

**В.И. Александров, С.Ю. Авксентьев,
П.Н. Махараткин**

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ШАХТНОГО ВОДООТЛИВА

Системы шахтного водоотлива являются неотъемлемым и наиболее энергоемким технологическим процессом при добыче полезного ископаемого, обеспечивающим безопасность и возможность работоспособности всей горной выработки. На многих обводненных шахтах с коэффициентом водообильности больше единицы количество перекачиваемой шахтной воды превышает количество добываемого полезного ископаемого. Одной из причин высокой энергоемкости шахтного водоотлива является загрязненность шахтной воды механическими примесями в виде угольной и породной просыпи, содержание которой достигает 10–20% по объему перекачиваемой жидкости. Повышение энергетической эффективности систем шахтного водоотлива непосредственно связано с необходимостью применения на добычных горизонтах и участках гидромеханизированных устройств для удаления из шахтной воды твердой составляющей. Такая технология шахтного водоотлива позволяет уменьшить величину потребного напора насосных агрегатов, способствует повышению надежности эксплуатации оборудования и трубопроводов и их рабочего ресурса. Существующие методы очистки шахтной воды в системах главного водоотлива не позволяют достичь необходимого качества шахтной воды. Водосборники и отстойники, устанавливаемые в системах главного водоотлива, очищают шахтную воду лишь от самых крупных частиц, при этом требуют периодической очистки от заиливания. Применяемые методики расчета систем шахтного водоотлива в основном не учитывают присутствия в шахтной воде механических частиц. В связи с этим, шахтные насосы работают на повышенных напорах. Ключевые слова: шахтная вода, концентрация твердых частиц, осветление, потери напора, пластинчатый густитель.

Анализ состояния водоотлива на подземных шахтах и рудниках показал, что напоры шахтных насосов завышены. Этой проблеме уделялось значительное внимание во многих исследованиях и основоположниками шахтного водоотлива (В.М. Попов, В.Г. Гейер и др.). Причиной является значительное содержание твердых частиц в перекачиваемой шахтной воде. Устройства для осаждения твердых частиц (в основном отстой-

ники) применяются, как правило, в системах главного водоотлива, тогда как основными источниками загрязненной шахтной воды являются участковые системы водоотлива, на которых не предусмотрены какие-либо очистительные устройства. Энергетическую эффективность [кВт · ч/(т · м)] систем шахтного водоотлива можно определить по величине удельной энергоёмкости, по формуле:

$$E = \frac{N_{\Sigma}}{G_{n.u} H_z} = \frac{Q_{ш.в} P}{G_{n.u} H_z} = K_B \rho_{ш.в} g \frac{H_n}{H_z} = K_B \rho_{ш.в} g i_h \frac{L_{np}}{H_z}, \quad (1)$$

где E – удельная энергоёмкость; $G_{п.и}$ – производительность шахты (участка) по горной массе, т/ч; H_r – глубина горизонта шахты, м; P – давление насосных установок, Па; $Q_{ш.в}$ – расход шахтной воды, м³/ч; K_B – коэффициент водообильности, м³/т; $\rho_{ш.в}$ – плотность шахтной воды, кг/м³; i_h – удельные потери напора в трубопроводе, м/м вод. ст; L_{np} – приведенная длина трубопроводов, м.

Из формулы (1) следует, что действенным средством снижения удельной энергоёмкости систем шахтного водоотлива является уменьшение удельных потерь напора i_h при трубопроводном транспортировании шахтной воды, содержащей значительное количество твердых частиц. Применяемые расчетные методики не учитывают присутствия твердых частиц в перекачиваемой шахтной воде, а в расчетные формулы вводится параметр относительной плотности (1,02), что приводит к увеличению потерь напора лишь на 2% в сравнении с перекачкой чистой жидкости. Фактические же потери напора намного пре-

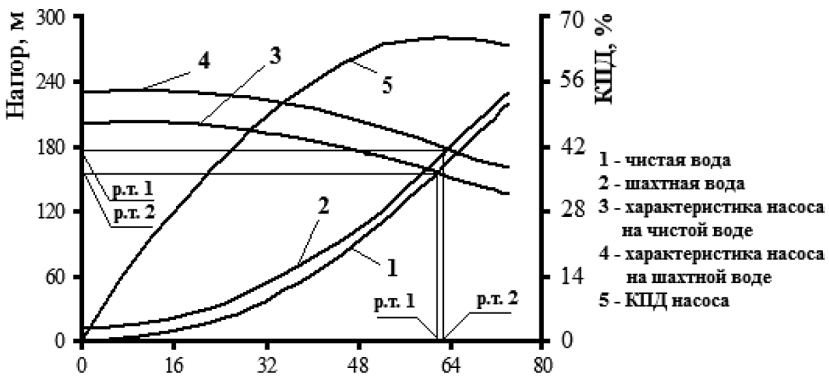


Рис. 1. Расходно-напорные характеристики насоса при работе на шахтной и чистой воде

вышают расчетные значения. На рис. 1 приведены расчетные и фактические значения напорных характеристик насоса и трубопровода

Взвешенные в шахтной воде твердые частицы изменяют ее структуру и в зависимости от концентрации в той или иной степени проявляются реологические свойства, определяемые начальным напряжением сдвига, эффективной вязкостью, скоростью сдвига и другими реологическими параметрами. Для снижения влияния реологических параметров на величину удельных потерь напора необходимо производить очистку шахтной воды непосредственно в условиях участковых систем водоотлива.

Энергетические характеристики шахтных центробежных насосов определяются кинематикой потока в проходных каналах рабочего колеса. Наличие твердой фазы в перекачиваемой жидкости влияет на величину теоретического напора насоса и приводит к увеличению потребляемой мощности в соответствии с формулами

$$H_{m.шв} = H_{0m} \left[1 - c_p \left(1 - \frac{u_{m\sigma_2}}{u_{0_2}} \right) \right], \quad (2)$$

$$N_{ш.г} = H_{шв} \rho_{шв} g Q_{шв}, \quad (3)$$

где $H_{т.шв}$, $N_{шв}$ — теоретический напор и мощность насоса при работе на шахтной воде; $H_{0т}$ — теоретический напор на чистой воде; c_p — массовая концентрация твердых частиц в шахтной воде; $u_{тв2}$, u_{0_2} — касательные составляющие скорости выхода потока шахтной воды с лопаток рабочего колеса; $\rho_{шв}$, $Q_{шв}$ — плотность и расход шахтной воды; g — ускорение силы тяжести.

Мощность насоса и развиваемый напор расходуются на преодоление сопротивлений движению шахтной воды в нагнетательном трубопроводе. Общий запас энергии определяется балансовым уравнением

$$E_3 = D + T, \quad (4)$$

где E_3 — общий запас энергии потока шахтной воды; D — часть энергии, расходуемая в некоторой точке объема; T — часть энергии, расходуемая на взвешивание твердых части в пульсационном потоке.

Теоретический анализ формулы (4) приводит к обобщенной формуле потерь напора при течении шахтной воды

$$i_{шв} = i_0 + \Delta i, \quad (5)$$

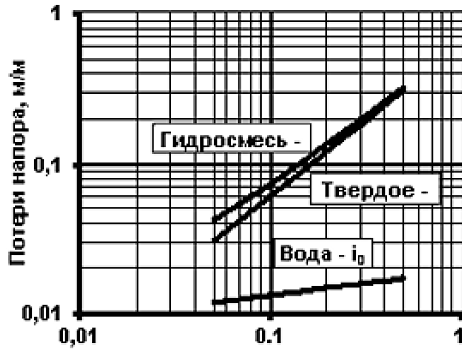


Рис. 2. Графики изменения потерь напора для гидросмеси, твердого материала и чистой воды при изменении скорости и концентрации твердых частиц

где $i_{шв}$, i_0 — удельные потери напора на перемещение по трубопроводу шахтной и чистой воды, соответственно;

$\Delta i = \delta D - i_{шв} \frac{\rho_{шв}}{\rho_{мс}} c_p$ — дополнительные потери напора, расходуемые на взвешивание твердых частиц в потоке шахтной воды.

На рис. 2 приведен график составляющих уравнения (5), из которого следует, что потери энергии складываются из двух составляющих: на движение чистой жидкости и движение твердой фазы потока.

Для описания течения шахтной воды с мелкими частицами исходили из модели течения вязкопластичной жидкости, модели Шведова-Бингама, устанавливающей зависимость напряжений сдвига от скорости сдвига

$$\tau = \tau_0 + \eta_{эф} \frac{dV}{dr}, \quad (6)$$

где τ , τ_0 — напряжение сдвига на стенке трубопровода и начальное (статическое), Па; $\eta_{эф}$ — коэффициент эффективной (динамической) вязкости шахтной воды, Па · с; dV/dr — градиент скорости (скорость сдвига) по сечению трубопровода диаметром $D = 2r$.

Потери напора зависят от концентрации твердых частиц и от их крупности. Мелкие частицы твердого материала свободно взвешены в потоке шахтной, а дополнительные потери напора $\Delta i \rightarrow 0$. В этом случае шахтную воду можно рассматривать, как однородную (гомогенную) жидкость с плотностью несколько большей, чем плотность чистой воды.

Решение уравнения (6) относительно удельных потерь напора при течении шахтной воды приводит к выражению

$$i_{шв} = \frac{64}{(1 - \sigma) \text{Re}} \frac{v_{cp}^2}{2gD}, \quad (7)$$

где $\sigma = \tau_0/\tau$ – относительное напряжение; $Re = \frac{v_{cp} D \rho_{шв}}{\eta_{эф}}$ – число Рейнольдса; v_{cp} – средняя скорость потока шахтной воды в трубопроводе диаметром D .

Величина $\frac{64}{(1 - \sigma) \text{Re}} = \lambda_{\sigma}$ – коэффициент гидравлических сопротивлений. Полученная формула (7) отличается от классической формулы потерь напора Дарси-Вейсбаха наличием параметра σ , учитывающим реологические свойства шахтной воды. Формула (7) получена из условия ламинарного режима течения.

Особенностью полученных расчетных формул является то, что все основные параметры являются функцией концентрации твердых частиц и следовательно потери напора при течении шахтной воды определяются функцией $i_{шв} = f(c_{об})$, где $c_{об}$ – объемная концентрация твердых частиц в шахтной воде. Для установления вида функций были выполнены экспериментальные исследования.

Математическая модель сводится к следующим основным уравнениям:

- потери напора:

$$i_{шв} = \frac{\pi \text{Re} [\mu_{шв} \exp(9,9333c_{об})]^4 c_{об}^2 \rho}{0,27g [c_{об} (\rho_{шв} - \rho_0) + \rho_0]^3} \times \left\{ c_{об}^{2,57} \cdot \exp 4,89 + \frac{\pi^3 \text{Re}^4 [\mu_{шв} \exp(9,9333c_{об})]^4 c_{об} \rho}{2Q_{шв} [c_{об} (\rho_{шв} - \rho_w) + \rho_0]^3} \right\}, \quad (8)$$

- относительное напряжение

$$\sigma = \frac{c_{об}^{2,57} \exp 4,89}{c_{об}^{2,57} \exp 4,89 + \frac{0,5\pi \text{Re}^3 [\mu_o \exp(9,9333c_{об})]^4}{Q_{шв}^2 [c_{об}^2 (\rho_{шв} - \rho_0) + \rho_0]^3}}, \quad (9)$$

- диаметр трубопровода

$$D = \frac{4Q_{шв} [c_{об} (\rho_{мс} - \rho_0) + \rho_0]}{\pi Re \mu_o \exp(9,933c_{об})}, \quad (10)$$

- средняя скорость потока шахтной воды в трубопроводе

$$v_{cp} = \frac{\pi Re^2 [\exp(9,933c_{об})]^2}{4Q_{шв} [c_{об} (\rho_{мс} - \rho_0) + \rho_0]^2}. \quad (11)$$

где ρ_0 – плотность чистой воды; $\mu_o = 1,017 \cdot 10^{-3}$ – динамический коэффициент вязкости чистой воды при температуре 17°C , $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Произведем проверку полученных расчетных формул на примере участкового водоотлива. Рассчитаем удельные потери напора, исходя из следующих данных:

- объемный расход системы шахтного водоотлива – $Q_{шв} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$.

- содержание твердых частиц по объему шахтной воды – $c_{об} = 5\% = 0,05$.

Определить удельные потери напора, т.е. потери энергии на единицу длины трубопровода.

Расчет

1. Определим эффективную вязкость перекачиваемой шахтной воды при заданной объемной концентрации $c_{об} = 0,05$:

$$\eta_{эф} = \mu_o e^{9,933c_{об}} = 1,017 \cdot 10^{-3} \cdot 2,72^{9,933 \cdot 0,05} = 0,00167 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

2. Плотность шахтной воды

$$\rho_h = c_{об} (\rho_{мс} - \rho_0) + \rho_0 = 0,05(2400 - 1000) + 1000 = 1070 \text{ кг/м}^3,$$

здесь $\rho_{ТВ} = 2400 \text{ кг/м}^3$ – плотность твердых частиц в шахтной воде; $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность чистой воды.

3. Начальное напряжение сдвига

$$\tau_0 = c_{об}^{2,57} \cdot e^{4,89} = 2,72^{4,89} \cdot 0,05^{2,57} = 0,0604 \text{ Па}.$$

4. Зададимся диаметром трубопровода, или числом Рейнольдса. Течение происходит, как правило, в переходном режиме – от ламинарного до турбулентного, так как, объемная концентрация незначительна и, соответственно, вязкость и структурные свойства смеси проявляются также незначительно. Переходная область трения весьма обширна (от 10 000 до 500 000). Зададимся средней величиной числа Рейнольдса в этой переходной области, например $Re = 250\,000$.

5. Рассчитаем градиент скорости (скорость сдвига) при заданном числе Рейнольдса:

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= \frac{dV}{dr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_{эф} \text{Re}}{\rho_{шв}} \right)^3 \left(\frac{\pi}{Q} \right)^2 \Rightarrow \dot{\gamma} = \text{с}^{-1}. \\ &= 0,5 \left(\frac{0,0017 \cdot 250000}{1070} \right)^3 \left(\frac{3,14}{0,056} \right)^2 = 98,5\end{aligned}$$

6. Рассчитаем среднюю скорость потока шахтной воды:

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{\text{Re} \eta_{эф} \dot{\gamma}}{8\rho_h}} = \sqrt{\frac{250000 \cdot 0,0017 \cdot 98,5}{8 \cdot 1070}} = 2,2 \text{ м/с.}$$

7. Рассчитаем диаметр трубопровода:

$$D = \sqrt{\frac{8 \text{Re} \eta_{эф}}{\dot{\gamma} \rho_h}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 250000 \cdot 0,0017}{98,5 \cdot 1070}} = 0,179 \text{ м.}$$

8. Рассчитаем относительное напряжение сдвига :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{\tau_o D}{\tau_o D + 8\eta_{эф} v_m} = \frac{0,0604 \cdot 0,179}{0,0108 \cdot 0,179 + 8 \cdot 0,0017 \cdot 2,2} = \\ &= \frac{0,0108}{0,04} = 0,265\end{aligned}$$

или по формуле:

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sigma} - 1 &= \frac{\eta_{эф}}{\tau_o} \dot{\gamma} \Rightarrow \frac{1}{\sigma} = \frac{\eta_{эф}}{\tau_o} \dot{\gamma} + 1 = \frac{0,0017}{0,0604} \cdot 98,5 + 1 = \\ &= 1,051 \Rightarrow \sigma = 1,051^{-1} = 0,265\end{aligned}$$

т.е. результаты совпадают, следовательно, $\sigma = \tau_o/\tau$ рассчитано правильно.

9. Рассчитаем удельные потери напора:

$$i_{шв} = \lambda_{\sigma} \frac{v_{cp}^2}{2gD\rho}$$

Здесь $\lambda_{\sigma} = \frac{64}{(1-\sigma)\text{Re} p}$ — эта формула справедлива для ламинарного режима движения шахтной воды. Принятый режим —

переходный и ($Re = 250\ 000$), поэтому была введена поправка на пластичность шахтной воды и отклонение действительного режима потока от ламинарного. Эта поправка в диапазоне чисел Рейнольдса от $(2-5) \cdot 10^6$ рассчитывается по формуле

$$p = p_0 + k \cdot (Re - Re_0) = 4 + 5,6 \cdot (Re \cdot 10^{-6} - 0,21), \quad (12)$$

где $k = 5,6 \cdot 10^6$ – угловой коэффициент, $Re = 210\ 000$ – предельное значение числа Рейнольдса в переходной зоне трения, Re – число Рейнольдса потока смеси.

Приведенная формула справедлива в диапазоне чисел Рейнольдса от $Re = 210\ 000$ до $Re = 500\ 000$.

Для рассматриваемого случая поправка на отклонение режима течения от ламинарного будет равна

$$p = 4 + 5,6 \cdot (0,25 - 0,21) = 4,23$$

$$\lambda_\sigma = \frac{64}{(1 - \sigma) Re \cdot p} = \frac{64}{(1 - 0,265) \cdot 2000 \cdot 4,23} = 0,018.$$

Сравним значения λ , рассчитанные по другим формулам, например, по формуле Блазиуса (режим течения «гидравлически гладких труб»):

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = 0,014.$$

По эмпирической формуле Шевелева наиболее широко применяемой при расчете шахтного водоотлива, благодаря своей простоте, получим

$$\lambda = \frac{0,021}{d_p^{0,3}} = \frac{0,021}{0,179^{0,3}} = 0,035.$$

Видно, что эта формула приводит к завышенному значению коэффициента сопротивлений.

Принимаем значение $\lambda_\sigma = 0,018$.

Удельные потери напора для рассматриваемого случая, будут равны:

$$i_{\text{шс}} = \lambda_\sigma \frac{v_{\text{ср}}^2}{2gD} = 0,018 \frac{2,2^2}{2g \cdot 0,179} = 0,025 \text{ м вод. ст./м.}$$

Потребный напор системы:

$$H_{\text{сист}} = H_z + i_{\text{шс}} L_{\text{нр}} \text{ м,}$$

Далее можно сравнить расчеты по существующей методике и по разработанной и предлагаемой методике. При этом учтем, что содержание твердых частиц в данном расчете принято минимальным. Этим предполагается, что в системе участкового водоотлива будет применен сгуститель-осветлитель, который позволит снизить концентрацию твердых частиц от 15–20% до принятых в расчете 5%.

Этим предполагается, что в системе участкового водоотлива используется сгуститель-осветлитель и поэтому содержание твердых частиц сократилось с, например, 15% до расчетных 5%. Эти 15% твердого в шахтной воде оказывают влияние на ее плотность, которая в этом случае будет равна

$$\rho_h = 0,15(2400 - 1000) + 1000 = 1210 \text{ кг/м}^3.$$

Удельные потери напора будут равны (по существующим и применяемым методикам):

$$i_{шв}^{сущ} = \lambda \frac{v_{ср}^2}{2gD} \frac{\rho_h}{\rho_w} = 0,035 \frac{2,2^2}{2g \cdot 0,179} \frac{1,21}{1,0} = 0,058 \text{ м вод. ст./м},$$

т.е. удельные потери напора сокращаются на 0,033 м вод. ст./м., что составляет 56%,

Эти сокращенные удельные потери напора определяют технико-экономический эффект использования разработанных предложений.

Обратим внимание, что скорость и диаметр трубопровода в разрабатываемой методике определялись из реологического уравнения, а не выбирались из опыта, как это делается в существующих методах.

Здесь, в приведенном предварительном расчете, не ставилась задача выбора насосного оборудования и определения его эффективности, что будет показано ниже. В общем балансе затрат энергии на шахтный водоотлив, основная энергия расходуется на преодоление линейных сопротивлений по длине трубопроводов. Остальные составляющие потерь напора являются общими, как в существующих методах, так и в разработанных.

Для снижения влияния содержания твердых частиц в шахтной воде и доведения концентрации до минимальной величины (3–5%) необходимо применить предварительное осветление шахтной воды от взвешенных механических примесей. В работе предложено использовать сгуститель пластинчатого типа, который устанавливается на рабочем горизонте горной выработки, рис. 3.

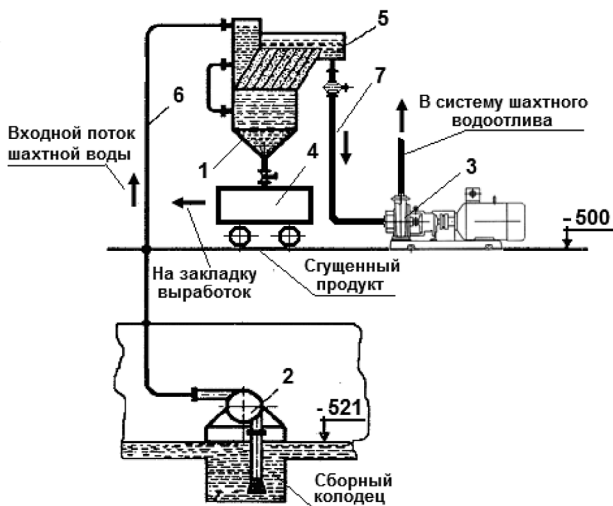


Рис. 3. Гидромеханизированный комплекс участкового шахтного водоотлива: 1 – пластинчатый сгуститель-осветлитель; 2 – перистальтический (шланговый насос); 3 – шахтный насос типа ЦНС; 4 – шахтная вагонетка для сбора сгущенного продукта; 5 – сборный лоток очищенной шахтной воды; 6 – загрузочный трубопровод (шланг); 7 – всасывающий трубопровод

Приведем численный расчет сгустителя, используя следующие исходные данные:

- часовой водоприток – $Q_{\text{вп}} = 200 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,055 \text{ м}^3/\text{с}$;
- объемное содержание твердых частиц в часовом водопритоке – $c_{\text{об}} = 15\% = 0,15$;
- плотность исходной шахтной воды

$$\rho_{\text{ни}} = c_{\text{об}} (\rho_{\text{тв}} - \rho_0) + \rho_0 = 0,15(2400 - 1000) + 1000 = 1210 \text{ кг/м}^3,$$

где $\rho_{\text{тв}} = 2400 \text{ кг/м}^3$ – фактическая плотность твердых частиц; $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность чистой воды.

Зададимся плотностью сгущенной смеси в нижнем продукте сгустителя-осветлителя $c_{\text{об.п}} = 0,6$, т.е. предполагаем, что 60% объема смеси в сгущенном продукте – твердые частицы, а 40% – чистая вода.

В соответствии с исходными данными из сборного колодца (рис. 3) с шахтной водой в сгуститель-осветлитель поступает:

- твердого

$$q_{\text{тв.об}} = Q_{\text{вп}} c_{\text{об}} = 200 \cdot 0,15 = 30 \text{ м}^3/\text{ч};$$

- чистой воды

$$q_{чв} = Q_{en} (1 - c_{об}) = 200(1 - 0,15) = 170 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Зададимся коэффициентом извлечения твердого материала в сгущенный продукт: $k_u = 0,8$. Тогда в сгущенный продукт будет поступать:

- твердого

$$q_{мс.сз} = q_{мс.об} \cdot k_u = 30 \cdot 0,8 = 24 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Общий объем твердого материала (твердых частиц), поступающего на вход сгустителя осветлителя из сборного колодца равен

$$Q_{сз} = \frac{q_{мс.сз}}{c_{об.п}} = \frac{24}{0,6} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Выход твердых частиц с осветленной шахтной водой (в верхнем продукте из сборного лотка)

$$q_{мс.ос} = q_{мс.об} - q_{мс.сз} = 30 - 24 = 6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Производительность сгустителя-осветлителя по очищенной шахтной воде (объем осветленной шахтной воды в верхнем продукте)

$$Q_{шв.ос} = Q_{en} - Q_{сз} = 200 - 40 = 160 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Объемное содержание твердых частиц в очищенной шахтной воде

$$c_{об.ос} = \frac{q_{мс.ос}}{Q_{шв.ос}} = \frac{6}{160} = 0,0375 \approx 0,04.$$

Геометрические размеры сгустителя-осветлителя

Средняя скорость потока в межпластинных каналах по формуле

$$v_c = \sqrt[3]{\frac{1}{4} g \nu Fr Re} = \\ = \sqrt[3]{\frac{1}{4} g \cdot 1,017 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 400} = 0,008 \text{ м/с};$$

- общая площадь проходного сечения наклонных каналов

$$S = nS_c = nH_p b = \frac{Q_{шв.ос}}{v_c} = \frac{0,044}{0,008} = 5,5 \text{ м}^2;$$

- число каналов

$$n = \frac{S}{H_p b} = \frac{5,5}{0,05 \cdot 2,0} = 55;$$

- гидравлическая крупность твердых частиц (для $d_0 = 0,038$ мм)

$$\omega = \frac{2g \cdot (s-1) \cdot r^2}{9 \cdot \nu} = \frac{2g \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) \cdot (0,019 \cdot 10^{-3})^2}{9 \cdot 1,017 \cdot 10^{-6}} = \text{м/с.}$$

$$= 7,74 \cdot 10^{-4} \cdot (2,4 - 1) = 1,08 \cdot 10^{-4}$$

Принимаем, следующие геометрические размеры:

- длина участка канала с ламинарным течением – $L_p = 0,369$ м;
- общая длина каналов в соответствии с формулой

$$L = 2,2 \cdot L_p = 2,2 \cdot \frac{0,517}{\rho_s - 1} = \frac{1,137}{2,4 - 1} = 0,812 \text{ м;}$$

- угол наклона пластин $\alpha = 62^\circ$;
- площадь зеркала слива сгустителя по формуле

$$S_f = \frac{125 \cdot Q_{ув.ос}}{\sin 62} = 141,6 \cdot Q_{ув.ос} = 141,6 \cdot 0,044 = 6,2 \text{ м}^2;$$

- высота блока пластин (наклонного модуля) по формуле

$$H_{sm} = \frac{1,137 \cdot \sin 62}{\rho_{мс} - 1} = \frac{1,04}{2,4 - 1} = 0,742 \text{ м;}$$

- объем бункера-накопителя при $k_u = 0,8$; $t_e = 8$ мин и объемной концентрации $c_{об} = 0,15$

$$W_t = \frac{Q_{ув} \cdot c_{об}}{c_{об,p}} \cdot k_u \cdot t_e = \frac{0,055 \cdot 0,15}{0,6} \cdot 0,8 \cdot 480 = 5,3 \text{ м}^3;$$

- высота бункера-накопителя

$$h_t = 9,66 \frac{c_{об}}{c_{об,o}} = 9,66 \frac{0,15}{0,6} = 2,4 \text{ м;}$$

- общая высота сгустителя

$$H_{th} = \left(3,01 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{мс} - \rho_0} + 9,66 \frac{c_{об}}{c_{об,p}} \right) = 2,1 + 2,4 = 4,5 \text{ м.}$$

Для подачи шахтной воды из сборного колодца на вход сгустителя-осветлителя в системе предлагается использовать

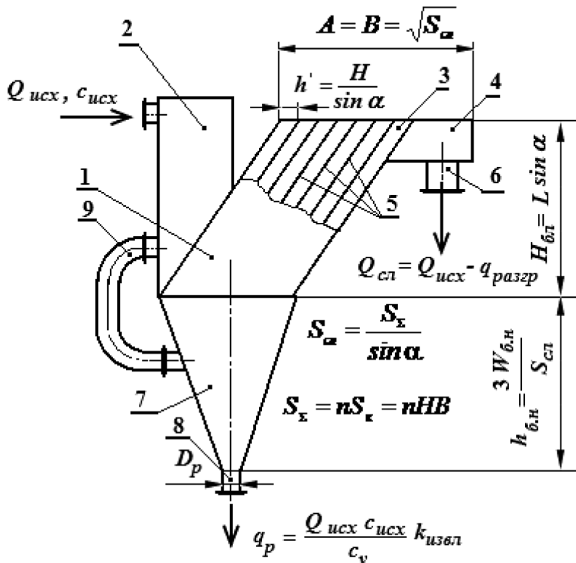


Рис. 4. Геометрические параметры пластинчатого сгустителя: 1 – наклонный блок пластин; 2 – входная уравнительная емкость; 3 – седиментационный канал; 4 – сливной лоток; 5 – наклонные пластины; 6 – сливной патрубок; 7 – бункер-накопитель; 8 – разгрузочный патрубок; 9 – загрузочный трубопровод

перистальтический шланговый насос с производительностью (для данного примера) 200 м³/ч. Перистальтические шланговые насосы самовсасывающие и в широком ассортименте выпускаются отечественной промышленностью.

Расчетная схема пластинчатого сгустителя приведена на рис. 4.

Выводы

1. Анализ состояния проблемы снижения энергопотребления шахтными водоотливными установками показал, что существует значительный резерв экономии электроэнергии за счет предварительной очистки шахтной воды от механических примесей непосредственно на добычных участках и горизонтах.

2. Существующие и применяемые методы расчета систем шахтного водоотлива в основном не учитывают присутствия в шахтной воде механических частиц. В связи с этим, шахтные насосы работают на повышенных напорах. Различные мероприятия по оптимизации работы шахтного водоотлива не приводят к существенному улучшению напорных характеристик и эксплуатационной надежности шахтных водоотливных систем.

Основным источником загрязненной шахтной воды являются участковые водоотливные установки, в работе которых не предусмотрены технологические операции по очистке шахтной воды.

3. Общий запас энергии потока шахтной воды, реализуемый шахтными насосными установками в системах водоотлива, включает две составляющие – энергию, расходуемую на транспортирование чистой жидкости, и энергию, затрачиваемую на взвешивание твердых частиц, что отражается на увеличении общего напора шахтных насосов, потребляемой мощности и снижает общий КПД системы.

4. Для выделения твердых частиц из потока шахтной воды наиболее рациональным является применение разработанного в работе гидромеханизированного комплекса для осветления шахтной воды от механических примесей, устанавливаемого в участковых системах водоотлива. Повышение эффекта осветления обеспечивается за счет увеличения площади осаждения твердой фазы, образованной наклонными пластинами.

5. Шахтная вода с взвешенными твердыми частицами с массовой концентрацией от 5 до 15% есть реологическая жидкость с выраженными вязкопластичными свойствами, течение которой по трубопроводам систем шахтного водоотлива описывается реологическим уравнением Шведова-Бингама, параметры которого являются функциями концентрации твердой фазы. Удельные потери напора при течении шахтной воды определяются уравнением Дарси-Вейсбаха, а коэффициент гидравлических сопротивлений зависит от числа Рейнольдса потока и относительного напряжения сдвига.

6. Разработанный способ повышения энергоэффективности, применяемого в системах шахтного водоотлива насосного оборудования, путем разделения фаз шахтной воды в гравитационных сгустителях осветлителях тонкослойного типа, и основные зависимости энергоемкости процесса перекачки шахтной воды от концентрации твердой фазы и реологических характеристик потока, рекомендуются для внесения в нормативную документацию регламентирующую технологию шахтного водоотлива на угольных шахтах и рудниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение в угольной промышленности: монография / Под ред. Б.А. Грядущего. – Донецк: НИИ ГМ, 2006. – 336 с.
2. Тимухин С. А., Белов С. В., Мамедов А. Ш. Оценка энергетической эффективности насосных установок горных предприятий // Вестник энергосбережения. – 2000 1(10). – С. 26–27.

3. *Alexandrov V. I.* Some Experimental Studies on Waste Copper Ore of High Concentration Slurry Transport / Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, Nr. 71, Wrocław, 1996.

4. *Шевелев Ф. А.* Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. — М.: Стройиздат, 1973. — 112 с.

5. *Александров В. И., Горелкин И. М.* Гидравлический расчет трубопровода системы шахтного водоотлива с учетом потерь напора на транспортирование твердых частиц // Горное оборудование и электромеханика. — 2013. — № 7. — С. 44–47.

6. *Александров В. И.* Изменение концентрации гидросмеси в сечении трубопроводов систем гидротранспорта / Записки горного института. Т. 2 (142). — СПб., 1995. — С. 83–86.

7. *Александров В. И.* Методика расчета и результаты опытно-промышленной эксплуатации пластинчатого сгустителя / Прикладные исследования гидротранспортирования продуктов обогащения минерального сырья. Междувед. сб. науч. тр. — Л.: Механобр. — С. 88–91.

8. *Абрамов А. П., Бизенков В. Н.* Стационарные машины. Расчет водоотливных установок горнодобывающих предприятий: Учеб. пособие. — Кемерово: КузГТУ, 2003. — 143 с.

9. *Долганов А. В.* Анализ электропотребления водоотливных установок подземных рудников медно-колчеданных месторождений Южного Урала // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 2. — С. 39–41.

10. *Заика В. Т., Разводов В. Г.* Комплексная оценка и повышение энергоэффективности работы шахтных водоотливных установок / Горная электромеханика и автоматика: Науч.-техн. сб. Вып. 64. — 2000. — С. 17–26. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Александров В. И.*¹ — доктор технических наук, профессор,

*Авксентьев С. Ю.*¹ — кандидат технических наук, доцент,

*Махараткин П. Н.*¹ — кандидат технических наук, доцент,

¹ Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
e-mail: victalex@mail.ru.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 2, pp. 253–268.

UDC 622.794

V.I. Aleksandrov, S.Yu. Avksent'ev, P.N. Makharatkin

ENERGY EFFICIENCY OF MINE WATER OUTFLOW

Systems of mine drainage is an integral and the most energy-intensive process in mining, providing security and opportunity to the whole performance of mining production. On many mines flooded by a factor watery greater than one amount pumped mine water exceeds the amount of extracted minerals. One reason for the high energy intensity of mine water outflow is polluted mine water of mechanical impurities in the form of coal and rock spillage, the

content of which is about 10–20% by volume of the pumped liquid. Improving the energy efficiency of mine water outflow is directly related to the need to apply to the mining horizons and areas hydromechanized devices for mine water removal from the solid component. This technology of mine water outflow to reduce the magnitude of required pressure pumping units, improves the reliability of operation of the equipment and pipelines, and their working life. Existing methods of purification of mine water into the main systems of water outflow do not achieve the required quality of mine water. The water collectors and sedimentation tanks installed in the main systems of water outflow, clean water shaft only by the largest particles and require periodic cleaning by silting. The applied methodology for calculating of mine systems of water outflow generally do not take into account the presence in water shaft of mechanical particles. In this connection the mine pumps operate at elevated pressure.

Key words: mine water, solids concentration, clarification, head losses, plate thickener.

AUTHORS

*Aleksandrov V.I.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
*Avksent'ev S. Yu.*¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
*Makharatkin P.N.*¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
¹ National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: victalex@mail.ru.

REFERENCES

1. Energosberezhenie v ugol'noy promyshlennosti: monografiya. Pod red. B.A. Gryadushchego (Energy saving in the coal industry: monograph. Gryadushchego B.A. (Ed.)), Donetsk, NII GM, 2006, 336 p.
2. Timukhin S. A., Belov S. V., Mamedov A. Sh. *Vestnik energosberezheniya*. 2000, 1(10), pp. 26–27.
3. Alexandrov V. I. Some Experimental Studies on Waste Copper Ore of High Concentration Slurry Transport. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wroclaskiej*, Nr. 71, Wrocław, 1996.
4. Shevelev F. A. *Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta stal'nykh, chugunnykh, asbesto-tsementnykh, plastmassovykh i steklyannykh vodoprovodnykh trub* (Hydraulic design charts for steel, cast-iron, cement-asbestos, plastic and glass water pipes), Moscow, Stroyizdat, 1973, 112 p.
5. Aleksandrov V. I., Gorelkin I. M. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2013, no 7, pp. 44–47.
6. Aleksandrov V. I. *Zapiski gornogo instituta*. T. 2 (142) (Mining Institute Proceedings, vol. 2 (142)), Saint-Petersburg, 1995, pp. 83–86.
7. Aleksandrov V. I. *Prikladnye issledovaniya gidrotransportirovaniya produktov obogashcheniya mineral'nogo syr'ya*. Mezhdoved. sb. nauch. tr. (Applied research into hydraulic transport of mineral processing products: Inter-branch collection of scientific papers), Leningrad, Mekhanobr., pp. 88–91.
8. Abramov A. P., Bizenkov V. N. *Statsionarnye mashiny. Raschet vodootlivnykh ustano-vok gornodobyvayushchikh predpriyatiy*: Uchebnoe posobie (Fixed machines. Design of pumping stations for mines: Educational aid), Kemerovo, KuzGTU, 2003, 143 p.
9. Dolganov A. V. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011, no 2, pp. 39–41.
10. Zaika V. T., Razvodov V. G. *Gornaya elektromekhanika i avtomatika: nauchno-tekh-nicheskiy sbornik*. Vyp. 64 (Mining electromechanics and automatics: Collection of scientific papers, issue 64), 2000, pp. 17–26.

