

УДК 622.648.2.002.5-752

Витушко О.В., доктор техн. наук
(ООО «Шахтостроймонтаж»,
шахта Ольховая-Западная),**Дзюба С.В.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)**ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ
ЯВЛЕНИЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ
РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ****Вітушко О.В.**, доктор техн. наук
(ТОВ «Шахтостроймонтаж»,
Шахта Вільхова-Західна),**Дзюба С.В.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)**ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАПОБІГАННЯ РЕЗОНАНСНИМ
ЯВИЩАМ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ
РОБОТИ ГІДРОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ****Vitushko O.V.**, D. Sc. (Tech.)
(LLC «Shahtostroymontazh»
Mine Vilhova Zahidna),**Dziuba S.V.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)**RESEARCHES OF CONDITIONS FOR PREVENTING RESONANT
PHENOMENA IN CASE OF NON-STATIONARY MODES OF
HYDROTRANSPORTATING SYSTEM OPERATION**

Аннотация. В рамках изучения условий обеспечения надежного функционирования технологического оборудования горных предприятий определены резонансные характеристики гидравлических систем технологий добычи и переработки минерального сырья, в том числе подземных гидротехнических систем. Проведен анализ основных способов и средств защиты гидротранспортных систем от гидравлического удара, обеспечивающих их надежную эксплуатацию. Обоснован один из эффективных способов уменьшения упругих свойств транспортируемой по трубопроводу гидросмеси, таким образом, что достигается уменьшение значения модуля упругости гидросмеси, а именно: выпуск воздуха в ее поток, т. е. аэрирование, а уменьшение модуля упругости гидротранспортной системы – изменением упругих элементов, размещенных по магистрали. Установлено нарастание значения ударного давления с увеличением крупности транспортируемого твердого материала в трубопроводных магистралях малых диаметров.

Ключевые слова: напорные гидротранспортные системы, нестационарные процессы, подземные гидротехнические системы, резонансные явления.

Введение. В настоящее время разработка и освоение угольных и рудных месторождений осуществляется с использованием энергосберегающих техно-

логий добычи и переработки минерального сырья с учетом физико-технических методов для поддержания надежности эксплуатационных характеристик обогащательного оборудования. Так как основные месторождения полезных ископаемых в Украине характеризуются значительным обводнением добываемого минерального сырья и опережающей отработкой его активных запасов, то в рамках обеспечения регламентированного гидравлического режима и процессов гидротранспортирования в целом на горных предприятиях осуществляется комплекс мероприятий обеспечивающих непрерывность технологического цикла переработки полезных ископаемых. Периодические колебания давления и расхода в гидравлических системах имеют место при переходных процессах в трубопроводах. Соответственно выбор характеристик систем может приводить к появлению периодических возмущений, а в дальнейшем к возникновению резонанса [1]. Таким образом, актуальным является определение резонансных характеристик гидравлических систем технологий добычи и переработки полезных ископаемых, в том числе подземных гидротехнических систем.

Теоретическая часть. При изучении резонансных характеристик системы основные выводы сделаны при условии влияния на систему установившихся синусоидальных колебаний. Наиболее полной характеристикой гидродинамических процессов является отношение колебаний напора к колебаниям расхода в данном сечении – импеданс.

При анализе влияния нестационарных процессов в гидротранспортных установках на их надежность, прежде всего, следует отметить, что при существенном изменении плотности гидросмеси или неравномерности подачи гидросмеси в зумпфах грунтовых насосов возможны разрыв сплошности потока и столкновение встречных потоков, что приводит к превышению давления над давлением в установившемся режиме.

В этой связи с целью повышения надежности функционирования гидротранспортных установок подземных гидротехнических систем определяются количество ступеней и места размещения пульпонасосных станций, а также последовательность запуска и остановки насосов [2, 3, 4]. В частности, установлено, что запуск последовательно включенных насосов следует осуществлять в прямой последовательности, т.е. сначала головной, затем следующий за ним и т.д.; остановку последовательно включенных насосов следует осуществлять в обратной последовательности, т.е. сначала последний промежуточный, затем предшествующий ему промежуточный, а последний головной; оптимальный интервал между запусками и остановками последовательно включенных насосов, обеспечивающий минимальное превышение давлений в системе при переходных режимах, определяется из выражения

$$t \geq \frac{2L}{a} \quad (1)$$

где L – длина трубопровода, м; a – скорость распространения волны гидравлического удара, м/с.

Указанные выше последовательности запуска и остановки последовательно включенных насосов наиболее рациональны. Нарушение их может вызвать в системах резкие колебания давлений, когда значения последних при обратной последовательности запуска и прямой последовательности остановки могут превысить значения давления при установившемся режиме в несколько раз.

Для правильного расчета и подбора средств защиты гидротранспортных систем от гидравлического удара, обеспечивающих надежную эксплуатацию, необходимо определение ожидаемого превышения давления над давлением установившегося режима, зависящего от гидродинамических параметров гидросмеси и геометрических параметров трубопровода.

В настоящее время расчет превышения давления при гидравлическом ударе производится по формуле Н.Е. Жуковского, согласно которой превышение давления над давлением установившегося режима определяется согласно зависимости

$$\Delta p = a v_0 \rho_{см}, \quad (2)$$

где $\rho_{см}$ – плотность гидросмеси.

При движении однофазной жидкости

$$a = 1425 / \sqrt{1 + \frac{E_в}{E_{мп}} \frac{D_{мп}}{\delta_{мп}}}, \quad (3)$$

где $\delta_{мп}$, $D_{мп}$ – соответственно толщина стенки и диаметр трубопровода, м; $E_в = 2,1 \cdot 10^9$ – объемный модуль упругости воды, Па; $E_{мп}$ – модуль упругости материала, из которого изготовлен трубопровод, Па.

Согласно этой теории давление в трубопроводе при гидравлическом ударе определяется согласно зависимости

$$p = p_0 + \Delta p = p_0 + a v_0 \rho_{см}. \quad (4)$$

Отличие теории расчета напорных гидротранспортных систем, транспортирующих двухфазные (вода, твердые частицы сыпучего материала) и трехфазные (вода, твердые частицы сыпучего материала, свободный воздух) жидкости, от теории расчета систем, транспортирующих однофазные жидкости, заключается в определении скорости распространения волны гидравлического удара в трубопроводе [5-7]. Однако следует отметить, что полученные теоретические зависимости для определения скорости распространения ударной волны имеют

узкий диапазон использования и не учитывают взаимосвязи между рядом параметров, например, между объемным содержанием воздуха и давлением.

В ряде технологий подземной разработки месторождений полезных ископаемых проводится заполнение выработанного пространства твердеющей закладкой в потоке воды, подаваемой с дневной поверхности в шахту. При этом изменение концентрации гидросмеси приводит в некоторых случаях к закупорке трубопроводов, сопровождающейся резким изменением давления, т.е. имеет место гидроудар, приводящий к разрушению гидротранспортной системы (ГТС).

Превышение давления при гидравлическом ударе, в основном зависит от упругих свойств системы трубопроводов и транспортируемой гидросмеси. Поэтому при регулировании упругости системы и гидросмеси регулируется величина превышения давления в ГТС.

Наиболее эффективным способом уменьшения упругих свойств транспортируемой по трубопроводу гидросмеси, т.е. уменьшения модуля упругости гидросмеси, является впуск воздуха в ее поток, т.е. аэрирование, а уменьшение модуля упругости ГТС достигается изменением упругих элементов, размещенных по магистрали.

Впуск воздуха под атмосферным давлением или сжатого воздуха в систему перед ее остановкой является наиболее надежным способом предотвращения возникновения гидравлического удара в напорных трубопроводах.

В трубопроводах напорных гидравлических систем, работающих с грунтовыми насосами, гидравлические удары возникают, как правило, при остановке системы. Чтобы предотвратить эти явления и не допустить резкого повышения давления, необходимо за определенное время до остановки системы открыть запорное устройство (вентиль, пробковый кран и т. п.) во всасывающей части насоса, если впускается воздух под атмосферным давлением, или в нагнетательной части, если в трубопровод впускается сжатый воздух, и впустить необходимое количество воздуха в магистраль.

Продолжительность впуска воздуха определяют из условия

$$t \gg \frac{L}{a}. \quad (5)$$

Необходимо, чтобы за время t воздух прошел всю длину распространения ударной волны в магистральном трубопроводе, т.е. по всей длине поток рабочей среды должен быть аэрирован. Это интенсивно уменьшает гидравлический удар, при этом процесс становится быстро затухающим.

Наличие свободного нерастворенного воздуха в потоке гидросмеси существенно уменьшает скорость распространения волны удара в трубопроводе и, соответственно, превышение давления при нестационарных процессах по сравнению с установившимся режимом.

Оптимальным объемом нерастворенного воздуха, необходимым для уменьшения превышения давления до безопасной величины, является (0,25÷1,5) %

всего объема транспортируемой по трубопроводу гидросмеси. Такой объем нерастворенного воздуха позволяет существенно снизить колебания давления, однако не меняет режимы работы грунтовых насосов.

Известно, что между давлением при гидравлическом ударе и плотностью транспортируемой по напорному трубопроводу гидросмеси существует прямо пропорциональная зависимость.

Влияние плотности потока на величину превышения давления при гидравлическом ударе наиболее существенно в первых двух фазах колебательного процесса.

После первых двух фаз давление гидравлического удара значительно уменьшается ввиду того, что твердые частицы осаждаются на дно трубопровода. В результате этого увеличиваются потери давления по длине и, соответственно, процесс становится быстро затухающим. Экспериментальными наблюдениями доказано, что характер затухания волны гидравлического удара в потоке водогрунтовой гидросмеси и в потоке воды существенно отличается. Это становится более заметным с увеличением плотности гидросмеси и увеличением крупности твердого сыпучего материала.

С увеличением плотности гидросмеси и крупности твердого материала в потоке увеличивается также вероятность попадания свободного воздуха в трубопровод, следовательно, выделения газов и паров из жидкости, особенно в первых положительных фазах. Кроме того, в начальных фазах удара на дне трубопровода осаждается основная часть твердой фракции. Эти причины вызывают ускорение затухания колебательного процесса гидравлического удара в начальных положительных фазах.

При значительном увеличении плотности гидросмеси с твердой фазой средней крупности происходит ее неравномерное распределение в потоке не только по сечению, но и по длине трубопровода. Характер изменения давления гидравлического удара в таком случае существенно отличается от рассмотренных процессов. В трубопроводах гидротранспортных систем, как во время затухания гидравлического удара, так и в процессе гидротранспортирования могут иметь место закупоривания трубопровода, особенно при наличии крупнозернистого материала. В таких случаях в зависимости от продолжительности протекания процесса, как правило, происходит резкое повышение давления в трубопроводах. В результате трубопроводы, трубопроводная арматура, грунтовые насосы часто выходят из строя. Поэтому во избежание этого необходимо осуществлять противоударную защиту.

При гидравлическом ударе приращение тем больше, чем больше плотность потока гидросмеси. Кроме того, установлено нарастание значения ударного давления с увеличением крупности транспортируемого твердого материала в трубопроводных магистралях малых диаметров.

Выводы. В результате проведенного анализа основных способов и средств защиты гидротранспортных систем от гидравлического удара, обеспечивающих их надежную эксплуатацию, обоснован один из эффективных способов уменьшения упругих свойств транспортируемой по трубопроводу гидросмеси для

достижения уменьшения значения модуля упругости гидросмеси. При этом оценка параметров процесса гидротранспортирования в нестационарных режимах, является актуальной, для обоснованного выбора параметров насосного оборудования, гарантирующих сверхкритический режим транспортировки минерального сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий / А.Ф. Булат, О.В. Витушко, Е.В. Семененко. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.
2. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий // Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко [и др.]. – Днепропетровск: «Новая идеология», 2006. – 416 с.
3. Малеев, В.Б. Переходные процессы в насосах водоотлива при кавитации/ В.Б. Малеев, Н.И. Скорынин, А.А. Кудрявцев// Наукові праці Донецького національного технічного університету: Серія Гірничо-електромеханіка. Випуск 19(175) – Донецьк: ДонДТУ, 2010. – С. 111–117.
4. Семененко, Е.В. Применение полиэтиленовых труб для напорного гидротранспорта россыпей и руд / Е.В.Семененко, В.Д. Шурыгин // Инженерные сети из полимерных материалов. – 2007. – №3(21). – С. 18 – 22.
5. Определение скорости распространения волн давления в элементах глубоководного эрлифтного гидроропьяема/ О.Г. Гоман, Е.А. Кириченко, В.Е. Кириченко [и др.]/ Науковий вісник НГУ. – 2008. – Вип. № 9. – С. 77–81.
6. Blyuss, B. The calculation procedure of hydrotransport parameters of bulk solids using hydrodynamically active additives solutions / B. Blyuss, Eu. Semenenko, N. Nykyforova. // Papers presented at the 14th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, June 23 – 27, 2008, Saint Petersburg, Russia. – Pp. 41 – 48.
7. Matoušek, V. Concentration distribution in pipeline flow of sand-water mixtures / V. Matoušek // Journal of Hydrology and Hydromechanics. – 2000. – Vol. 48, No 3. – P.p. 180 – 196.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Vitushko, O.V. and Semenenko, E.V. (2010), *Modeli elementov gidrotekhnicheskikh sistem gornykh predpriyatiy* [Models of elements of hydrotechnical systems of the mountain enterprises], Gerda, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Baranov, Yu.D., Blyuss, B.A., Semenenko, E.V. and Shurigin, V.D. (2006), *Obosnovanie parametrov irezhimov raboty sistem gidrotransporta gornykh predpriyatiy* [Justification of parameters and working hours of systems of hydrotransport of the mining enterprises], Novaya ideologiya, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Maleev, V.B., Skorynin, N.I. ND Kudryayvtsev, A.A. (2010), “Transients in dewatering pump cavitation”, *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu: Seriya geologicheskaya Series of Girnicho-elektromekhanika*, no. 19(175), pp. 111-117.
4. Semenenko, E.V. and Shurigin, V.D. (2007), “The use of polyethylene pipes for pressure hydrotransport placers and ore”, *Inzhenernye seti iz polimernykh materialov*, no. 3(21), pp. 18 – 22.
5. Goman, O.G., Kirichenko, E.A. and Kirichenko, V.E. (2008), “Determination of the velocity of propagation of pressure waves in deep-water airlift elements hydroascent”, *Naukovyi visnyk NGU*, no. 9, pp. 77 – 81.
6. Blyuss, B., Semenenko, Eu. and Nykyforova, N., (2008), “The calculation procedure of hydrotransport parameters of bulk solids using hydrodynamically active additives solutions”, Papers presented at the 14th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Saint Petersburg, Russia, pp. 41 – 48.
7. Matoušek, V. (2000), “Concentration distribution in pipeline flow of sand-water mixtures”, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 48, no. 3, pp. 180 – 196.

Об авторах

Витушко Олег Викторович, доктор технических наук, ООО «Шахтостроймонтаж», главный инженер шахты «Ольховая Западная», igtmanu@yandex.ua.

Дзюба Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела геодинамических систем и вибрационных технологий, Институт гео-

технической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, igtmnanu@yandex.ua.

About the authors

Vituhko Oleg Viktorovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Main engineer of mine LLC «Shahtostroyontazh» Vilhova Zahidna, igtmnanu@yandex.ua.

Dziuba Sergej Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Geodynamic System and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ua.

Анотація. В рамках вивчення умов забезпечення надійного функціонування технологічного обладнання гірничих підприємств визначені резонансні характеристики гідравлічних систем технологій видобутку та переробки мінеральної сировини, в тому числі підземних гідротехнічних систем. Проведено аналіз основних способів і засобів захисту гідротранспортних систем від гідравлічного удару, що забезпечують їх надійну експлуатацію. Обґрунтовано один з ефективних способів зменшення пружних властивостей транспортування по трубопроводу гідросуміші, таким чином, що досягається зменшення значення модуля пружності гідросуміші, а саме: впуск повітря в її потік, тобто аерування, а зменшення модуля пружності гідротранспортної системи – зміною пружних елементів, розміщених по магістралі. Встановлено наростання значення ударного тиску зі збільшенням крупності транспортованого твердого матеріалу в трубопровідних магістралях малих діаметрів.

Ключові слова: напірні гідротранспортні системи, нестационарні процеси, підземні гідротехнічні системи, резонансні явища

Abstract. Within the framework of study of conditions ensuring reliable operation of process equipment in the mining enterprises resonance characteristics were specified for hydraulic systems and underground hydraulic systems in particular which are used by mineral mining and processing technologies. Main methods and facilities for protecting the hydraulic systems against hydraulic impact and ensuring their safe operation were analyzed. The article describes one of the effective methods which reduces elastic properties of the slurry transported by the pipeline. Purpose of the method is to reduce slurry elastic modulus by injecting air into the slurry flow, i.e. aeration, and to reduce elastic modulus of the hydrotransporting system by changing of elastic elements located along the main pipeline. It is stated that the bigger is a size of solid materials transported by the pipeline with small diameter the greater is impact pressure.

Keywords: pressure hydrotransporting systems, non-standard processes, underground hydrotechnical systems, resonance phenomena.

Статья поступила в редакцию 08.10.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым