга на расстоянии dz , за промежуток времени $\Delta t = 1c$. Тогда на основании теоремы об изменении количества движения имеем:

$$\rho(\alpha_2 \bar{g}_{z_2}^2 \omega_2 - \alpha_1 \bar{g}_{z_1}^2 \omega_1) = F \quad (2)$$

где, $\bar{g}_{z_1}, \bar{g}_{z_2}$ - средние значения осевых скорости, соответственно, в I и II сечениях;

ω_1, ω_2 - площади поперечного сечения, соответственно, в I и II сечениях;

ρ - плотность жидкости;

F - суммарная действующая сила.

Без учета сил трения и при $\alpha_1 \cong \alpha_2 \cong 1$ выражения (2) имеет вид

$$\rho \bar{g}_{z_2}^2 \omega_2 - \rho \bar{g}_{z_1}^2 \omega_1 = p_1 \omega_1 - p_2 \omega_2, \quad \text{ь} \quad (3)$$

где, p_1, p_2 - средние значения давлений, соответственно, в I и II сечениях.

Как известно для вращательного движения

$$\frac{dh}{dr} = \frac{g_\varphi^2}{gr}, \quad (4)$$

где, g_φ - тангенциальная скорость;

r - произвольный радиус.

Подставляя значения g_φ в это уравнение и проведя интегрирование его можно получить потери напора по данному сечению (приращение пьезометрического напора). Определим потери напора отдельно для нисходящего и восходящего потоков:

1а) для нисходящего потока формулу (3) перепишем в другом виде

$$\rho \bar{g}_{z_{2H}}^2 \omega_{2H} - \rho \bar{g}_{z_{1H}}^2 \omega_{1H} = p_{1H} \omega_{1H} - p_{2H} \omega_{2H}, \quad (5)$$

где, индексы 1H и 2H-относятся к нисходящему потоку в I и II сечениях:

если предположить, что давление есть сумма пьезометрического и центробежного его составляющих, то

$$p_{1H} = \rho g h_{1H} + \rho g h_{1цH} \quad (6)$$

$$\text{и } p_{2H} = \rho g h_{1H} - \rho g dz + \rho g h_{2цH}. \quad (6')$$

Для определения $h_{1цH}$ интегрируем уравнение (4) при известном значении $g_{\varphi H}$ [1].

$$g_{\varphi H} = g_{\varphi cm} \left(\frac{r_{ц}}{r} \right)^n$$

В пределах изменения dr от r_w до $r_{ц}$ высота dh изменяется от h_{1H} до $h_{1ц}$, поэтому из уравнения (4)

$$h_{1H} - h_{1цH} = \int_{r_w}^{r_{ц}} \frac{g_{\varphi cm}^2}{gr} \left(\frac{r_{ц}}{r} \right)^{2n} dr = \frac{g_{\varphi cm}^2}{2gn} \left(\frac{r_{ц}^{2n}}{r_w^{2n}} - 1 \right), \quad (7)$$

$$\text{или } h_{1цH} = h_{1H} - \frac{g_{\varphi cm}^2}{2gn} \left(\frac{r_{ц}^{2n}}{r_w^{2n}} - 1 \right).$$

По другому

$$h_{1цH} = h_{1H} + \frac{g_{\varphi cm}^2}{2gn} - \frac{g_{\varphi cm}^2}{2gn} \frac{r_{ц}^{2n}}{r_w^{2n}},$$

где, $r_{ц}$ -радиус циклона в данном сечении;

$g_{\varphi cm}$ -пристенная тангенциальная скорость;

r_w - радиус нулевых осевых скоростей.

Зная, что [1]

$$g_{\varphi cm} = \delta g_{Z_{nec}} \left(1 - \frac{z}{T} \right)^m; \quad (8)$$

$$r_{ц} = kz + r_{nec};$$

$$\text{и } r_{w1} = k_1 z' + r_{ce} = k_1 (z - a) + r_{ce}$$

где, $K = tg \alpha; K_1 = tg \beta$

формулы (6) и (6') при $n \cong m \cong 0.5$ перепишем в виде

$$p_{1H} = \rho g \left[h_H + 2\delta_1^2 \frac{g_{nec}^2}{2g} \left(1 - \frac{z}{T} \right) \left(\frac{kz + r_{nec}}{k_1 z^1 + r_{cs}} - 1 \right) \right]; \quad (9)$$

$$p_{2H} = \rho g \left[h_H - dh_H + 2\delta_1^2 \frac{g_{nec}^2}{2g} \left(1 - \frac{z + dz}{T} \right) \left(\frac{k(z + dz) + r_{nec}}{k_1(z + dz)^1 + r_{cs}} - 1 \right) \right]. \quad (9')$$

Площади поперечных сечений внешнего (периферийного, наружного) потока определяется из равенства:

$$\omega_{1H} = \Pi(r_{u_1}^2 - r_{w_1}^2); \quad (10)$$

$$\omega_{2H} = \Pi(r_{u_2}^2 - r_{w_2}^2). \quad (10')$$

Средние значения осевых скоростей в этих сечениях будут [1]:

$$\bar{g}_{Z_{1H}}^2 = \bar{g}_{nec}^2 \left(1 - \frac{z}{T} \right); \quad (11)$$

$$\bar{g}_{Z_{2H}}^2 = \bar{g}_{nec}^2 \left(1 - \frac{z + dz}{T} \right). \quad (11')$$

Подставляя значения $p_1, p_2, \bar{g}_{Z_{2H}}, \omega_{1H}, \omega_{2H}$ в формулу (5) и проведя ряд преобразований при $(\omega_{1H} \cong \omega_{2H} = \omega_H)$ $p_{1H} - p_{2H} \cong \rho g dh_H$ можно написать:

$$dh_H = \frac{g_{nec}^2}{g} \frac{dz}{T},$$

Откуда после интегрирования получим:

$$h_H = \frac{2z}{T_k} \frac{g_{nec}^2}{2g} + C.$$

При $Z=0$, потери напора $h_{wH} = 0$, поэтому постоянная интегрирования $C=0$, значит

$$h_H = \frac{2z}{T_k} \frac{g_{nec}^2}{2g} = \zeta_{nec} \frac{g_{nec}^2}{2g}, \quad (12)$$

где, $\zeta_{nec} = \frac{2z}{T_k}$.

1б) для восходящего потока формула (3) приобретает вид

$$p_{1\epsilon} \omega_{1\epsilon} - p_{2\epsilon} \omega_{2\epsilon} = \rho g_{Z_{2\epsilon}}^2 \omega_{2\epsilon} - \rho g_{Z_{1\epsilon}}^2 \omega_{1\epsilon} \quad (13)$$

где, $p_{1\epsilon} = \rho g h_\epsilon + \rho g h_{1\epsilon}$

$h_{1\epsilon}$ определяется интегрированием формулы (4) при [1]

$$g_\varphi = g_{\varphi_w} \left(\frac{r_w}{r_x} \right)^n \quad (14)$$

$$h_{1\epsilon} = \int_{r_{cs}}^{r_w} \frac{g_{\varphi_w}^2 \left(\frac{r_w}{r_x} \right)^{2n}}{g r_x} dr_x = \frac{1}{n} \left(\frac{r_w^{2n}}{r_{cs}^{2n}} - 1 \right) \frac{g_{\varphi_w}^2}{2g} + h_{cs}$$

значит

$$p_{1\epsilon} = \rho g \left\{ h_\epsilon + \frac{g_{\varphi_w}^2}{2gn} \left(\frac{r_w^{2n}}{r_{cs}^{2n}} - 1 \right) \right\} + p_{cs}, \quad (15)$$

где, g_{φ_w} - тангенциальная скорость частиц жидкости на линии нулевых осевых скоростей [1],

$$g_{\varphi_w} = A g_{ex} \left(\frac{R_u}{r_{cs} + kz^1} \right)^{\frac{1}{2}};$$

$$p_{1\sigma} = \rho g \left\{ h_\sigma + \frac{1}{2gn} A^2 g_{\text{ex}}^2 \frac{R_u}{r_{c\sigma} + kz_\sigma} \left(\frac{r_{c\sigma} + k_1 z'}{r_{c\sigma}} - 1 \right) \right\}; \quad (16)$$

$$p_{2\sigma} = \rho g \left\{ h_\sigma - dh_\sigma + \frac{1}{2gn} A^2 g_{\text{ex}}^2 \frac{R_u}{r_{c\sigma} + k(z'_\sigma + dz'_\sigma)} \left[\frac{r_{c\sigma} + k(z'_\sigma + dz'_\sigma)}{r_{c\sigma}} - 1 \right] \right\} \quad (16')$$

По аналогии с внешним потоком и площади внутреннего (приосевого) потока в сечениях I и II соответственно равны:

$$\omega_{1\sigma} = \Pi(r_{w_1}^2 - r_{c\sigma_1}^2);$$

$$\omega_{2\sigma} = \Pi(r_{w_2}^2 - r_{c\sigma_2}^2).$$

Средние значения осевых скоростей внутреннего потока в сечениях I и II равны [1].

$$\bar{g}_{Z_{1\sigma}}^2 = \bar{g}_{Z_{cl}}^2 \left(\frac{z'}{h_\sigma} \right)^{2n};$$

$$\bar{g}_{Z_{2\sigma}}^2 = \bar{g}_{Z_{cl}}^2 \left(\frac{z' + dz'}{h_\sigma} \right)^{2n}.$$

Подставляя значения $p_{1\sigma}, p_{2\sigma}, \omega_{1\sigma}, \bar{g}_{Z_{1\sigma}}, \bar{g}_{Z_{2\sigma}}$ в (13) и как ранее полагая $k_1 \cong k, (\omega_{1\sigma} \cong \omega_{2\sigma}), n = 0.5, p_{1\sigma} - p_{2\sigma} = \rho g dh_\sigma$ находим:

$$dh_\sigma = \frac{\rho}{\rho g} g_{cl}^2 \frac{dz'}{h_\sigma}.$$

Откуда после интегрирования получим

$$h_{w\sigma} = \frac{2z'}{h_\sigma} \frac{g_{cl}^2}{2g} + C.$$

При $Z \rightarrow 0$ потери напора $h_{w\sigma} \Rightarrow 0$, следовательно постоянная интегрирования $C=0$.

Значит

$$h_{w\sigma} = \frac{2z'}{h_\sigma} \frac{g_{cl}^2}{2g} = \zeta_{w\sigma} \frac{g_{cl}^2}{2g}, \quad (17)$$

где, $\zeta_{w\sigma} = 2 \frac{z'}{h_\sigma}$

Общие потери напора на смешение потока в конической части гидроциклона

$$h_{w.c.} = h_{wH} + h_{w\sigma} = \frac{2z'}{T} \frac{g_{nec}^2}{2g} + \frac{2z'}{h_\sigma} \frac{g_{cl}^2}{2g}$$

$$\text{или } h_{w.c.} = \zeta_{nec} \frac{g_{nec}^2}{2g} + \zeta_{w\sigma} \frac{g_{cl}^2}{2g}.$$

Поскольку интенсивное смешение происходит именно в конической части, где $z \rightarrow H_k, z \rightarrow h_\sigma$, то окончательно имеем

$$h_{w.c.} = 2 \frac{g_{Zne}^2}{2g} + 2 \frac{\bar{g}_{Zcc}^2}{2g} = 2 \left(\frac{g_{Zne}^2 + g_{Zcc}^2}{2g} \right) \quad (18)$$

По опытным данным [5, 6] сделан расчет потери напора на смешение потока в конической части гидроциклона по формуле

$$h_{w.c.} = 2 \left(\frac{g_{Zne}^2 + g_{Zcc}^2}{2g} \right) = \zeta_{w.c.} \left(\frac{g_{Zne}^2 + g_{Zcc}^2}{2g} \right), \text{ где } \zeta_{w.c.} = 2,$$

построен график зависимости $h_{w.c.} = f \left(\frac{g_{Zne}^2 + g_{Zcc}^2}{2g} \right)$

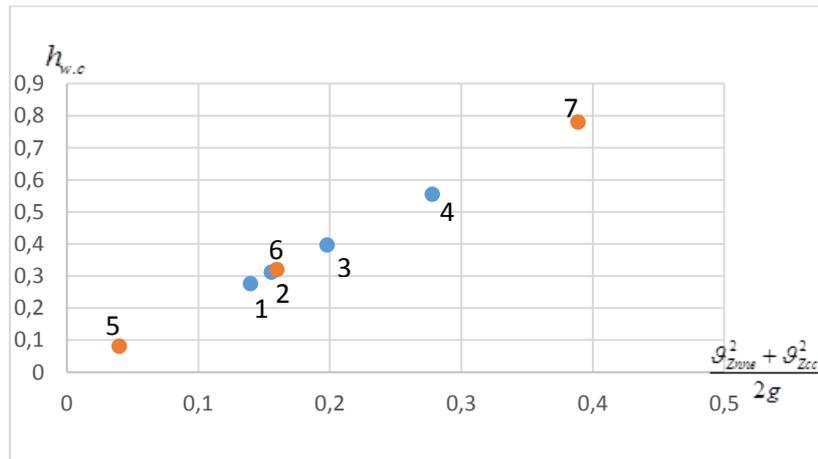


Рис. 2. График зависимости $h_{w.c.} = f\left(\frac{g^2_{Znne} + g^2_{Zcc}}{2g}\right)$; 1,2,3,4-по опытным данным А. Абдураманова [5]; 5,6,7-по опытным данным А.И. Жангарина [6]

Литература

1. Абдураманов А. Гидравлика гидроциклонов и гидроциклонных насосных установок. Тараз: «Сенім», 2011. – 296 с.
2. Абдураманов А.А., Жабагиева К. Р. Общие потери напора в гидроциклоне. Тезисы докладов 2-ой Международной научной конференции "Проблемы современной механики", Алматы, Казахстан, 2006, с. 1.
3. Абдураманов А.А., Жабагиева К.Р. Потери напора в конфузорах и диффузорах. Материалы международной научно-практической конференции "Инновационный менеджмент и технологии в эпоху глобализации", Panadura, Sri Lanka, 2015, с.
4. Абдураманов А.А., Касабеков М.И. К расчету камер смешения прямооточных и вихревых гидроэлеваторов. // Механика и моделирование процессов технологии №1, Тараз, 2001, 87-92 с.
5. Абдураманов А.А. Основы гидравлики гидроциклонных насосных установок. Дис..... док. техн. наук. – М., 1987, 37 с.
6. Жангарин А.И. Режим работы низконапорных гидроциклонов. Дис..... канд. техн. наук. – Алматы, 1962, 163 с.