

Министерство образования Украины  
Донецкий государственный технический университет

На правах рукописи

МАРКОВ Николай Алексеевич

СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК С  
БАКОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ

Специальность 05.05.06 - Горные машины

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк

1994

Работа выполнена в Донецком государственном техническом университете.

Научные руководители: Лауреат Государственной премии СССР,  
доктор технических наук, профессор

**ГЕИЕР В.Г.**

Заслуженный работник высшей школы  
УССР, доктор технических наук,  
профессор

**ТИМОШЕНКО Г.М.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Груба В.И.;  
кандидат технических наук  
Свитлый Ю.Г.

Ведущее предприятие: научно-исследовательский институт  
горной механики им.М.М.Федорова

Защита диссертации состоится "11" ноября 1994 г. в 12 час.  
в аудитории 201 первого учебного корпуса на заседании специализиро-  
ванного совета Д068.20.02 при Донецком государственном техническом  
университете.

Адрес: 340000, Украина, г. Донецк, ул. Артема, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке  
Донецкого государственного технического университета.

Автореферат разослан "4" октября 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
доктор технических наук, профессор

**В.И.Черняев**

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00777106 (S) **В. Стефаніка**

Ан Укрспін

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется тем, что проблемы экономического развития Украины тесно связаны с совершенствованием энергетической базы, которая, в свою очередь, сильно зависит от состояния угольной промышленности Донбасса.

Хотя, в силу ряда факторов объективного характера, в настоящее время существенно осложнилось финансовое состояние отрасли в целом, альтернативы углю, как энергоносителю, на Украине пока нет. Поэтому задачи, связанные с "выживанием" каждого отдельного предприятия и всего угольного бассейна, могут решаться только путем повышения рентабельности шахт и конкурентноспособности продукции за счет снижения ее себестоимости. Последнее возможно на основе применения новых перспективных технологий, высокой степени механизации и автоматизации процессов. К сожалению, тенденции изменения горно-геологических условий на шахтах Донбасса (как и любого другого длительно разрабатываемого месторождения) таковы, что их влияние на отмеченные задачи носит ярко выраженный негативный характер.

К примеру, средняя глубина шахт в Донбассе за последние 20 лет удвоилась и составляет в настоящее время порядка 800 м. В связи с этим растут мощности подъемных установок, вентиляторов, создаются или расширяются системы кондиционирования воздуха, что приводит к резкому повышению себестоимости угля. С увеличением глубины наблюдается и увеличение общешахтного водопритока, который на некоторых шахтах достигает  $400 \text{ м}^3/\text{час}$  и более. В результате повышаются мощности шахтных водоотливных установок и возрастает их роль как важного элемента технологического комплекса шахты, обеспечивающего эффективное функционирование всего предприятия.

На шахтах ПО "Донецкуголь" основными насосами главного водоотлива являются насосы ЦНС 300-120...600, параметры которых требуют применения ступенчатой схемы откачки и иногда параллельной работы насосных агрегатов. В этих условиях должна быть обеспечена повышенная надежность каждого элемента рассматриваемой гидросистемы.

Как показывает анализ результатов эксплуатации главных шахтных водоотливных установок, отказы в их работе в большинстве

случаев, в прямом или косвенном виде, связаны с гидравлическими ударами в напорных трубопроводах или нарушениями во всасывающей линии. При этом в одних случаях происходят разгерметизация стана или срыв подачи, а в других - возникают неисправности насоса, которые выражаются в кавитационном износе и разрушении рабочих колес, смещении разгрузочного диска, обрыве кронштейна подшипника со стороны нагнетательного патрубка. Поэтому совершенствование всасывающей линии и обеспечение надежного функционирования установки в переходных режимах является важнейшей задачей, в решении проблемы улучшения работы водоотливного комплекса.

Цель работы - изучение закономерностей динамических процессов в трубопроводах шахтных водоотливных установок и создание на этой основе эффективных средств защиты гидросистем от гидравлических ударов, причем в гидросистему включается и всасывающая линия.

Идея работы состоит в применении для защиты гидросистемы водоотливной установки от гидравлических ударов устройства, формирующего интерференционную волну, гасящую колебания давления в напорном трубопроводе, в комплексе с использованием открытой всасывающей линии.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Доказано, что гидросистема шахтного водоотлива может быть защищена от гидравлического удара устройством, формирующим интерференционную волну в напорном трубопроводе.
2. Предложена методика выбора параметров гидропневматического аккумулятора (ГПА), как устройства, формирующего интерференционную волну, что позволяет существенно снизить необходимый объем газовой полости.
3. Доказано, что при гидравлическом ударе в гидросистеме водоотливной установки, построенной по традиционной схеме, во всасывающей линии возникает импульс повышенного давления.
4. Подтверждено, что применение бакового аккумулятора исключает негативное влияние гидравлического удара на всасывающую линию водоотливной установки.
5. Разработана методика, позволяющая выбрать минимально не-



необходимый объем бакового аккумулятора для конкретных параметров всасывающей линии.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- результатами исследований с использованием современной теории неустановившегося движения жидкости, законов гидромеханики, термодинамики и теоретической механики;
- результатами графо-аналитических расчетов, выполненных при общепринятых допущениях;
- результатами экспериментальных исследований, проведенными на промышленной установке с использованием современного регистрирующего оборудования и обработанными по стандартным методикам;
- итогами длительной эксплуатации водоотливных установок, оборудованных баковыми аккумуляторами и разработанными средствами защиты от гидравлических ударов.

Научное значение работы заключается в более глубоком познании особенностей динамических процессов в напорных трубопроводах водоотливной установки, их влияния на состояние потока жидкости во всасывающей линии, изучении закономерностей процесса заполнения водой всасывающей линии при пуске насосного агрегата, установлении особенностей гидравлического удара в водоотливной установке, позволяющих использовать для ее защиты интерференцию волн. Установленные закономерности являются теоретической основой создания имитационных моделей переходных процессов в гидросистеме водоотливной установки, которые служат основанием для предложенных методик выбора параметров средств защиты от гидравлических ударов и баковых аккумуляторов.

Практическое значение работы состоит в следующем.

I. В разработке:

- имитационных моделей динамических процессов, позволяющих определять параметры переходных процессов в гидросистеме водоотливной установки (снабженной предложенными средствами заливки насоса и защиты от гидроударов) и, на основе их анализа, найти основные характеристики устройства формирующего интерференционную волну и бакового аккумулятора;
- нового технического решения гасителя гидравлических ударов, выполненного в виде гидропневмоаккумулятора малого объе-

ма, формирующего интерференционную волну заданных параметров:

2. В использовании комплексного подхода к решению проблемы защиты гидросистемы водоотливной установки от гидроударов.

3. В упрощении алгоритма работы схемы автоматизации водоотлива.

4. В снижении, примерно на 15%, объема работ по ремонту и обслуживанию насосных установок шахтного водоотлива, снабженных предлагаемыми средствами защиты.

5. В освоении серийного выпуска баковых аккумуляторов, параметры которых рассчитываются по разработанной методике.

Реализация результатов работы. Практические результаты работы использованы на главной водоотливной установке шахты "Октябрьская", а всасывающие линии с баковым аккумулятором предложенной конструкции эксплуатируются на 10 шахтах ПО "Донецкуголь".

Программное обеспечение ЭВМ для определения параметров бакового аккумулятора и ГПА малого объема используется в объединении "Донецкуголь" и будет передано в институт "Донгипрошахт" для практического применения.

Имитационные модели для определения параметров гидравлического удара использованы в базе данных службы главного механика ПО "Донецкуголь" и Донецким государственным техническим университетом при подготовке студентов по специальности "Горные машины и комплексы".

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на I-й Всесоюзной конференции "Динамические процессы в горных машинах и стационарных установках", г.Тбилиси, 1990 год, на техническом Совете ПО "Донецкуголь" в 1994 г., на научно-техническом совете НИИГМ им.Федорова М.М. в 1994 г., на совместном заседании кафедр "Рудничные гидропневматические установки и гидравлика" и "Рудничные подъемные установки" Донецкого государственного технического университета в 1994 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе получено 2 вторских свидетельства.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она содержит 145 страниц машинописного текста, включает 31 рисунок, 2 таблицы, список литературы из 68 наименований, 1 приложение на 36 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

## I. Состояние вопроса и постановка задачи

Развитие угольной промышленности в целом невозможно без совершенствования такого важного элемента обслуживания технологического комплекса шахты, каким является водоотливная установка. В настоящее время водоотлив представляет собой сложный автоматизированный комплекс, надежная и эффективная эксплуатация которого является непременным условием жизнедеятельности и рентабельности всего угольного предприятия. Такое положение обусловлено в основном следующими обстоятельствами: требованиями безопасности горных работ; мощностью установленного оборудования; количеством потребляемой энергии. Последний фактор становится одним из определяющих в связи с общим удорожанием энергоносителей, которое в сочетании с экономически и технически несовершенными способами получения энергии уже привели к быстрому и значительному росту ее стоимости.

В настоящее время только на шахтах ПО "Донецкуголь" находится в эксплуатации свыше 630 водоотливных насосов, общая мощность привода которых превышает 300000 кВт. Протяженность напорных трубопроводов составляет сотни километров, их диаметр колеблется от 50 до 300 мм. Наиболее мощными являются главные водоотливные установки, которые откачивают на поверхность весь шахтный приток. Они оборудованы, как правило, насосами ЦНС 300-120...600 и электродвигателями мощностью до 800 кВт. Хотя срок службы этих насосов не превышает одного года при средней наработке на отказ 2-2,5 тыс. часов, они, по сравнению с другими насосами, (например, ЦНС 300-700...1000), удовлетворительно зарекомендовали себя в эксплуатации, их ремонт освоен механическими службами производственных объединений.

Как показывает анализ отказов на главных шахтных водоотливных установках, примерно в 80% случаев они связаны с насосом, а в остальном - это нарушения в напорном трубопроводе и во всасывающей линии: разгерметизация соединений, поломка арматуры, отказ элементов автоматизации и т.д.

Отметим, что с увеличением водопритоков часто появляется необходимость в параллельной работе насосов (когда среднечасовая

приток превышает  $250 \text{ м}^3/\text{ч}$  и подача одного насоса не обеспечивает откачку суточного притока за 20 часов, в соответствии с требованиями "Правил безопасности...", а более половины шахт объединения "Донецкуголь" имеют такой приток). На практике эта проблема часто решается путем простого включения второго насоса на тот же став. Это приводит к существенному увеличению скорости воды (в 1,8...1,9 раза) и пропорциональному увеличению степени повышения давления при гидроударе, возникающем в момент аварийного отключения насосных агрегатов.

Кроме того, гидравлический удар опасен как процесс, способный вызвать резонансные явления в вертикальном трубопроводе. Дело в том, что собственная частота колебаний трубопровода сильно зависит от осевого момента инерции трубы и меняется по мере ее износа. Она проходит за период эксплуатации широкий диапазон и в определенное время становится равной или кратной частоте гидроудара. В этом случае ослабленное сечение трубы может не выдержать динамических ударных нагрузок, возникающих при резонансе, и весьма вероятен порыв напорного става. Вода, обладающая высокой потенциальной энергией вследствие значительной высоты водоподъема, в месте разгерметизации способна вызвать вторичные аварии, нанести травмы обслуживающему персоналу.

Распределение трудозатрат на ремонт и обслуживание водоотливной установки, в среднем по шахтам ПО "Донецкуголь", показывает, что важнейшими проблемами на сегодняшний день, наряду с совершенствованием конструкции насоса, являются обеспечение его бескавитационной работы и эффективная защита всего водоотливного комплекса от гидравлических ударов.

Выполненный анализ показывает, что одним из факторов, способствующих повышению надежности работы водоотливных установок, можно считать применение всасывающей линии, отвечающей следующим требованиям:

- простота конструкции и ее малозлементность (исключение обратного клапана);
- минимально возможное и стабильное во времени гидравлическое сопротивление;
- постоянная готовность к запуску насосного агрегата.

С нашей точки зрения, наиболее полно указанным требованиям отвечает установка, снабженная баковыми аккумуляторами.

Как отмечалось выше, существенным фактором, влияющим на надежность работы оборудования водоотливной установки, является гидравлический удар, который наблюдается при внеплановых (аварийных) отключениях насосного агрегата.

Анализ способов защиты от гидроударов, в том числе выполненный с применением графоаналитического метода расчета, показал, что для защиты главных шахтных водоотливных установок, может быть использована идея интерференции волн. Но, в отличие от известных методов, обе волны перемещаются по одному трубопроводу, а в качестве устройства, формирующего сглаживающую волну, можно использовать гидропневматический аккумулятор сравнительно малого объема. При этом, основной задачей в выборе характеристик устройства, формирующего интерференционную волну нужной величины, является правильный расчет его аккумулялирующих способностей и гидравлического сопротивления соединительной линии.

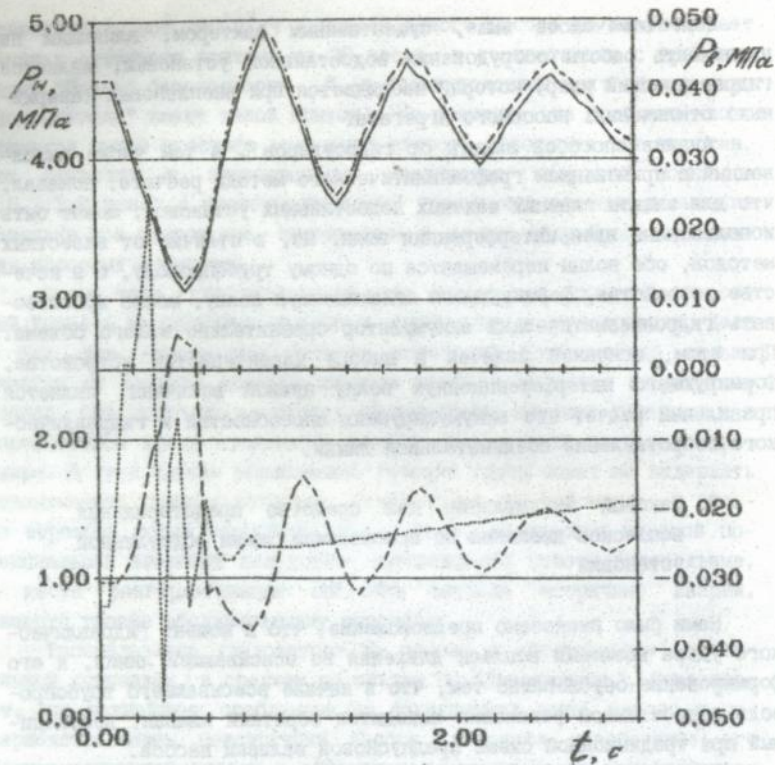
## 2. Баконий аккумулятор как средство предотвращения всплесков давления во всасывающей линии водоотливной установки

Нами было высказано предположение, что в момент гидравлического удара возможен всплеск давления во всасывающей линии, и его формирование обусловлено тем, что в начале всасывающего трубопровода водоотливной установки находится обратный клапан, необходимый при традиционной схеме предпусковой заливки насоса.

Сравнение осциллограмм, полученных при шахтном эксперименте на водоотливной установке, приведенных на рис. 1 и 2, подтверждает сказанное. Добиться исключения указанного всплеска давления, по нашему мнению, можно, отказавшись от применения обратного клапана, то есть изменив способ заливки насоса.

Сравнительный анализ возможных решений этой задачи позволил выбрать баконий аккумулятор, как наиболее подходящее средство для реализации намеченного изменения гидравлической схемы всасывающей линии.

Результатом проведенных теоретических исследований переходных процессов во всасывающей линии является методика выбора параметров баконий аккумулятора с учетом того, что на стадии проектирования необходимо знать его минимально необходимый объем,



нагнетательный трубопровод  
 — эксперимент  
 - - - расчет  
 всасывающая линия  
 ····· с обратным клапаном  
 - · - с баковым аккумулятором

Рис. I. Осциллограммы переходного процесса в водостливной установке шахты "Октябрьская" (горизонт 996 м)

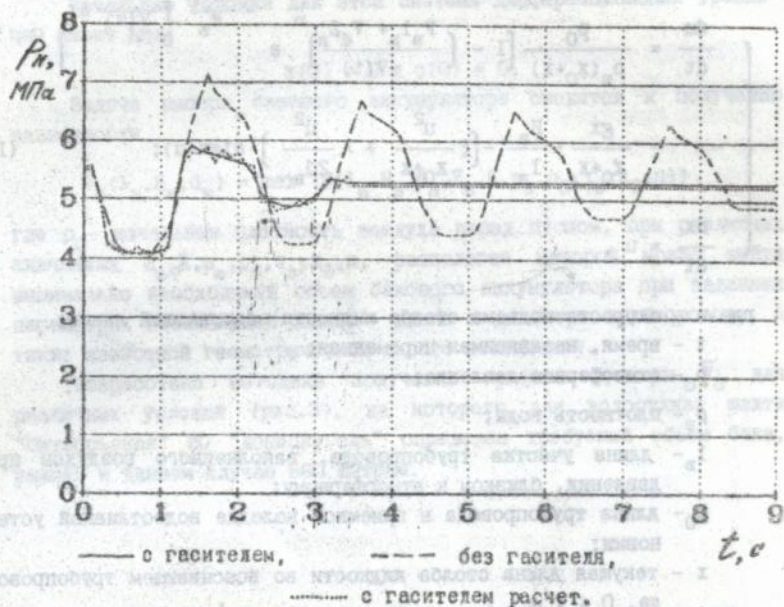


Рис.2. Оциллограммы переходного процесса в водоотливной установке шахты "Октябрьская" (горизонт 547 м)

обеспечивающий надежность запуска насоса во всей области изменения параметров установки.

При пуске насоса происходит подъем воды в его всасывающем трубопроводе. Емкость бакового аккумулятора должна обеспечить работу насоса до момента снижения давления в незаполненной части всасывающего трубопровода до величины, обеспечивающей подъем воды в верхнюю точку всасывающей линии.

Текущая длина столба жидкости в приемном колодце водоотливной установки определяется системой интегро-дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{p_0}{\rho_B(x_0+x)} \left[ 1 - \left( \frac{F_B l_B + V_0 Z_B}{V(t)} \right)^n e^{-\frac{KQ_0}{\tau_3} \int_0^t \frac{\tau}{V(\tau)} d\tau} \right] - \\ &- \frac{gx}{x_0+x} \cdot \frac{H_B}{l_B} - \left[ \xi \frac{u^2}{x_0+x} + \lambda \frac{u^2}{2d_B} \right] \cdot \text{sign}(u); \\ \frac{dx}{dt} &= u, \end{aligned} \right. \quad (I)$$

где  $u$  - скорость подъема столба жидкости всасывающей линии;

$t$  - время, независимая переменная;

$p_0$  - атмосферное давление;

$\rho_B$  - плотность воды;

$l_B$  - длина участка трубопровода, заполненного воздухом при давлении, близком к атмосферному;

$x_0$  - длина трубопровода в приемном колодце водоотливной установки;

$x$  - текущая длина столба жидкости во всасываемом трубопроводе,  $0 \leq x \leq l_B$ ;

$F_B$  - площадь сечения всасывающего трубопровода;

$Z_B$  - время запуска насосного агрегата;

$n$  - показатель политропы,  $1 \leq n \leq 1,4$ ;

$Q_0$  - расход жидкости при установившемся режиме работы;

$H_B$  - геометрическая высота всасывающей линии;

$\xi$  - коэффициент местного сопротивления входа всасывающего трубопровода при наличии только сетчатого фильтра  $\xi=1$

$\lambda$  - коэффициент Дарси, определяемый по формуле  $\lambda=0,021 \cdot d^{-0,3}$

$K$  - коэффициент эжекции эжектора бакового аккумулятора;

$\tau_3$  - время запуска насосного агрегата;

$V(t)$  - текущий объем воздуха во всасывающей линии,

$$V(t) = F_B (l_B - x);$$

$d_B$  - диаметр всасывающей линии.

Начальные условия для этой системы дифференциальных уравнений имеют вид:

$$x(0) = 0 \text{ и } u(0) = 0.$$

Задача выбора бакового аккумулятора сводится к получению зависимости

$$\bar{V}_0(l_B, H_B, d_B) = \max (F(l_B, H_B, d_B, Z_B, K, P_B, \rho_0, \tau_3, x_0, n))$$

где  $\rho_0$  - начальная плотность воздуха перед пуском, при различных значениях  $Z_B, K, P_B, \rho_0, \tau_3, x_0, n$ , располагая которой можно найти минимально необходимый объем бакового аккумулятора при заданных параметрах всасывающей линии - длине и диаметре трубопровода, а также известной геометрической высоте всасывания.

Разработана методика получения графика функции  $\bar{V}_0$  для различных условий (рис.3), из которого для водоотлива шахты "Октябрьская" ПО "Донецкуголь" определен требуемый объем бака, равный в данном случае 560 литрам.

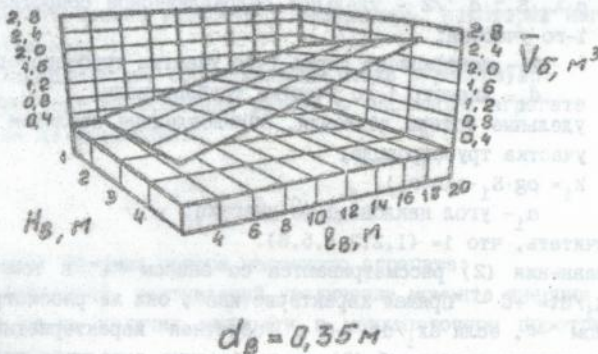


Рис.3. Зависимость величины минимально необходимого объема бакового аккумулятора от параметров всасывающей линии

### 3. Исследование динамических процессов в гидросистемах водоотливных установок

Многие исследователи для описания гидравлических ударов в трубопроводах водоотливных установок используют систему уравнений в частных производных гиперболического типа, которую рассматривают в характеристической форме:

$$\frac{dp_1(x_1, t)}{dx_1} \pm \frac{dQ_1(x_1, t)}{dx_1} \mp \frac{1}{c} \left( \frac{dQ_1}{dt} \pm n_1 Q_1 \right) |Q_1(x_1, t)| \pm k_1 = 0, \quad (2)$$

где  $p_1(x_1, t)$ ,  $Q_1(x_1, t)$  - функции, описывающие распределенные по длине 1-го участка давление и расход;

$x_1$  - пространственная координата,  $0 \leq x_1 \leq L_1$ ,  $L_1$  - длина 1-го участка;

$t$  - время, независимая переменная;

$\frac{1}{c} = \rho C / S_1$  - коэффициент волновой характеристики 1-го трубопровода;

$\rho$  - плотность жидкости;

$C$  - скорость распространения ударной волны;

$S_1$  - площадь сечения 1-го участка трубопровода;

$n_1 = \rho \cdot \lambda_1 \cdot S_1^{-2} \cdot d_1^{-1} / 2$  - удельное гидравлическое сопротивление 1-го участка;

$\lambda_1$  - коэффициент Дарси 1-го участка трубопровода;

$d_1$  - диаметр 1-го участка трубопровода;

$k_1$  - удельные потери давления, обусловленные наклоном каждого участка трубопровода;

$k_1 = \rho g \cdot S_1 \cdot \sin(\alpha_1)$ ,

$\alpha_1$  - угол наклона 1-го участка.

Будем считать, что  $i = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$ .

Уравнения (2) рассматриваются со знаком "+" в том случае, если  $dx_1/dt = +C$  - "прямая характеристика", они же рассматриваются со знаком "-", если  $dx_1/dt = -C$  - "обратная характеристика". Для решения системы уравнений (2) ее необходимо дополнить граничными и начальными условиями.

Признаком сохранения сплошности потока на стыке конструктивных участков будем считать условие

$$W_{j,j+1} = 0,$$

где  $W_{j,j+1}$  - объем каверны между участками  $j$  и  $j+1$ ;

$j$  - номер рассматриваемого конструктивного участка (значение  $j$ , с учетом принятых допущений, изменяется от 1 до 5).

При этом

$$Q_j(L_j, t) = Q_{j+1}(0, t); \quad (3)$$

$$P_j(L_j, t) = \rho g a_{j,j+1} Q_{j+1}(L_{j+1}, t) |Q_{j+1}(L_{j+1}, t)| + P_{j+1}(0, t),$$

где  $a_{j,j+1}$  - сосредоточенное сопротивление между участками (в частном случае  $a_{j,j+1}$  может равняться нулю).

Граничная зависимость в начале трубопровода определяется сопротивлением приемной решетки сетчатого фильтра  $a_p$ , величиной ее заглубления  $H_1$  в колодец водосборника и имеет следующий вид

$$P_1(0, t) = \rho g H_1 - \rho g a_p Q_1(0, t) |Q_1(0, t)|. \quad (4)$$

Давление и расход в конце нагнетательного трубопровода связаны между собой соотношением:

$$P_6(L_6, t) = \rho g (H_B + a_B Q_6(L_6, t) |Q_6(L_6, t)|), \quad (5)$$

где  $H_B$  - высота столба жидкости в резервуаре, в который нагнетается вода;

$a_B$  - гидравлическое сопротивление входа в резервуар.

Текущая частота вращения ротора  $\omega$  насосного агрегата может быть найдена из уравнения:

$$I \cdot k_I \frac{d\omega}{dt} = P_H \cdot Q_H \cdot \eta_H^{-1} \cdot \omega^{-1}, \quad (6)$$

где  $I$  - момент инерции ротора насосного агрегата;

$k_I$  - коэффициент, учитывающий увеличение момента инерции ротора из-за наличия жидкости в межлопаточном пространстве насоса;

$P_H$  - давление, создаваемое насосом;

$Q_H$  - подача насоса;

$\eta_H$  - коэффициент полезного действия.

$P_H$ ,  $Q_H$  и  $\omega$  связаны соотношением:

$$P_H = \rho g \left[ \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 H_0 + \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right) B' \cdot Q_H - C' \cdot Q_H^2 \right] \cdot Z, \quad (7)$$

где  $\omega_H$  - номинальная частота вращения ротора насосного агрегата;  
 $H_0$  - напор, создаваемый одним колесом насоса при нулевой подаче;

$B', C'$  - коэффициенты полинома, аппроксимирующего напорную характеристику насоса;

$Z$  - количество колес насоса.

Поскольку рассматривается полная схема трубопровода водоотливной установки, то есть учитывается и всасывающий трубопровод, уравнения (2), (6) и (7) необходимо решать совместно с выражениями

$$Q_2(L, t) = Q_3(0, t) = Q_H; \quad (8)$$

$$P_3(0, t) = P_2(L_2, t) + P_H. \quad (9)$$

которыми описываются граничные условия во всасывающем трубопроводе водоотливной установки в месте подключения насоса.

Таким образом, построены адекватная математическая и имитационная модели динамических процессов в гидросистеме водоотливных установок, которые позволили изучить влияние гидравлического удара в напорном трубопроводе на состояние потока во всасывающем трубопроводе.

#### 4. Защита водоотливных установок от гидравлических ударов при помощи гидропневмоаккумуляторов малого объема

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования указывают на то, что одним из наиболее перспективных способов защиты трубопроводов водоотливных установок от гидроударов является интерференция прямой и отраженной волн. Она позволяет исключить воздействие на трубопроводы как резкого повышения давления, так и периодической слабо затухающей дополнительной динамической нагрузки, возникающей при аварийном отключении насосного агрегата.

Рассмотрим граничные условия, формируемые гидропневмоаккумулятором в месте его монтажа, и дополним построенную выше имитаци-

онную модель уравнениями, которые определяют параметры потока на стыке конструктивных участков в точке подключения гидропневмоаккумулятора.

Баланс расходов в точке установки аккумулятора имеет вид:

$$Q_3(L_3, t) = Q_a + Q_4(0, t), \quad (10)$$

где  $Q_a$  - расход жидкости в гидропневмоаккумулятор.

Давление воздуха в гидропневмоаккумуляторе связано с давлением жидкости в трубопроводе соотношением:

$$p_3(L_3, t) = p_4(0, t) = (p_a(t) - 10^5) + \rho g_a Q_a |Q_a|, \quad (11)$$

где  $p_a$  - абсолютное давление воздуха в гидропневмоаккумуляторе.

Граничные условия (10), (11) необходимо рассматривать совместно с соотношениями (2), связывающими приращение давления и расхода на прямой и обратной характеристиках. Однако, полученная система уравнений не является замкнутой, поскольку количество неизвестных превышает количество уравнений. Для решения системы (2), (10), (11) ее необходимо рассматривать совместно с уравнением состояния газа в аккумуляторе. В данном случае будем считать, что при работе гидропневмоаккумулятора процессы происходят без значительного обмена энергией с окружающей средой, то есть адиабатно. В этом случае

$$p_a(t) \cdot W_a^{K_a}(t) = p_0 \cdot W_0^{K_a}, \quad (12)$$

где  $K_a = 1,4$  - показатель адиабаты;

$W_a(t)$  - текущий объем воздуха в гидропневмоаккумуляторе;

$p_0, W_0$  - соответственно давление и объем воздуха при установившемся режиме.

Очевидно, что  $p_0 = (p_3(L_3, 0) + 10^5) = (p_4(0, t) + 10^5)$  - абсолютное давление в точке подключения аккумулятора в установившемся режиме работы, при чем:

$$W_0 = W_{га} p_2 / p_{a0}, \quad (13)$$

где  $W_{га}$  - геометрический объем газовой полости аккумулятора;

$p_2$  - абсолютное давление начальной закачки газа в аккумулятор;

$p_{a0}$  - абсолютное давление жидкости в точке подключения ГПА при

стационарном режиме работы насоса.

Текущий объем воздуха в аккумуляторе определяется из соотношения

$$W_a(t) = W_0 - \int_0^t Q_a(\xi) d\xi, \quad (14)$$

где  $Q_a(\xi)$  – расход жидкости в ГПА.

Таким образом, получена полная система уравнений, описывающая граничные условия в точке установки аккумулятора с учетом сопротивления подводящей линии.

По результатам моделирования динамических процессов в водоотливной установке, защищенной гидропневмоаккумулятором малого объема, при различных значениях  $W_{га}$  и  $d_a$  построены зависимости  $\epsilon_{\max} = f(W_{га}, d_a)$  (см. рис. 4), где  $\epsilon_{\max} = P_{\max}(t)/P_0$ .

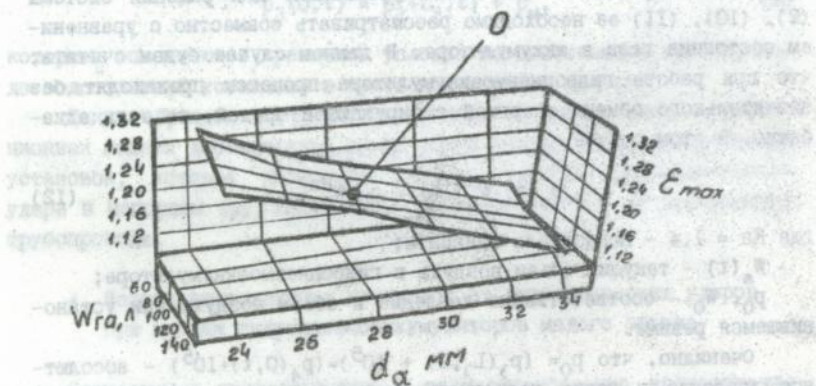


Рис. 4. Зависимость степени повышения давления  $\epsilon_{\max}$  в нагнетательном трубопроводе у обратного клапана от  $W_{га}$  и  $d_a$

Из рис.4 видно, что с уменьшением диаметра  $d_a$  дросселя и объема  $W_{га}$  аккумулятора степень повышения давления  $\epsilon_{max}$  увеличивается, и наоборот - при увеличении  $d_a$  и  $W_a$  - снижается. Допустимое правилами эксплуатации значение  $\epsilon_{max}=1,25$  достигается при  $d_a=28$  мм и  $W_{га}=100$  л.

Эффективность гидропневмоаккумулятора малого объема, как средства защиты шахтных водоотливных установок от гидравлических ударов, показывают графики изменения давления в различных точках напорного трубопровода, приведенные на рис.5-6. В качестве контрольных сечений при визуализации переходных процессов выбраны следующие:

- 1 - в начале участка на поверхности (у устья ствола);
- 2 - в середине ствола;
- 3 - в конце трубного ходка;
- 4 - за обратным клапаном на линии нагнетания насоса.

На рис.5 показаны графики изменения давления в незащищенном трубопроводе водоотливной установки горизонта 547 метров шахты "Октябрьская", полученные при моделировании процесса.

Из рис.5 видно, что в данном случае  $\epsilon_{max}=1,27$ , и такое повышение давления наблюдается в трубопроводе у обратного клапана (сечение 4), причем колебания давления слабозатухающие.

На рис.6 показаны графики изменения давления в тех же сечениях напорного трубопровода, защищенного аккумулятором малого объема с  $W_{га}=100$  л и  $d_a=28$  мм. Видно, что в этом случае колебания давления в трубопроводе носят аperiodический характер и относительное повышение давления равно 1,12, что меньше допустимого уровня ( $\epsilon_{max}=1,25$ ).

## 5. Экспериментальные исследования и внедрение

Во время шахтных испытаний решались следующие задачи:

- получение данных для оценки адекватности разработанных имитационных моделей;
- регистрация и анализ процессов во всасывающей линии насосного агрегата;
- проверка работоспособности и определение эффективности защиты гидросистемы водоотливной установки от гидравлического удара предлагаемым устройством;

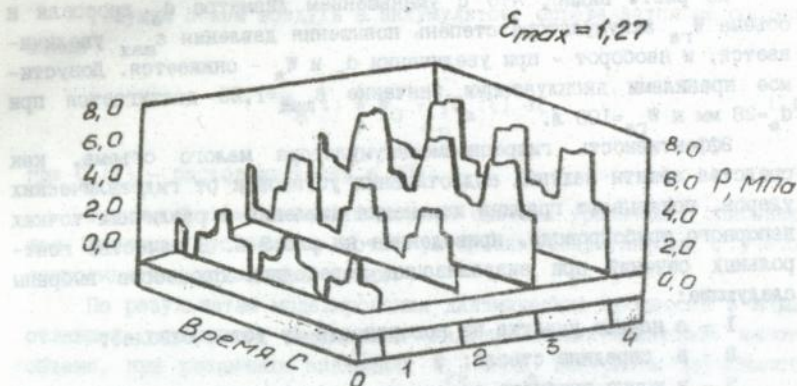


Рис.5. Графики изменения давления в контрольных сечениях нагнетательного трубопровода водоотливной установки без средств защиты от гидравлического удара

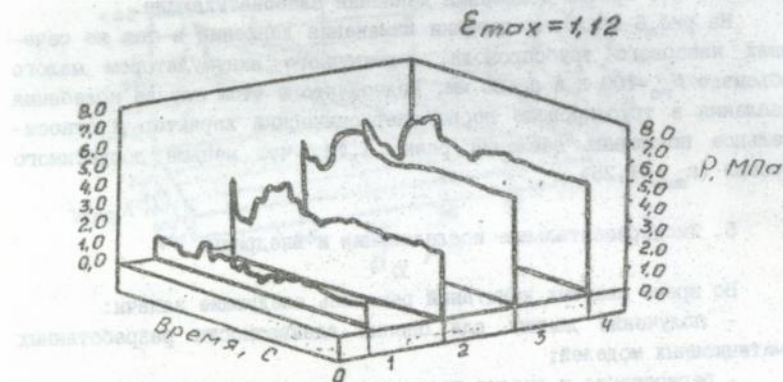


Рис.6. Графики изменения давления в контрольных сечениях нагнетательного трубопровода водоотливной установки с гасителем гидравлического удара

- выявление конструктивных и эксплуатационных недостатков предложенного устройства, получение информации для его совершенствования.

В качестве базы для проведения экспериментов была определена шахта "Октябрьская" ПО "Донецкуголь". При выборе руководствовались следующим:

- главная всдоотливная установка выполнена двухступенчатой с размещением агрегатов на горизонтах 995 метров и 547 м;

- установка оборудована наиболее распространенными в Украинском Донбассе насосами типа ЦНС 300-600;

- на установке представлены три наиболее характерные схемы всасывающих линий (с обратным клапаном, с баковым аккумулятором и с расположением насосов ниже уровня воды в водосборниках), что позволяет при минимальных затратах получить информации для сравнения различных схем;

- энергомеханической службой шахты отмечались случаи разгерметизации нагнетательных трубопроводов и повреждения приемного клапана предположительно от гидравлических ударов;

- установка оборудована дополнительным (третьим) резервным водоотливным ставом, что позволяет уменьшить тяжесть возможных последствий при возникновении аварийной ситуации.

Наиболее характерные осциллограммы, полученные во время испытаний, приведены на рис. 1 и 2.

В процессе эксплуатации предложенных средств защиты от гидравлических ударов и баковых аккумуляторов на шахтах ПО "Донецкуголь" выявлен ряд особенностей, которые следует учитывать при их конструировании и использовании.

Устройство защиты должно быть смонтировано за последним, по ходу потока, обратным клапаном и возможно ближе к нему. При этом следует обеспечивать доступы к кранам и клапанам для закачки скатого газа, норчируемые проходы и зазоры, необходимые для проведения ремонтных и других работ.

Присоединительный фланец устройства защиты следует располагать в верхней части трубопровода, что позволяет уменьшить количество твердых частиц, проникающих в полости гасителя. Ориентировать в пространстве аккумуляторы надо таким образом, чтобы твердые частицы при осаждении в покоящейся жидкости либо выходили из гасителя, либо могли быть удалены из него потоком при открытии,

промывочного крана. Подключение гасителя к защищаемому трубопроводу осуществляется через специальную коммутационную задвижку. Тип подводящего трубопровода (металлические трубы, гибкие высоконапорные рукава или их комбинация) не имеет большого значения, и может быть выбран для каждого случая с учетом конкретных обстоятельств.

Включение устройства в работу происходит при полном открытии коммутационной задвижки. После этого осуществляют контрольное испытание гасителя, для чего отключается питание электродвигателя работающего насоса при открытой задвижке на линии нагнетания. При этом контролируется давление в трубопроводе с помощью манометра. Косвенным признаком эффективной работы защиты от гидравлического удара является уменьшение хлопка при закрытии обратного клапана.

При использовании устройства защиты от гидравлических ударов необходимо, как показал опыт эксплуатации, один раз в неделю контролировать давление сжатого воздуха (давление закачки) в газовых полостях ГПА.

Следует также отметить, что нормально работающий гаситель позволяет исключить из алгоритма работы схемы автоматизации водоотливной установки операции по управлению задвижкой.

Для бакового аккумулятора наиболее целесообразной формой устройства является цилиндр с горизонтальной осью и минимальным габаритом по высоте. Баковым аккумулятором именно такой конструкции оборудована водоотливная установка шахты "Октябрьская" (гор. 995 м). Конструкция должна предусматривать патрубки для подвода и отвода воды (на одной оси), срывной - для предупреждения сифонного эффекта - заливочный, сливной - для слива воды из внутренней полости при ремонте насоса; кроме того, необходимы: лжк для очистки твердых отложений; водомерное стекло или трубка для контроля за уровнем воды в баке. В последнем случае может быть использован также датчик уровня с введением в схему автоматизации блокировки запуска насоса при снижении уровня воды в баковом аккумуляторе ниже допустимого и включения системы пополнения бака, которая может осуществляться из тех же источников, что и заливка насоса при традиционной схеме водоотлива, а именно: из противопожарного или нагнетательного трубопровода, из специальной емкости, с вышележащего горизонта, с помощью заливочного погружного насоса и т.д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что получено новое решение актуальной научной задачи, состоящей в разработке научных основ создания эффективных средств защиты гидросистем водоотливных установок от гидравлических ударов. Обоснована целесообразность широкого применения схемы водоотливной установки с баковым аккумулятором, налажен серийный выпуск этих устройств. Созданы простые и эффективные средства защиты водоотливных установок с баковыми аккумуляторами от гидравлических ударов.

В диссертационной работе получены следующие результаты.

1. Обоснована целесообразность использования бакового аккумулятора во всасывающей линии насоса водоотливной установки:

- во-первых, для улучшения условий эксплуатации насоса;
- во-вторых, для реализации открытой схемы всасывающей линии водоотлива, в котором становится возможным использование интерференции волны для защиты напорных трубопроводов от гидравлических ударов;

- в-третьих, для исключения возможности формирования всплесков давления во всасывающей линии при возникновении переходных процессов в напорном трубопроводе водоотливной установки.

Предложена математическая модель процесса заполнения водой всасывающей линии водоотливной установки с баковым аккумулятором.

Получены зависимости между конструктивными параметрами баковых аккумуляторов и характеристиками всасывающей линии. Их использование при проектировании позволяет обеспечить эффективную работу бакового аккумулятора даже при изменении внешних условий, о чем свидетельствует опыт эксплуатации этих устройств на шахтах ПО "Донецкуголь".

2. Разработана математическая и имитационная модели неустановившегося течения жидкости в гидросистеме водоотливной установки с учетом влияния динамических процессов в нагнетательном трубопроводе на состояние потока жидкости во всасывающей линии. Программа, реализующая разработанный метод расчета, ориентирована на применение ЭВМ и учитывает особенности и возможности используемых средств вычислительной техники.

Адекватность предложенной модели подтверждена путем сравне-

ния результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на действующей водоотливной установке. Максимальная ошибка моделирования равна 10%, что достаточно для выполняемых исследований.

3. Раскрыта физическая сущность процесса в системе "напорный трубопровод водоотливной установки - гидропневмоаккумулятор с согласующим дросселем".

Получены зависимости между характеристиками водоотливной установки и требуемыми параметрами гидропневмоаккумулятора для защиты от гидравлических ударов, который работает за счет интерференции волн в напорном трубопроводе. Разработаны математическая и имитационная модели динамических процессов в защищенном напорном трубопроводе водоотливной установки, во всасывающей линии которой смонтирован баковый аккумулятор и доказана эффективность гидропневмоаккумулятора с дросселем в соединительной магистрали, как средства защиты трубопроводов водоотливных установок от гидравлических ударов.

4. Рассмотрены практические вопросы эксплуатации водоотливных установок с баковыми аккумуляторами во всасывающей линии, которые защищены от гидравлического удара гидропневмоаккумуляторами малого объема.

Разработаны элементы аппаратуры для оценки эффективности применения средств защиты гидросистем водоотливных установок от гидравлических ударов и всплесков давления.

Разработана конструкторская документация для серийного производства баковых аккумуляторов на машиностроительных заводах объединения "Донецкуголь" и осуществлено широкое внедрение этих устройств на шахтах.

Рассмотрены вопросы создания средств защиты водоотливных установок с использованием серийно выпускаемых гидропневмоаккумуляторов, при минимальных доработках, обеспечивающих реализацию требуемых параметров. Эти устройства при использовании на шахтах объединения показали свою эффективность, что позволяет считать целесообразным самое широкое применение схемы водоотливной установки с баковым аккумулятором во всасывающей линии и гидропневмоаккумулятора малого объема, как средства защиты от гидравлических ударов.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Тимошенко Г.М., Марков Н.А. Создание средств защиты шахтных водоотливных установок от гидравлических ударов. -
2. Тимошенко Г.М., Овсянников В.П., Марков Н.А. Защита напорных трубопроводов водоотливных установок от гидравлических ударов // Тез. I-й Всесоюзной конференции "Динамические процессы в горных машинах и стационарных установках. - Тбилиси, 1989. - С.18-19.
3. Марков Н.А., Мизерный В.И., Полтавцев А.В. Реконструкция всасывающей системы шахтных насосов типа ЦНС // Уголь Украины. - 1989. - № 5. - С.29-30.
4. Яценко Н.И., Зима П.Ф., Марков Н.А., Бондаренко С.Н. Анализ существующих и разработка новых средств заливки многосекционных лопаточных насосов шахтного водоотлива / Донецк. политехн. ин-т. - Донецк, 1990. - 14 с. - Деп. в ЦНИИЗУголь, 20.04.90, № 5444-УП.
5. Малеев В.Б., Малыгин С.С., Марков Н.А., Мизерный В.И. Влияние месторасположения смесителя вакуумного эрлифта на его параметры / Киев, 1986. - Деп. в УкрНИИТИ, № 576.
6. А.с. 159 9585 (СССР) А1 F 04 D 9/00. Насосная установка с устройством для автоматической заливки насосов / Г.М.Тимошенко, Н.И.Яценко, П.Ф.Зима, Н.А.Марков, И.В.Власов, Ю.А.Матвеев (СССР), № 445 3843/31-29; Заявлено 06.07.88; Опубл.15.10.90. Бюл. № 38.
7. А.с. 1652732 (СССР) А1 F16 L 55/02. Гидравлический демпфер / Г.М.Тимошенко, Н.А.Марков, В.П.Овсянников, А.В.Гулин (СССР). № 4610 500/29; Заявлено 30.11.88; Опубл.30.05.91. Бюл. № 20.



МАРКОВ Николай Алексеевич. Создание средств защиты водоотливных установок с баковыми аккумуляторами от гидравлических ударов.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.06 - Горные машины, ДонГТУ, Донецк, 1994.

Защищается диссертационная работа, в которой содержатся теоретические исследования динамических процессов в гидросистемах шахтных водоотливных установок, а также результаты экспериментальных исследований.

Установлено, что в условиях угольных шахт целесообразно использовать схему водоотливной установки, в которой во всасывающей линии установлен баковый аккумулятор, а напорный трубопровод защищен от гидравлических ударов за счет интерференции волн. Осуществлено промышленное внедрение результатов работы.

Водоотливные установки, построенные по предложенной схеме и защищенные от гидравлических ударов, эксплуатируются на ряде шахт п/о "Донецкуголь".

Ключові слова : водовідливна установка, гідравлічний удар, захист, всмоктуюча лінія, баковий акумулятор

Nikolay A. MARKOV. The creation of water drainage protective means with tank battery storage from hydraulic impact. Thesis for a technical sciences candidate's degree on specialty 05.05.06 - Mining machines, DonSTU, Donetsk, 1994.

The thesis in which the theoretical analyzes of dynamic processes in hydraulic systems of mining water drainage units and also the results of experimental tests are defended.

It is established, that in the conditions of coal mines it's advisable to employ the scheme of water drainage units in which the tank battery storage is installed in section line, and pressure piping is defended from hydraulic impacts due to wave interference. The industrial introduction of the results of this work are implemented. Water drainage units manufactured on the suggested scheme and defended from the hydraulic impact are operated in a series of mines of CPA "Donetskugol".



MS. A. 9. 2. 1. 1. 1.

11542 11

AB 31.030

**AB 31.030**