

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ ШАХТНЫХ ТУРБОМАШИН

Самуся В.И., д.т.н., проф., Национальный горный университет,  
Шевчук С.П., д.т.н., проф., Национальный технический  
университет «КПИ», Малеев В.Б., д.т.н., проф., Малеев А.В.,  
инж., Донецкий национальный технический университет

*Рассмотрены возможные схемы включения шахтных водоотливных, вентиляторных и компрессорных установок на совместную работу и указаны пути снижения расхода электроэнергии этими агрегатами*

*The possible charts of including of mine pumping, ventilator and compressor options are considered on joint work and the ways of decline of expense of electric power are indicated by these aggregates*

**Проблема и её связь с научными или практическими задачами.** В последнее время в Украине делается упор на увеличение мощностей горных предприятий. Решение этих задач связано с укрупнением и углублением угольных шахт и, как следствие, увеличением притоков шахтных вод, количества подаваемого в шахту атмосферного воздуха и расхода сжатого воздуха для нормального функционирования электромеханического оборудования, особенно в Центральном районе Донбасса. Поэтому в практике эксплуатации стационарных установок шахт зачастую используется совместное включение турбомашин на последовательную и параллельную работу. Такие совместно работающие машины представляют собой сложные электромеханические и аэродинамические комплексы, оценка энергетической эффективности которых осуществляется на основе системного подхода с использованием соответствующих обобщённых или интегральных показателей. Одним показателем можно считать общий КПД (коэффициент полезного действия установки вентиляторной, водоотливной, компрессорной), позволяющий оценивать её как целостную систему.

С учетом того, что вышеназванные установки являются энергоёмкими звеньями общешахтного комплекса, то обеспечение наиболее рациональных режимов работы крупного горно-шахтного оборудования являются одним из основных направлений энергосбережения на шахтах Украины.

**Анализ исследований и публикаций.** Максимальное значение КПД установки  $\eta_{устан}$ , как показано в работах [1-6], можно достичь только при работе турбомашин с максимальным КПД  $\eta_{тм}$  на данную внешнюю сеть. При этом вышеприведенные авторы дают различные

формулы для определения КПД внешней сети  $\eta_{вс}$ , но никто из них не сделал попытки получить максимальное значение произведения  $\eta_{тм} \eta_{вс}$ , так как потери в электрической сети и электроприводе сравнительно мало зависят от режимов работы турбомашин в достаточно широком диапазоне их изменений и поэтому могут быть приняты как постоянные величины.

В работе [7] установлено влияние КПД внешней сети на повышение энергетической эффективности турбоустановки при индивидуальной работе на данную сеть.

**Постановка задачи.** В предлагаемой ниже статье устанавливается влияние снижения сопротивления внешней сети на повышение общего КПД совместно работающих шахтных турбомашин и, как следствие, снижение расхода электроэнергии на 1 т добываемого полезного ископаемого.

**Изложение материала и результаты.** Рассмотрим совместную работу шахтных турбомашин в зависимости от их назначения.

### Главные водоотливные установки шахт (ГВУ)

Возможны два принципиально отличающихся схемы совместной работы насосных агрегатов водоотлива – параллельную и последовательную.

При параллельном включении насосов шахтной водоотливной установки следует различать работу агрегатов на свой или общий трубопровод ТР. (рис. 1а, 1б).

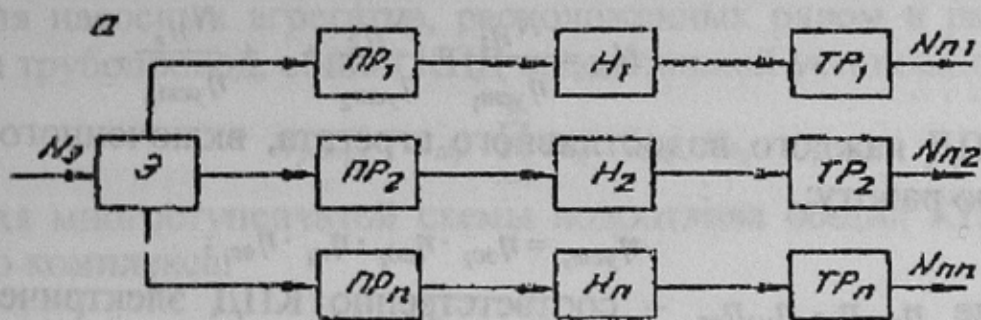


Рис. 1.а – Схема параллельного включения насосов шахтного водоотлива на свой трубопровод;

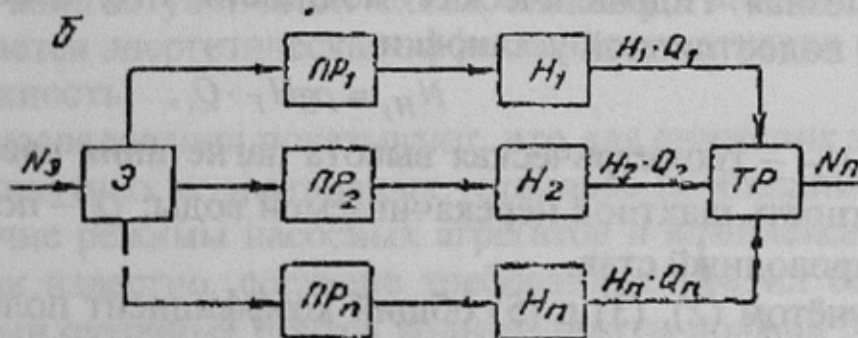


Рис. 1.б – Схема параллельного включения насосов шахтного водоотлива на общий напорный став



При этом общий поток энергии  $N_{\Sigma}$ , подведённой от электроэнергосистемы, распределяется по числу направлений ПР, равному числу включённых насосных агрегатов  $N$ . Типовая водоотливная установка шахты обычно включает три таких агрегата, хотя, в зависимости от шахтного притока их может быть и больше.

Покажем, что энергетическая эффективность насосных установок с параллельным включением насосов в значительной степени зависит от схемы их включения. При этом общая полезная мощность потоков энергии насосов:

$$N_H = \sum_{i=1}^n N_{H_i}, \quad (1)$$

Следовательно, общий КПД водоотливной установки с параллельно работающими насосными агрегатами:

$$\eta_{уст0H} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{H_i}}{N_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где  $n$  – число параллельно работающих насосных агрегатов;  $N_{H_i}$  – полезная мощность  $i$ -го насоса;  $N_{\Sigma}$  – мощность на шинах питающей электрической подстанции.

Как известно, мощность  $N_{\Sigma}$  может быть выражена через мощности  $N_{H_i}$  и соответствующие им КПД отдельных насосов следующим образом:

$$N_{\Sigma} = \frac{N_{H_1}}{\eta_{уст1}} + \frac{N_{H_2}}{\eta_{уст2}} + \dots + \frac{N_{H_n}}{\eta_{устn}}, \quad (3)$$

КПД каждого водоотливного агрегата, включенного на параллельную работу:

$$\eta_{устi} = \eta_{эсi} \cdot \eta_{эдi} \cdot \eta_{нi} \cdot \eta_{всi}, \quad (4)$$

где  $\eta_{эс}$ ,  $\eta_{эд}$ ,  $\eta_{н}$ ,  $\eta_{вс}$  – соответственно КПД электрической сети, приводного электродвигателя, насоса и внешней сети, на которую работает данный водоотливный агрегат.

Полезная гидравлическая мощность  $i$ -го насосного агрегата шахтной водоотливной установки:

$$N_{H_i} = \rho g H_{\Gamma} \cdot Q_i, \quad (5)$$

где  $H_{\Gamma}$  – геометрическая высота нагнетания насоса водоотлива;  $\rho$  – плотность шахтной перекачиваемой воды;  $Q_i$  – подача  $i$ -го насоса в трубопроводный став.

С учётом (2), (3) и (5) общий коэффициент полезного действия главной водоотливной установки шахты при параллельной работе насосных агрегатов на отдельные трубопроводы:

$$\eta_{устОНр} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{\frac{Q_1}{\eta_{уст1}} + \frac{Q_2}{\eta_{уст2}} + \dots + \frac{Q_n}{\eta_{устn}}}, \quad (6)$$

Для схемы параллельной работы насосных агрегатов на общий нагнетательный став КПД главной водоотливной установки:

$$\eta_{устОНо} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{\frac{Q_1}{\eta_{y1}} + \frac{Q_2}{\eta_{y2}} + \dots + \frac{Q_n}{\eta_{yn}}} \cdot \eta_{тр}, \quad (7)$$

где  $\eta_{тр}$  - КПД нагнетательного или напорного трубопровода;  
 $\eta_{yi}$  - КПД  $i$ -го насосного агрегата без учёта внешней сети,  
 $\eta_{yi} = \eta_{эсi} \cdot \eta_{эдi} \cdot \eta_{ni}$ .

Из формул (6) и (7) следует, что энергетическая эффективность насосных водоотливных установок с параллельным включением насосов в значительной степени зависит от схемы их включения на напорные трубопроводы.

Для оценки общего КПД последовательно включённых насосов шахтного водоотлива следует различать схемы с агрегатами, расположенными рядом и на расстоянии друг от друга (многоступенчатая схема водоотлива шахты).

Для насосных агрегатов, расположенных рядом и работающих на один трубопровод, общий КПД водоотливной установки:

$$\eta_{устор} = \eta_{тр} \cdot \prod_{i=1}^n \eta_{эсi} \cdot \eta_{эдi} \cdot \eta_{ni}, \quad (8)$$

Для многоступенчатой схемы водоотлива общий КПД водоотливного комплекса:

$$\eta_{устоо} = \prod_{i=1}^n \eta_{эсi} \cdot \eta_{эдi} \cdot \eta_{ni} \cdot \eta_{трi}, \quad (9)$$

Из последнего выражения видно, что при переходе от одноступенчатой к многоступенчатой схеме шахтного водоотлива существенно снижается энергетическая эффективность откачки шахтной воды на поверхность.

Наши исследования показывают, что для снижения энергозатрат при работе шахтных водоотливных установок необходимо оптимизировать рабочие режимы насосных агрегатов и комплекса водоотлива в целом. Как известно, согласно требованиям правил безопасности, максимальный суточный приток воды из шахты должен быть откачен за время, не превышающее 20 часов. График работы насосов главного водоотлива, как мощных подземных потребителей электроэнергии,



должен составляться с учётом формирования наиболее эффективной суточной электрической нагрузки всего горного предприятия, увязанной соответствующим образом с максимумом нагрузок в энергосистеме [5]. График работы водоотлива – циклический. Поэтому наличие технологических перерывов в работе, когда происходит заполнение водосборника водой, позволяет совмещать последние с периодами максимума нагрузки энергосистемы. В связи с этим модель функционирования и оптимизации работы шахтных водоотливных комплексов помимо насосных агрегатов должна включать также в качестве подкомплексов и водосборники.

Общим входным параметром в водоотливный комплекс шахты является приток воды в водосборник главной водоотливной установки  $Q_{np}(t)$ , изменяющийся как в течение суток, так и года, оптимизируемым параметром – подача водоотливного агрегата (одного или нескольких насосов, включённых на параллельную работу)  $Q_{nc}(t)$ , регулируемая в течение суток. Переменными величинами будут уровень  $h(t)$  или количество  $W(t)$  шахтной воды в водосборнике водоотливной установки. При этом считаем, что для конкретной водоотливной установки допускаемые нижний ( $h_n$ ), верхний ( $h_e$ ) и аварийный ( $h_a$ ) уровни постоянны. Разность объёмов водосборника, соответствующих аварийному и верхнему уровням воды, принимается как аварийная ёмкость, незаполняемая в нормальных условиях функционирования. Объём регулировочной части водосборника определяется расположением по высоте приёмного колодца датчиков нижнего и верхнего уровня аппаратуры автоматизации.

Связь между уровнем воды  $h(t)$  и её количеством в шахтном водосборнике  $W(t)$  устанавливается квадратичной зависимостью:

$$h(t) = C_0 + C_1 \cdot W(t) + C_2 \cdot [W(t)]^2, \quad (10)$$

где  $C_0, C_1, C_2$  – постоянные для конкретного водосборника, зависящие от конфигурации, размеров и состояния последнего.

Тогда, разность между текущим и нижним уровнями воды в водосборнике:

$$\Delta h(t) = (C_0 - h_n) + C_1 \cdot W(t) + C_2 \cdot [W(t)]^2, \quad (11)$$

Откуда объём воды в водосборнике:

$$W(t)_{1,2} = \frac{-C_1 \pm [C_1^2 - 4C_2(C_0 - h_n - \Delta h(t))]^{1/2}}{2C_2}, \quad (12)$$

При этом необходимо учитывать, что объём воды в водосборнике всегда больше нуля, т.е.  $W(t) > 0$  и текущее значение этого объёма находится между объёмами соответствующими нижнему и аварий-

ному уровнями в последнем, т.е.  $W_n(t) < W(t) < W_A(t)$ . Объём воды, накапливающейся в единицу времени в водосборнике определяется разностью между подачей водоотливной установки  $Q_{nc}(t)$  и притоком шахтной воды в водосборную ёмкость  $Q_{np}(t)$ :

$$dW(t) = [Q_{nc}(t) - Q_{np}(t)] \cdot dt, \quad (13)$$

Отсюда текущая подача водоотливной установки шахты равна:

$$Q_{nc}(t) = Q_{np}(t) + \frac{dW(t)}{dt}, \quad (14)$$

Считаем, что количество воды в водосборнике в начальный момент времени  $t_0$  равно  $W_0$ . Тогда, мощность потребляемая водоотливной установкой из сети:

$$N_s(t) = \frac{\rho g H_n \left[ Q_{np}(t) + \frac{dW(t)}{dt} \right]}{\eta_{уст}}, \quad (15)$$

где  $\rho$  – плотность перекачиваемой шахтной воды;  $H_n$  – напор, развиваемый насосами водоотлива;  $\eta_{уст}$  – общий КПД водоотливной установки.

Таким образом, график изменения текущей мощности  $N_s(t)$  в течение суток должен составляться с учётом эффективного суточного графика электрической нагрузки всего горного предприятия в соответствии с максимумом нагрузки в энергосистеме. Как видно из формул (11, 12, 13) параметры состояния водоотливного комплекса изменяются не только при переходе от насосных агрегатов к водосборным ёмкостям, но и зависят от времени, поэтому при оптимизации используется пространственно-временная модель и в качестве целевой функции принимается минимум суточных затрат на электроэнергию:

$$E_{сут. \min} = \int_0^{24} E_{уд}(t) \cdot dt,$$

где  $E_{уд}(t)$  – энергетические затраты водоотливной установки в единицу времени.

Из уравнения (15) видно, что потребляемая мощность водоотливной установкой из сети зависит от притока воды в водосборник и скорости изменения объёма в нем. Отсюда следует, что для обеспечения минимального значения целевой функции полученной математической модели оптимизации работы водоотливного комплекса следует регулировать подачу насосных агрегатов в течение суток.

При двух установленных периодах максимума нагрузки энергосистемы в сутки минимальное число полных рабочих циклов водоотливной установки с внепиковым потреблением электроэнергии долж-



но равняться двум: один цикл должен состоять из времени утреннего максимума и всего или части времени между; второй полный цикл включает в себя время вечернего максимума  $T_{мв}$  и весь или часть периода между вечерним и утренним максимумами. Возможность внепиковой работы водоотливной установки при этом определяется, во-первых, способностью регулировочного объема водосборника аккумулировать приток воды за большой период максимума, а во-вторых, достаточной рабочей подачей установки, позволяющей откачать накопленный объем воды с учетом текущего поступления водопритока к началу очередного периода максимума.

Из условия внепикового потребления электроэнергии водоотливом объем регулировочной емкости водосборника шахтной водоотливной установки:

$$V_p \geq T_{мв} \cdot Q_{пр.}$$

Экономический эффект, получаемый горнодобывающим предприятием при такой организации водоотлива

$$\mathcal{E} = \Delta C - I_d$$

где  $\Delta C$  – экономия в уплате за потребляемую электроэнергию,  $I_d$  – дополнительные годовые издержки предприятия на увеличение емкости водосборника и применение специальной аппаратуры управления.

### Вентиляторные установки шахт

В практике эксплуатации вентиляторов главного проветривания нередко используется включение на параллельную работу (рис. 2), а вентиляционных агрегатов местного проветривания – на последовательную работу.

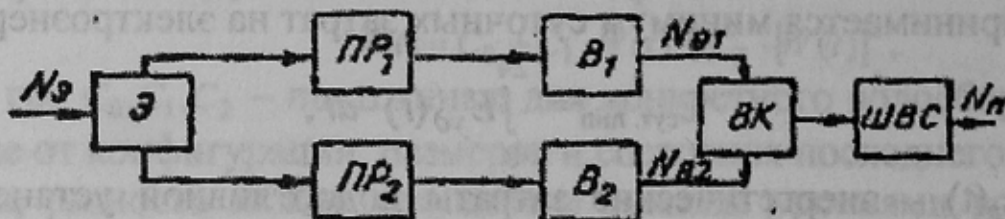


Рис. 2 – Схема параллельного включения вентиляторов главного проветривания

При этом общий КПД параллельно включённых вентиляторных агрегатов  $V$  главного проветривания:

$$\eta_{устОВ} = \left( \frac{N_{B1} + N_{B2}}{\frac{N_{B1}}{\eta_{уст1}} + \frac{N_{B2}}{\eta_{уст1}}} \right) \cdot \eta_{вк} \cdot \eta_{швс}, \quad (16)$$

где  $N_{B1}, N_{B2}$  – соответственно полезная гидравлическая мощность каждого из параллельно включённых вентиляторов;  $\eta_{вк}, \eta_{швс}$  – КПД вентиляционного канала и шахтной вентиляционной сети [6].

Коэффициент полезного действия  $\eta_{уст}$  вентиляторного агрегата в отдельности определяется КПД электросети  $\eta_{эс}$ , КПД приводного двигателя  $\eta_{эд}$  и КПД самого вентилятора  $\eta_{sv}$  т.е.  $\eta_{уст1} = \eta_{эс1} \cdot \eta_{эд1} \cdot \eta_{sv1}$ ,  $\eta_{уст2} = \eta_{эс2} \cdot \eta_{эд2} \cdot \eta_{sv2}$ .

В нашем случае мы пренебрегаем сопротивлением участков вентиляционной сети каждого из вентиляторов главного проветривания.

Общий КПД последовательно включённых  $n$  вентиляторов местного проветривания с учётом КПД воздухопровода  $\eta_{впр}$ :

$$\eta_{устоп} = \eta_{впр} \cdot \prod_{i=1}^n \eta_{эсi} \cdot \eta_{эдi} \cdot \eta_{svi}, \quad (17)$$

### Компрессорные установки шахт

В практике эксплуатации стационарных компрессорных установок горных предприятий наиболее распространённой является схема параллельного включения компрессорных установок  $K$  на общий трубопровод сжатого воздуха ТР (рис. 3).

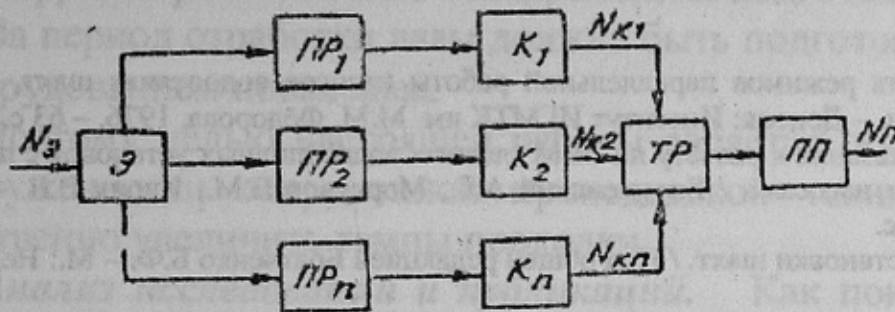


Рис. 3 – Схема параллельной работы компрессорных установок шахт.

Для такого включения компрессорных агрегатов общий КПД:

$$\eta_{устОк} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n N_{кi}}{\frac{N_{к1}}{\eta_{уст1}} + \frac{N_{к2}}{\eta_{уст1}} + \dots + \frac{N_{кп}}{\eta_{устn}}} \right) \cdot \eta_{тпр} \cdot \eta_{ппр}, \quad (18)$$



где  $N_{кi}$  – полезная мощность  $i$ -го компрессора;  $\eta_{тр}, \eta_{пр}$  – КПД трубопровода сжатого воздуха и приёмников пневматической энергии [6].

При этом КПД каждого компрессорного агрегата  $\eta_{устi}$  определяется  $\eta_{эсi}, \eta_{эдi}$ , а также КПД компрессоров  $\eta_{ккi}$  без учёта возможности утилизации тепла, отводимого от сжатого воздуха [6], т.е.  $\eta_{устi} = \eta_{эсi} \cdot \eta_{эдi} \cdot \eta_{ккi}$ . Таким образом, с помощью выше полученных формул можно оценить энергетические параметры шахтных водоотливных, вентиляторных и компрессорных установок при их совместной работе.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Оценка энергетической эффективности совместно работающих агрегатов шахтных вентиляционных, водоотливных и компрессорных установок позволяет учитывать не только технические особенности самих машин, но и технологические схемы совместного их включения. Это даёт нам возможность закладывать мероприятия по энергосбережению как на стадии проектирования так реконструкции шахтных установок, так и их эксплуатации.

Регулирование рабочего режима шахтных стационарных установок при их совместной работе необходимо осуществлять исходя из условия минимума энергозатрат. Поэтому дальнейшие исследования должны быть посвящены разработке способов и средств оптимизации управления шахтными установками по критерию энергозатрат.

#### Литература

1. Методика расчёта режимов параллельной работы насосов водоотлива шахт, имеющих большие притоки. – Донецк: Институт ИГМТК им. М.М. Фёдорова, 1976. – 63 с.
2. Методические указания к расчёту на ЭВМ главных водоотливных установок с параллельно работающими насосами / Боруменский А.Г., Моргунов В.М., Кирик В.В. – Донецк: ДПИ, 1981. – 37 с.
3. Стационарные установки шахт. / Под общей редакцией Братченко Б.Ф. – М.: Недра, 1977. – 440 с.
4. Откачка затопленных шахт. Способы и техника удаления воды из шахтных выработок. // Справочное пособие механика водоотливных установок шахт, рудников и карьеров. Под редакцией Паламарчука Н.В. – Донецк, 1994. – 60 с.
5. Шевчук С.П. Повышение эффективности водоотливных установок: Учеб. пособие. – К.: УМК ВО, 1990. – 104 с.
6. Цейтлин Ю.А., Мурзин В.А. Пневматические установки шахт. – М.: Недра, 1985. – 351 с.
7. Самуся В.И., Шевчук С.П., Малеев В.Б., Малеев А.В. Рациональные режимы работы вентиляторных, водоотливных и турбокомпрессорных установок // Наукові праці Донецького національного технічного університету, Донецьк: ДонНТУ, 2006, вип.105. – С.96-107.

Дата поступления статьи в редакцию: 02.11.06