

УДК 622. 234: 622.251(075)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАХТНОГО  
ГИДРОПНЕВМОАККУМУЛЯТОРА СЖАТОГО ВОЗДУХА**

**Т. М. Кумыкова, В. Х. Кумыков**

*Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
ул. Протозанова А. К., 69, 070004, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан*

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований динамических процессов, происходящих в гидропневмоаккумуляторах сжатого воздуха шахт и рудников. Обоснована конструкция гидропневмоаккумулятора, позволяющая стабилизировать и повышать давление в шахтной пневмосети по сравнению с давлением сжатого воздуха, поступающим от компрессорной станции.

*Гидропневматический аккумулятор, пневмоэнергокомплекс, сжатый воздух, пневмосеть*

Существующие на подземных рудниках и шахтах пневмоэнергокомплексы, в связи с развитием горных работ и отработкой нижних горизонтов, не могут гарантировать производительную работу горного оборудования с пневмоприводом.

Для высокопроизводительной работы пневматического горного оборудования необходимо стабильное давление сжатого воздуха в общешахтной воздухопроводной сети, которое должно быть не ниже 0.65–0.75 МПа. На большинстве действующих горнорудных предприятиях, ввиду значительных непроизводительных потерь сжатого воздуха, стабилизация давления существующими компрессорными станциями не обеспечивается, так как расход воздуха в часы с максимальным числом работающих потребителей превышает технические возможности компрессорных станций, а это приводит к падению давления сжатого воздуха в рудничных воздухопроводных сетях до 0.45–0.55 МПа и снижению производительности потребителей на 30–40 % [1, 2].

Эффективным средством энергосбережения путем стабилизации и повышения давления сжатого воздуха у пневмоприемников признаны гидропневматические аккумуляторы (ГПА), которые возводятся на пути движения сжатого воздуха от компрессорной станции до потребителя [3, 4]. В этом случае подземный пневмоэнергокомплекс включает в себя следующие составляющие: компрессорная станция — шахтные пневматические сети — гидропневматический аккумулятор — пневмоприемники.

Обычно для каждого конкретного рудника конструкция и параметры гидропневмоаккумулятора подбираются индивидуально. Динамизм постоянно протекающих в них процессов и слабая его изученность выдвигают задачу изучения этих процессов как в промышленных, так и, особенно, в лабораторных условиях. Это предопределяет постановку работ по исследованию и установлению режима эксплуатации гидропневмоаккумуляторов сжатого воздуха [5].

Анализ работы, подбор элементов и параметров аккумулятора можно осуществить с использованием математического моделирования процессов, протекающих в нем. Основные динамические процессы ГПА — переток жидкости из пневмокамеры в гидрокамеру (его зарядка) и переток жидкости в обратном порядке (его разрядка). На эти процессы влияют такие параметры, как давление и плотность флюидов хранимого продукта, уровень поверхности жидкости, площадь горизонтального сечения камеры, время перетока жидкости, ускорение силы тяжести.

Математическая модель процессов аккумулятора сжатого воздуха строится при следующих условиях (рис. 1): направление движения рабочей жидкости по соединительной скважине вниз принято за положительное, вверх — за отрицательное; нулевой уровень рабочей жидкости в пневмокамере определен по ее подошве, в гидрокамере и соединительной магистрали — по подошве гидрокамеры. При этом значение уровня рабочей жидкости в гидрокамере и соединительной магистрали положительное, если свободная поверхность рабочей жидкости находится в гидрокамере, и отрицательное при ее расположении в соединительной магистрали.

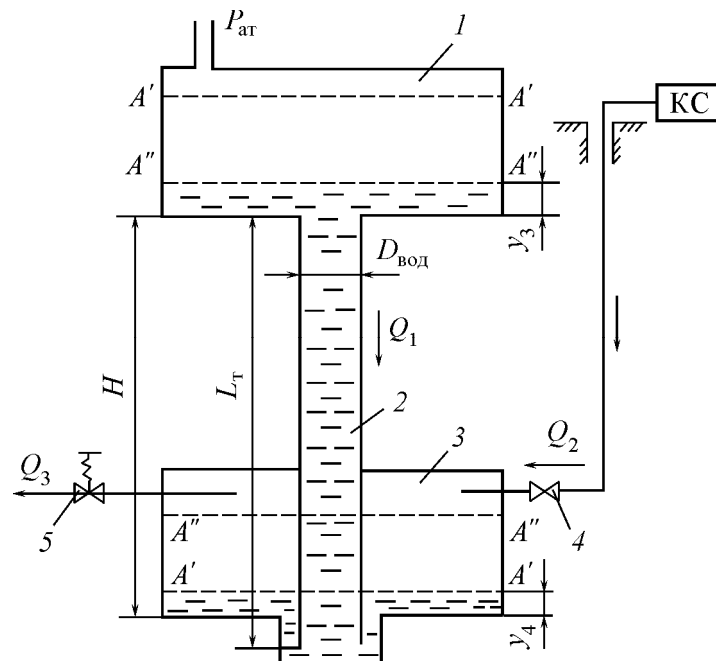


Рис. 1. Геометрическая схема гидропневматического аккумулятора сжатого воздуха: 1 — гидрокамера; 2 — соединительный водовод; 3 — пневмокамера; 4 — задвижка на питающем воздуховоде; 5 — запорный клапан на расходном трубопроводе;  $A' - A''$  — гидропневмоаккумулятор заряжен;  $A'' - A''$  — гидропневмоаккумулятор разряжен

Режим совместной эксплуатации аккумулятора с пневмосистемой осуществляется при открытой задвижке 4 и клапане 5. Процессы, протекающие в аккумуляторе, в этом случае описываются системой уравнений баланса энергии и неразрывности потока:

$$P_{ат} + (L_T + y_3)\rho \cdot g \cdot 10^{-6} = P_{ат} + P_2 + [y_4 + (L_T - H) + h_n]\rho \cdot g \cdot 10^{-6},$$

$$V_{св} = V_{св.0} + V_{кс} - V_{пот} - V_{ут}, \quad (1)$$

где  $P_{ат}$  — атмосферное давление, МПа;  $L_T$  — длина соединительного водовода, м;  $y_3$  и  $y_4$  — уровни рабочей жидкости в гидрокамере и соединительном водоводе и в пневмокамере, м;  $P_2$  — избыточное давление сжатого воздуха в пневмокамере, МПа;  $H$  — разность уровней камер

аккумулятора, м;  $h_{\text{п}}$  — потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений при движении рабочей жидкости по соединительному водоводу, м;  $\rho$  — плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{св.о}}$  и  $V_{\text{св}}$  — количество свободного воздуха (приведенного к атмосферному давлению) в пневмокамере в начальный  $t_0$  и рассматриваемый моменты времени  $t$ , м<sup>3</sup>;  $V_{\text{кс}}$ ,  $V_{\text{пот}}$ ,  $V_{\text{ут}}$  — количество свободного воздуха, м<sup>3</sup>, соответственно поступившего от компрессорной станции, забранного потребителями и потерянного из пневмокамеры вследствие утечек за время от  $t_0$  до  $t$ .

Из уравнения состояния газа при изотермическом процессе для сжатого воздуха в пневмокамере можно записать [6]:

$$V_{\text{св}} = V_{\text{сж}} \left( \frac{P_2}{P_{\text{ат}} + 1} \right), \quad (2)$$

где  $V_{\text{сж}} = V_2 - V_4$  — объем сжатого воздуха в пневмокамере, м<sup>3</sup>;  $V_2$  — объем пневмокамеры, м<sup>3</sup>;  $V_4$  — объем рабочей жидкости в пневмокамере, м<sup>3</sup>.

Интегральные показатели, входящие в систему (1), можно определить из следующих соотношений:

$$V_{\text{кс}} = \int_{t_0}^t Q_2 dt, \quad V_{\text{пот}} = \int_{t_0}^t Q_3 dt, \quad V_{\text{ут}} = \int_{t_0}^t Q_{\text{ут}} dt, \quad (3)$$

где  $Q_2$  и  $Q_3$  — объемные расходы сжатого воздуха соответственно по питающему и расходному трубопроводам, приведенные к атмосферному давлению, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{ут}}$  — потеря сжатого воздуха из пневмокамеры в единицу времени вследствие утечек, приведенная к атмосферному давлению, м<sup>3</sup>/с.

Исследованиями доказано, что утечка сжатого воздуха из пневмосети пропорциональна избыточному давлению заключенного в ней воздуха [7]. Можно предположить, что аналогичный характер носит зависимость потерь сжатого воздуха из пневмокамеры. Величина их связана линейной зависимостью с площадью обнаженной поверхности пневмокамеры.

Следовательно, потерю сжатого воздуха из пневмокамеры в единицу времени вследствие утечек можно описать выражением

$$Q_{\text{ут}} = \varepsilon \cdot G \cdot P_2, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент, характеризующий степень герметичности пневмокамеры, м/(МПа·с);  $G$  — площадь обнаженной поверхности выработки пневмокамеры, м<sup>2</sup>. Потеря напора  $h_{\text{п}}$  при движении рабочей жидкости по соединительной магистрали определяется по выражению [8]

$$h_{\text{п}} = \xi_{\text{п}} \frac{\mathcal{G}^2}{2g}, \quad (5)$$

где  $\mathcal{G} = 4Q_1 / (\pi D_{\text{вод}}^2)$  — скорость движения рабочей жидкости по соединительному водоводу, м/с;  $Q_1 = dV_4 / dt$  — объемный расход рабочей жидкости по водоводу, м<sup>3</sup>/с;  $V_4$  — объем рабочей жидкости в пневмокамере, м<sup>3</sup>;  $D_{\text{вод}}$  — диаметр соединительного водовода, м;  $\xi_{\text{п}}$  — полный коэффициент сопротивления соединительного водовода.

Полный коэффициент сопротивления устанавливается по выражению

$$\xi_{\text{п}} = \lambda \frac{L_{\text{т}}}{D_{\text{вод}}} + \xi_{\text{м}}, \quad (6)$$

где  $\lambda = 0.021/D_{\text{вод}}^{0.3}$  — коэффициент гидравлических сопротивлений;  $\xi_m$  — суммарный коэффициент местных сопротивлений в водоводе.

Потери напора в трубопроводе от местных сопротивлений можно учитывать методом эквивалентных длин. Тогда с учетом (6) потеря напора при движении рабочей жидкости по соединительному водоводу определится из выражения

$$h_{\text{п}} = 0.0019 \frac{L_{\text{т}} \cdot Q_1^2}{D_{\text{вод}}^{5.3}}. \quad (7)$$

Подставив (7) и сделав необходимые преобразования в первом уравнении системы (1), получим:

$$\left. \frac{dV_4}{dt} \right| \left. \frac{dV_4}{dt} \right| = \frac{\left( H + y_3 - y_4 - \frac{10^6 P_2}{\rho \cdot g} \right) D_{\text{вод}}^{5.3}}{00019 L_{\text{т}}}. \quad (8)$$

С учетом (2), (3) и (4) второе уравнение системы (1) примет вид

$$\frac{dP_2}{dt} = P_2 \frac{dV_4/dt - \varepsilon \cdot G \cdot P_a}{V_2 - V_4} + P_a \frac{dV_4/dt + Q_2 - Q_3}{V_2 - V_4}. \quad (9)$$

Уровни рабочей жидкости в гидрокамере и соединительном водоводе  $y_3$  и в пневмокамере  $y_4$  (уравнение (8)) целесообразно выразить через объем рабочей жидкости в пневмокамере  $V_4$ . Эти зависимости могут быть представлены так:

$$y_3 = f_1(V_4) \quad \text{и} \quad y_4 = f_2(V_4).$$

В уравнении (9) величина обнаженной поверхности выработки пневмокамеры выражается через объем рабочей жидкости в пневмокамере  $V_4$ . Соотношение этих величин зависит от конфигурации пневмокамеры и может быть записано как  $G = f_3(V_3)$ .

В результате анализа динамических процессов, происходящих в гидропневмоаккумуляторе, включенном в состав пневмоэнергокомплекса подземного рудника, получена математическая модель ГПА в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{dV_4}{dt} &= F_1(t, P_2, V_4), \\ \frac{dP_2}{dt} &= F_2\left(t, P_2, V_4, \frac{dV_4}{dt}, Q_2, Q_3\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Данная модель позволяет установить все динамические процессы в ГПА при его эксплуатации. К ним относятся:

— переток рабочей жидкости из гидрокамеры в пневмокамеру со сжатием воздуха в пневмокамере:

$$P_{20} = 0, \quad V_{30} \neq 0, \quad V_{40} = 0, \quad Q_2(t) = 0, \quad Q_3(t) = 0,$$

где  $V_{30}$  и  $V_{40}$  — соответственно суммарный объем рабочей жидкости в гидрокамере и соединительном водоводе и объем рабочей жидкости в пневмокамере в начальный момент времени, м<sup>3</sup>;  $P_{20}$  — избыточное давление сжатого воздуха в пневмокамере в начальный момент времени, МПа;

— зарядка аккумулятора от компрессорной станции при отключенной пневмосети:

$$Q_2(t) \neq 0 \quad \text{и} \quad Q_3(t) = 0;$$

— совместная работа аккумулятора и пневмосети при отключенной компрессорной станции:

$$Q_2(t) = 0 \quad \text{и} \quad Q_3(t) \neq 0.$$

Помимо эксплуатации ГПА в системе пневмоэнергокомплекса исследовался процесс его разрядки. Процесс происходит при постоянном атмосферном давлении и, хотя не типичен для эксплуатации аккумулятора, которому свойственно непостоянство давления сжатого воздуха в пневмокамере при совместном использовании с остальными элементами пневмосистемы, используется на стадии испытаний.

В этом случае имеем следующее уравнение баланса энергии:

$$P_a + (L_r + y_3) \rho \cdot g \cdot 10^{-6} = P_a + [y_4 + (L_r - H) + h_n] \rho \cdot g \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Математическая модель рудничного гидропневмоаккумулятора в режиме разрядки имеет вид дифференциального уравнения первого порядка

$$\frac{dV_4}{dt} = F_3(t, V_4). \quad (12)$$

Исходная информация представлена параметрами:

- конструктивных характеристик аккумулятора — объем пневмокамеры, разность уровней камер, диаметр и длина соединительного водовода, суммарный коэффициент местных сопротивлений соединительной магистрали, плотность рабочей жидкости, атмосферное давление в месте расположения камер, коэффициент герметичности пневмокамеры;
- задания начальных условий — время начала моделирования, первоначальный объем рабочей жидкости в пневмокамере и в гидрокамере и соединительном водоводе, первоначальное избыточное давление сжатого воздуха в пневмокамере, первоначальная потеря сжатого воздуха из пневмокамеры из-за утечек;
- управления процессом — время окончания моделирования, первоначальный шаг приращения времени при решении дифференциальных уравнений.

При моделировании первого режима работы аккумулятора (совместной эксплуатации ГПА с пневмосистемой) в таблицах и графиках могут быть выведены временные зависимости  $y_3(t)$ ,  $y_4(t)$ ,  $Q_1(t)$ ,  $V_4(t)$ ,  $V_3(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $Q_2(t)$ ,  $Q_3(t)$ ,  $Q_{yt}(t)$ . При моделировании второго режима (разрядка аккумулятора) выводятся зависимости  $y_3(t)$ ,  $y_4(t)$ ,  $Q_1(t)$ ,  $V_4(t)$ ,  $V_3(t)$ .

Для пневмокамер, пройденных в крепких породах, смоделирован режим перепуска рабочей жидкости из гидрокамеры в пневмокамеру. При этом определены зависимости уровней рабочей жидкости в гидрокамере и соединительном водоводе  $y_3$  и в пневмокамере  $y_4$ , а также площадь обнаженной поверхности выработки пневмокамеры  $G$  от объема рабочей жидкости в пневмокамере данной конфигурации. Результаты исследований при объемах гидро- и пневмокамеры по  $4000 \text{ м}^3$ ,  $V_{30} = 3900 \text{ м}^3$ ,  $H = 60 \text{ м}$  приведены на рис. 2. При диаметре соединительного водовода  $D = 0.4 \text{ м}$  процесс завершается за 36 мин, при  $D = 0.15 \text{ м}$  — длится более 7 ч. По представленному графическому материалу можно оценить влияние параметров соединительного водовода аккумулятора на изменение величин  $Q_1$ ,  $V_3$  и  $V_4$  во времени.

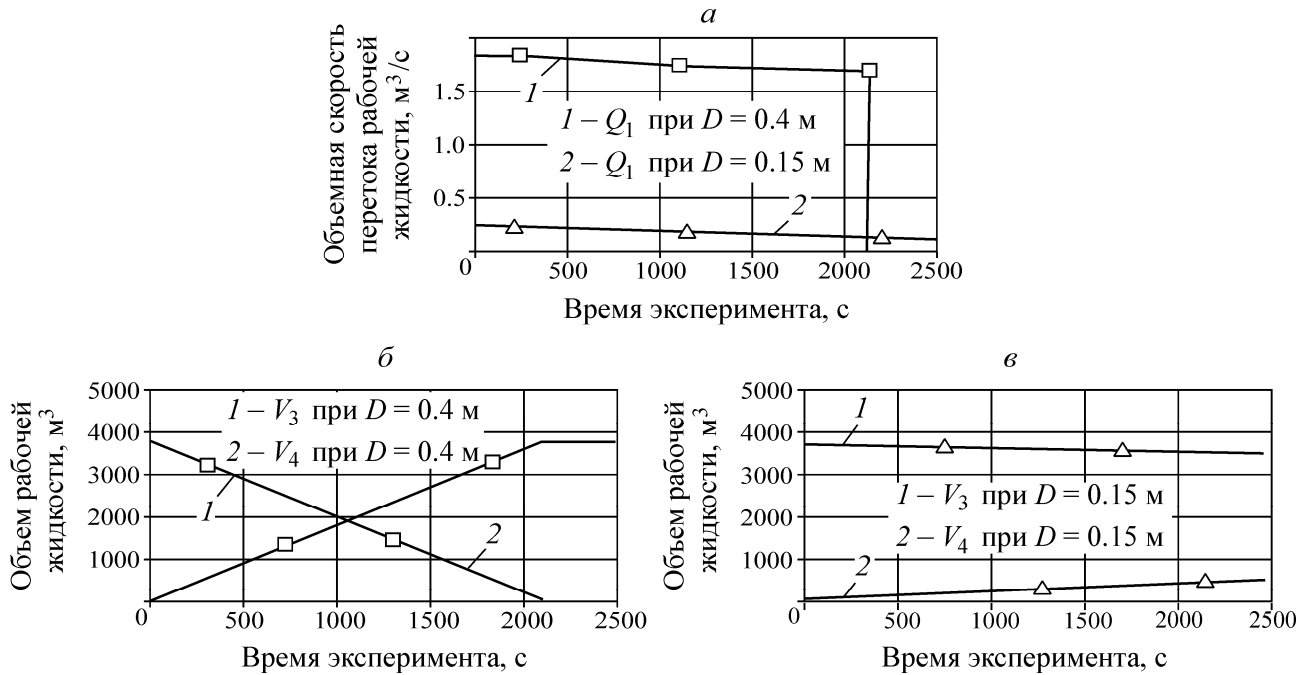


Рис. 2. Моделирование процесса перетока рабочей жидкости из гидрокамеры в пневмокамеру

Аналогичные исследования проведены для этого аккумулятора в режиме его совместной эксплуатации с другими элементами пневмоэнергокомплекса при диаметре соединительной трубы 0.4 м. Начальные условия при моделировании приняты следующие: избыточное давление воздуха в пневмокамере  $P_{20} = 0$ , объемы рабочей жидкости в пневмокамере  $V_{40} = 0$ , в гидрокамере и соединительном водоводе  $V_{30} = 3900$   $m^3$ . Результаты моделирования для данного режима работы ГПА представлены на рис. 3.

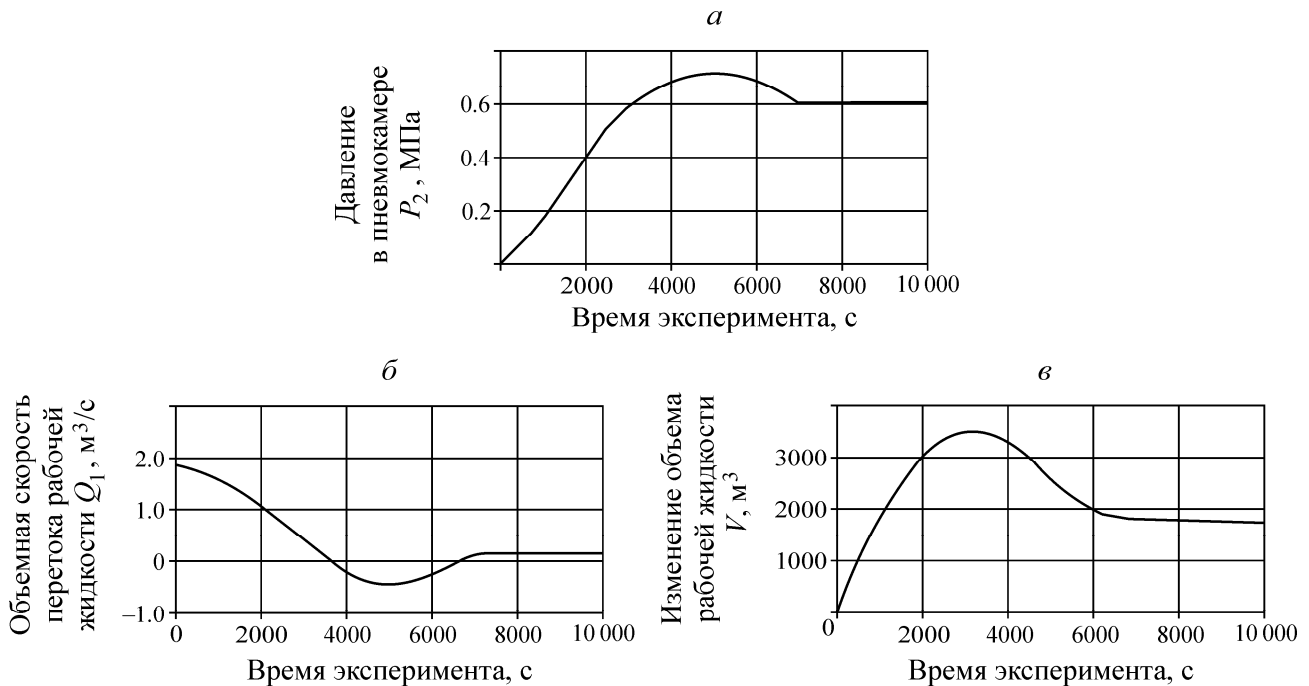


Рис. 3. Результаты моделирования режима совместной эксплуатации гидропневмоаккумулятора с пневмосетью

Анализ результатов моделирования позволяет выделить четыре стадии исследуемого процесса:

— переход системы из неустойчивого состояния, соответствующего начальным условиям, в устойчивое при  $Q_2 - Q_3 = 0$ . При этом выделяются два периода — время переходного процесса и нахождения системы в устойчивом состоянии;

— переход системы из одного устойчивого состояния в другое:  $(Q_2 - Q_3) > 0$ . Для этой стадии также характерны указанные периоды времени;

— третья стадия аналогична второй, но  $(Q_2 - Q_3) < 0$ ;

— если  $(Q_2 - Q_3)$  изменяется по синусоидальному закону, то наблюдаются колебания давления сжатого воздуха в пневмокамере.

Выполненные исследования показывают, что в качестве динамических параметров, характеризующих стабилизирующие свойства аккумулятора, можно использовать следующее:

— время переходного процесса от одного установившегося режима работы до другого. Таким можно считать режим, при котором давление сжатого воздуха в пневмокамере стабильно или наблюдается его равномерное изменение:

$$dP_2 / dt = \text{const};$$

— амплитуду колебаний давления сжатого воздуха в пневмокамере при синусоидальном изменении расхода, отражающую качество стабилизации динамической составляющей давления сжатого воздуха;

— время запаздывания колебаний давления сжатого воздуха в пневмокамере относительно синусоидального изменения расхода, являющееся показателем инерционности аккумулятора при динамических воздействиях.

Из результатов исследований следует, что динамические параметры аккумулятора в значительной мере зависят от геометрических размеров соединяющего камеры водовода. Диаметр водовода, позволяющий установить рациональный режим зарядки пневмокамеры в период между рабочими сменами, можно определить по формуле [9]

$$D_{\text{вод}} = \left( \frac{0.0019 L_T \cdot V_4^2}{t^2 \left( H + y_3 - y_4 - \frac{10^6 P_2}{\rho \cdot g} \right)} \right)^{0.19}. \quad (13)$$

Применение математической модели при разработке аккумулятора сжатого воздуха для пневмосистемы рудника позволяет выбрать конструктивные параметры соединительного водовода, отвечающие рациональным значениям динамических характеристик пневмоэнергокомплекса.

Планировалось строительство гидропневмоаккумулятора на Иртышском руднике (Восточно-Казахстанская область). В процессе проектирования промышленного образца ГПА для Иртышского рудника возникла необходимость выполнить пневмокамеру из двух параллельных выработок примерно одинакового объема. Выработки были пройдены на 10-м горизонте. В этой связи необходимо исследовать такой режим работы ГПА, который исключал бы использование гидрокамеры, расположенной на 8-м горизонте. В этом случае в качестве гидрокамеры может использоваться попеременно одна из пневмокамер, что устраняет необходимость перекачки всего объема жидкости на верхний горизонт, упрощает схему работы ГПА и снижает расход электроэнергии.

Для исследования и создания оптимальной конструкции гидропневмоаккумулятора проведено теоретическое обоснование лабораторного стенда и разработана его физическая модель, на которой в лабораторных условиях выполнены эксперименты.

Исследование динамических процессов, происходящих в ГПА, на первом этапе сводится к определению расхода жидкости при перетоке ее из одной камеры в другую и величины давления сжатого воздуха в пневмокамере, создаваемого гидростатическим давлением этой жидкости.

Лабораторный стенд включает: пневмокамеру, гидрокамеру, герметизирующие перемычки, соединительный водовод, обеспечивающий связь пневмокамеры с гидрокамерой по принципу сообщающихся сосудов, зумпф, расположенный в пневмокамере и служащий для размещения в ней затопленного свободного конца соединительного водовода, нагнетательный трубопровод, соединяющий сосуд со сжатым воздухом с пневмокамерой и снабженный вентилями, отводящий воздухопровод, идущий из пневмокамеры к потребителям, снабженный задвижкой. Для свободной циркуляции атмосферного воздуха при поступлении воды в гидрокамеру предусмотрена ее связь с атмосферой. Пневмокамера должна быть герметична, в ней недопустимы утечки хранимых флюидов.

Для лабораторных исследований смонтирован стенд со следующими параметрами:

объем пневмокамеры и гидрокамеры, м <sup>3</sup>	0.750
диаметр соединительного трубопровода, м	0.076
диаметр воздухопровода, м	0.015.

Регистрирующая и вспомогательная аппаратура: манометры — ОБМ1-160; расходомеры — СТВ-80.

Принципиальная схема функционирования стенда представлена на рис. 4.

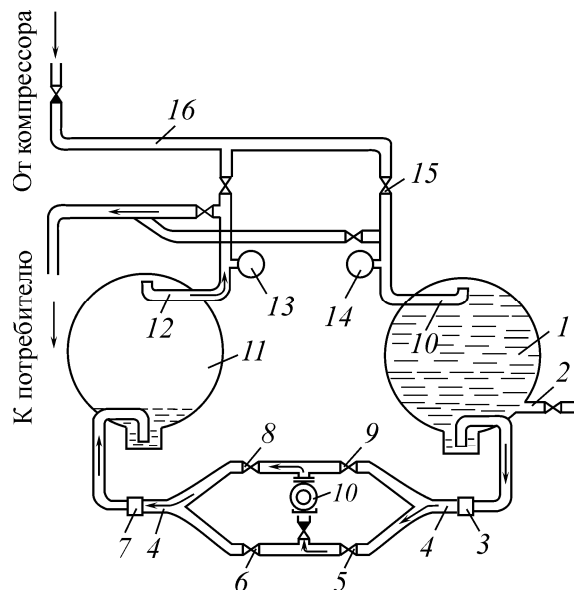


Рис. 4. Схема функционирования стенда гидропневмоаккумулятора

Предварительно пневмокамера 1 заполняется водой через трубопровод 2. Затем в эту камеру подают сжатый воздух, который поступает по воздухопроводу 16 через регулировочный вентиль 15 и воздухопровод 12. Сжатый воздух, поступая в пневмокамеру 1, вытесняет воду в гидрокамеру 11 по трубопроводу 4. Расход перетекающей жидкости фиксируется расходомерами 3 и 7. При обратном перетоке воды в пневмокамеру регулировочные вентили 5 и 8 закрывают, регулировочные вентили 6 и 9 открывают. Давление сжатого воздуха регистрируется манометрами 13 и 14. Позицией 10 обозначен насос.



Автоматизированная схема управления моделью включает следующие приборы и элементы: блок входных параметров, блок объекта управления, блок регистрации (входные параметры), блок распечатки (входных параметров), блок регулятор, блок задания.

Блок параметров включает информацию о давлении и расходе сжатого воздуха, длину и диаметр всех трубопроводов, геометрические параметры гидрокамеры и пневмокамеры; блок объекта управления — лабораторный стенд; блок регистрации выходных параметров — необходимую информацию при выполнении исследований на стенде: давление и расход сжатого воздуха, уровень воды, продолжительность перетока воды из пневмокамеры и обратно и т. д. Блок распечатки включает обработку и выдачу результатов приведенных исследований в необходимом для экспериментатора виде (таблица, график и т. д.); блок регулятор параметров — варьирование входных параметров по информации из блока задания и передает новые параметры по эксперименту обратно в исходный блок — блок входных параметров. Затем цикл повторяется. Испытания проводились на лабораторном стенде ГПА.

Исследовались следующие параметры:

- зависимость давления сжатого воздуха в пневмокамере от скорости перетока жидкости и расхода воздуха пневмоприемниками при неработающем насосе;
- то же при работающем насосе;
- возможные пределы регулирования давления сжатого воздуха в пневмокамере.

Опыты проводились в два этапа.

Первый этап лабораторных исследований протекал в следующем режиме работы ГПА. Первая камера заполнена жидкостью, вторая — сжатым воздухом. Открытием задвижки на воздухопроводе из камеры № 2 сжатый воздух направляется в пневмосеть. Одновременно открывается задвижка на воздухопроводе в камере № 1 и сжатый воздух из компрессорной станции поступает в камеру № 1, давит на поверхность воды и вытесняет ее в камеру № 2. Задвижка на водопроводе, соединяющем обе камеры, открыта. Результаты опыта представлены на рис. 5. При повышении давления сжатого воздуха в 5 раз, объемная скорость перетока рабочей жидкости увеличивается в 2 раза.

На втором этапе опытов при перетоке жидкости из первой камеры во вторую включали дополнительно перекачной насос, вмонтированный в водовод. В этом случае создавалось повышенное давление сжатого воздуха в камере № 2. В результате опыта изменение объема перекачиваемой жидкости происходило по экспоненциальному закону, а давление сжатого воздуха в камере № 2 возрастало в 3 раза при одновременном сокращении времени перекачки примерно в 2 раза (рис. 6).



Рис. 5. Зависимость скорости перетока жидкости от давления сжатого воздуха



Рис. 6. Динамика изменчивости перетока рабочей жидкости из камеры № 1 в камеру № 2 при работе насоса: 1 — изменение объема жидкости в камере № 2; 2 — изменение избыточного давления воздуха в камере № 2

Результаты опытных работ свидетельствуют о том, что создание дополнительного гидростатического давления за счет напора насоса, вмонтированного в водовод, позволяет повысить давление сжатого воздуха в пневмокамере больше создаваемого компрессорной станцией. Если компрессорная станция вырабатывает сжатый воздух с давлением 0.7 МПа, а насос развивает напор 30 м, то в камере № 2 можно получить давление сжатого воздуха 1.0 МПа. Регулируя производительность насоса, можно получить любое давление в пределах от 0.7 до 1.0 МПа.

Следовательно, при избранном режиме работы, когда обе камеры ГПА расположены на одном уровне, можно сконструировать гидропневматический аккумулятор с регулируемым давлением сжатого воздуха.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана и запатентована конструкция трехкамерного гидропневмоаккумулятора сжатого воздуха [10]. Поддержание постоянного повышенного давления сжатого воздуха при выключенных насосах обеспечивается за счет гидростатического давления столба жидкости между гидро- и пневмокамерами, что экономит электроэнергию, расходуемую на работу насосов, а отдельная работа двух пневмокамер позволяет организовать непрерывную подачу сжатого воздуха повышенного давления потребителям. Данная конструкция усовершенствована и на нее получен патент [11].

Технический эффект разработанных конструкций: сокращение времени зарядки пневмокамер, повышение давления сжатого воздуха и надежности работы гидропневмоаккумулятора с экономией электрической энергии.

## ВЫВОДЫ

Для эффективного и бесперебойного обеспечения потребителей пневматической энергией необходимо исключить отрицательное влияние колебаний давления сжатого воздуха в общешахтной воздухопроводной сети в течение смены. Наиболее эффективным способом стабилизации давления сжатого воздуха в рудничных воздухопроводных сетях, независимо от количества работающих потребителей сжатого воздуха, является гидропневматический аккумулятор.

Наличие гидропневматического аккумулятора на каждом руднике и шахте сокращает расход электроэнергии и повышает производительность труда. Поэтому разработка научно обоснованных рекомендаций по строительству подземных аккумулирующих хранилищ сжатого воздуха представляет одну из актуальных задач, от решения которой зависит экономическая перспектива дальнейшего развития пневматического оборудования в горной промышленности.

Разработана математическая модель гидропневмоаккумулятора сжатого воздуха, позволяющая изучить характер динамических процессов в его камерах при эксплуатации. Использование результатов математического моделирования рабочих процессов в шахтном гидропневмоаккумуляторе сжатого воздуха обеспечивает выбор конструктивных параметров соединительного водовода между его камерами, отвечающих рациональным значениям его динамических характеристик на стадии проектирования.

Создание дополнительного гидростатического давления за счет напора насоса, вмонтированного в водовод, повышает давление сжатого воздуха в пневмокамере ГПА по сравнению с давлением, создаваемым компрессорной станцией. При этом раздельная работа двух пневмокамер обеспечивает непрерывную подачу сжатого воздуха повышенного давления потребителям.

Изучение взаимосвязей параметров подсистемы резервирования пневматической энергии позволяет повысить работоспособность и надежность шахтных гидропневмоаккумуляторов сжатого воздуха.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ямковский Г. Т.** Техничко-экономическая эффективность применения высокого давления воздуха при бурении горных пород // Изв. вузов. Горн. журн. — № 7. — 1976.
2. **Иванов К. И., Латышев В. А., Андреев В. Д.** Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1990.
3. **Павлов В. Д., Мирошниченко В. К.** Опыт строительства и эксплуатации гидропневматических аккумуляторов в Финляндии // Горн. журн. — 1982. — № 6.
4. **Каменев Г. П., Салманов А. В.** Опыт строительства и результаты испытаний гидропневматического аккумулятора сжатого воздуха // Горн. журн. — 1989. — № 12.
5. **Лисовский Г. Д., Кумыкова Т. М.** Методика стабилизации режима работы шахтной пневмосети / Наука и образование — ведущий фактор стратегии “Казахстан-2030”: тр. IV Междунар. науч. конф. — Караганда: КарГТУ, 2001.
6. **Юдаев Б. Н.** Техническая термодинамика. Теплопередача. — М.: Высш. шк., 1988.
7. **Цейтлин Ю. А., Мурзин В. А.** Пневматические установки шахт. — М.: Недра, 1985.
8. **Чугеев Р. Р.** Гидравлика. — Л.: Энергоиздат, 1982.
9. **Предварительный патент РК на изобретение № 15534.** Гидропневматический аккумулятор сжатого воздуха / Т. М. Кумыкова, Г. Д. Лисовский // Оpubл. в БИ. — 2005. — № 3.
10. **Предварительный патент РК на изобретение № 19314.** Гидропневмоаккумулятор сжатого воздуха / Т. М. Кумыкова, В. Х. Кумыков // Оpubл. в БИ. — 2008. — № 4.
11. **Инновационный патент на изобретение РК № 25580.** Гидропневмоаккумулятор сжатого воздуха / Т. М. Кумыкова, В. Х. Кумыков, И. Н. Клапутина // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 3.

*Поступила в редакцию 5/IX 2013*