

23. Бовенко В.Н. Основные положения автоколебательной модели предразрушающего состояния твердых тел / В.Н. Бовенко // ДАН СССР. – 1986. – Т.286, №5. – С. 1097–1101.
24. Электромагнитное излучение горной породы в условиях взрывного нагружения / [М.Б. Гохберг, И.Л. Гуфельд, О.В. Козырева и др.] // ДАН СССР. – 1987. – Т.295, № 2. – С. 321–325.
25. Бовенко В.Н. Связь автоакустической эмиссии с предразрушающим состоянием кристалла / В.Н. Бовенко // ДАН СССР. – 1983. – Т.271, №5. – С. 1086–1090.
26. Исаков А.Л. О механизме разрушения кристаллов при взрывном воздействии / А.Л. Исаков, В.Н. Белобородов // Физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископ. – 1991. – № 5. – С. 47–56.
27. Ефремов Э.И. О механизме измельчения взрывом многокомпонентных твердых сред с включениями зерен минералов / Э.И. Ефремов, В.А. Никифорова, А.И. Сердюк // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: ГГАУ, 1995. – С. 74–79.

**УДК 622.648.24 – 192:622.7.06**

Д-р техн. наук Е.В. Семененко,  
канд. техн. наук О.А. Медведева  
(ИГТМ НАН Украины)

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Гідротехнічні системи технологій збагачення мінеральної сировини проаналізовано як об'єкт теорії надійності, виділено рівні формування надійності, сформульовано критерії надійності, вказано характерні періоди оцінки надійності, а також запропоновано метод розрахунку показників надійності систем, що розглядаються, на розрахунковий період.

## **ELABORATION OF METHODS OF RELIABILITY EVALUATION OF HYDROENGINEERING SYSTEMS FOR MINERAL CONCENTRATION TECHNOLOGIES**

Hydroengineering systems of mineral concentration technologies were analyzed as an object of reliability theory, levels of reliability formation were marked out, reliability criterions were formulated, specific periods of reliability evaluation were indicated, method of calculation of reliability indexes of systems under consideration for projected period was offered.

В настоящий момент надежность технологических систем и технических средств представляет отдельную отрасль научных знаний, для которой существуют характерные методы и приемы, определены понятия и принципы, сформулированы критерии и теоремы, признанные классическими и имеющие универсальный характер [4 – 10].

Именно поэтому при рассмотрении вопросов надежности конкретного объекта всегда является первостепенным и наиболее важным следующее: определение места этого объекта в сложившейся системе понятий и принципов теории надежности; характеристика его как объекта теории надежности; обоснование показателей и уровней надежности; описание методов расчета и оценки показателей надежности; выбор в жизненном цикле объекта этапов оценки, формирования и обеспечения надежности.

Объект исследования – эффективность и надежность гидротехнических систем технологий обогащения минерального сырья.

Цель работы – разработка методов оценки надежности гидротехнических си-

стем для технологий обогащения минерального сырья.

Гидротехнические системы технологий обогащения минерального сырья (ГСТОМС), с точки зрения теории надежности, являются сложными объектами, с соответствующей иерархией, включающими в себя в качестве подсистем: гидротранспортные комплексы; установки обратного водоснабжения; добычные технологические комплексы; хранилища отходов (ХО) обогащения; водохранилища; обогатительные фабрики (ОФ); систему отведения отходов обогащения; систему складирования отходов обогащения.

Таким образом, надежность ГСТОМС, наиболее правильно оценивать согласно принципам и методам оценки надежности технологических систем, согласно соответствующим нормативным документам [7 – 10]. В этом случае надежность ГСТОМС определяется как надежность сложных технологических систем на разных уровнях и по различным показателям [8, 9]. При этом руководствуются известными нормативными документами [7, 10], принципами и правилами системного подхода, требованиями экологической безопасности и охраны труда, а также существующими отраслевыми нормами и условиями технологических регламентов.

С учетом сформулированных принципов надежности иерархия ГСТОМС может быть представлена в следующем виде:

- верхний уровень надежности – надежность ГСТОМС как технологической системы, которая характеризуется показателями надежности по качеству готовой продукции и показателями надежности по объему производства [8, 9];
- нижний уровень надежности – надежность элементов ГСТОМС как технических средств и технологического оборудования, которая характеризуется показателями безотказности, работоспособности и ремонтпригодности, а также комплексными показателями надежности каждого элемента технологической системы [4– 6].

Надежность ГСТОМС на нижнем уровне обеспечивается надежностью установленного оборудования, выбором системы планово-предупредительных ремонтов и обеспечивается силами ремонтных бригад и служб технического обслуживания. Этот уровень достаточно хорошо изучен в отечественной и мировой практике.

В данной работе рассматривается надежность ГСТОМС на верхнем уровне, на котором она обеспечивается согласованностью параметров и режимов работы элементов технологической системы, а также потенциальной возможностью эксплуатации технологий, используемых в подсистемах, в сложившихся технологических, экономических и экологических условиях.

В отличие от традиционного подхода к большему числу технологических систем, для которых надежность закладывается на этапе проектирования, а обеспечивается и поддерживается на стадии эксплуатации, надежность ГСТОМС закладывается как на этапе проектирования, так, и в процессе эксплуатации. Это обусловлено следующими факторами: длительностью периода эксплуатации ГСТОМС; существенной разницей в ресурсах элементов ГСТОМС; периодическими изменениями параметров ГСТОМС, определяющих функцио-

нальную надежность; возможными вариациями параметров и режимов работы элементов и подсистем ГСТОМС между периодическими изменениями основных параметров.

Наиболее яркими примерами таких изменений и таких параметров являются [2]: периодическое изменение длин магистралей гидротранспортного комплекса в результате переноса головной пульпонасосной станции (ПНС) вслед за фронтом горных работ; изменение количества ПНС и их мест размещения на магистрали; начала новой карты намыва на данной геодезической отметке ХО; переход складирования отходов на новую геодезическую отметку дамбы хранилища; реорганизация системы отведения отходов за счет установки других насосов; внедрение системы сгущения пульп на ОФ; модернизация системы оборотного водоснабжения путем включения бустерных насосов; ввод в эксплуатацию узла предварительного обогащения.

Отличительной особенностью изменений основных параметров ГСТОМС являются существенные капитальные затраты соответствующих элементов системы. Между периодическими изменениями основных параметров капитальные затраты отсутствуют или же минимальны, доминирующими в этот период являются эксплуатационные затраты. В процессе же изменения основных параметров, эксплуатационные затраты минимальны, пренебрежимо малы по сравнению с капитальными затратами, поскольку в этот период элемент системы не функционирует.

Из вышеприведенного очевидно, что уровень надежности ГСТОМС может оцениваться на разных этапах жизненного цикла. Отличительной особенностью рассматриваемого объекта является «тотальная» зависимость уровня надежности от основных параметров. В процессе эксплуатации надежность ГСТОМС может оцениваться средствами мониторинга, по данным технологического и коммерческого учета, а также на основе результатов анализов записей в журналах учета соответствующих служб. Однако эта оценка будет справедливой только в границах соответствующего изменения основных параметров ГСТОМС. При очередном изменении, которое неизбежно происходит по завершению периода, справедливость полученных показателей и оценок надежности необходимо обосновывать, уточнять или же их нужно определять заново.

С учетом этого, а также согласно известных требований и формулировок нормативных документов по надежности технологических систем [7 – 10], надежность ГСТОМС прежде всего определяется вероятностью выполнения заказа в течение оговоренного времени, то есть – поставки на склад заданного объема концентрата с характеристиками, соответствующими существующим техническим нормам, при условии, что основные параметры ГСТОМС не изменяются, полученные в результате этого объемы твердых и жидких отходов обогащения могут быть складированы в хранилище без нарушения существующих экологических норм и правил, а также без нарушения режима работы системы оборотного водоснабжения.

Требования надежности для ГСТОМС могут быть ужесточены условиями, чтобы при выполнении указанного события эксплуатационные и капитальные

затраты не превысили регламентированных значений.

Поскольку подсистемы ГСТОМС, указанные в формулировке, иерархически соединены последовательно, то вероятность выполнения заказа выражается через вероятности выполнения технологического задания соответствующих подсистем по формуле:

$$P = P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6, \quad (1)$$

где  $P_1$  – вероятность получения ОФ заданного объема концентрата с характеристиками, соответствующими существующим техническим нормам;  $P_2$  – вероятность того, что полученный объем отходов поместится в ХО;  $P_3$  – вероятность осветления заданного объема оборотной воды;  $P_4$  – вероятность сгущения заданного объема отходов;  $P_5$  – вероятность обеспечения гидротранспортным комплексом требуемой производительности по пульпе и твердому материалу;  $P_6$  – вероятность обеспечения системой оборотного водоснабжения требуемой подачи требуемого объема воды.

Вероятность получения ОФ заданного объема концентрата с характеристиками, соответствующими существующим техническим нормам, определяется зависимостью сепарационной характеристики ОФ от объема поступающих исходных песков, объемной доли в них ценного компонента, а также объемным расходом оборотной воды [1, 2]. При этом для рассматриваемых параметров устанавливаются интервалы изменения, внутри которых вероятность  $P_1$  остается выше требуемой величины:

$$\langle \alpha_0 \rangle \leq \alpha_0 \leq \alpha_0 ; \quad \langle Q_T \rangle \leq Q_T \leq Q_T ; \quad \langle Q_W \rangle \leq Q_w + Q_0 + Q_v \leq Q_W , \quad (2)$$

где  $\langle \alpha_0 \rangle$  – минимально допустимое значение объемной доли минералов в исходных песках;  $\alpha_0$  – объемная доля минералов в исходных песках;  $\phi_0$  – максимально допустимое значение объемной доли минералов в исходных песках;  $\langle Q_T \rangle$  – минимально допустимое значение объемной подачи исходных песков на ОФ;  $Q_T$  – объемная подача исходных песков на ОФ;  $\Phi_T$  – максимально допустимое значение объемной подачи исходных песков на ОФ;  $\langle Q_W \rangle$  – минимально допустимое значение расхода воды, подаваемой на ОФ;  $Q_w$  – расход воды, подаваемой в технологию вместе с исходными песками;  $Q_0$  – расход воды, отбираемой из водохранилища в ОФ;  $Q_v$  – расход воды, подаваемой на ОФ из других источников;  $\Phi_W$  – максимально допустимое значение расхода воды, подаваемой на ОФ.

Величина расхода  $Q_v$  для условий ОФ, перерабатывающих руды черных и редкоземельных металлов, а также полиметаллические россыпи, может быть принята пропорциональной суммарному расходу воды, подаваемой в техноло-

гию вместе с исходными песками и из водохранилища:

$$Q_v = b Q_w + Q_0, \quad (3)$$

где  $b$  – коэффициент пропорциональности ( $b < 1$ ).

С учетом выражения (3), получим неравенство в виде:

$$\langle Q_w \rangle \leq 1 + b Q_w + Q_0 \leq Q_w. \quad (4)$$

Вероятность того, что полученный объем отходов поместится в ХО, определяется соотношением доступного объема хранилища и суммарного объема складирования отходов за рассматриваемый период. С учетом рассмотренных в [1] моделей систем «ОФ – ХО» это условие может быть записано в следующем виде:

$$H_S \leq k_H H_W; \quad H_W \leq H_W^*; \quad (5)$$

$$\int_0^{H_W} F_w dz = A_w \int_0^T Q_w dt + A_0 \int_0^T Q_0^W dt - A_T \int_0^T Q_T dt; \quad (6)$$

$$\int_0^{H_S} F_S dz = \frac{1 - \alpha}{m} \int_0^T Q_T dt. \quad (7)$$

где  $H_S$  – высота текущего дна ХО, границы раздела между твердой и жидкой фазами;  $k_H$  – коэффициент, учитывающий наличие слоя воды на дном ХО, предотвращающего унос ветром пылеватых и глинистых фракций;  $H_W$  – текущая высота зеркала воды;  $H_W^*$  – допустимая высота зеркала воды;  $T$  – текущий период эксплуатации;  $Q_0^W$  – объем отбираемой из ХО осветленной воды;  $t$  – время;  $m$  – пористость отходов обогащения после укладки в ХО;  $F_S dz$  – функция, описывающая зависимость текущей площади поперечного сечения ХО, занятого твердой фракцией от высоты зеркала воды;  $F_w dz$  – функция, описывающая зависимость текущей площади поперечного сечения ХО, занятого жидкой фракцией от высоты зеркала воды;  $A_w, A_0, A_T$  – коэффициенты, определяемые типом ОФ и ХО;  $z$  – высота зеркала воды.

Вероятность осветления заданного объема оборотной воды определяется скоростью осаждения твердых частиц, превышением уровня осветленной воды над уровнем борта перелива, а также обеспечением безопасности эксплуатации ХО и гарантией предотвращения его разрушения при эксплуатационном переливе отстойного пруда.

Для каждой отметки верха дамбы ХО это возможно, если выполняется следующая система неравенств:

$$H_S \leq H_H \leq H_W; H_S \leq k'_H H_H; H_H \leq k''_H H_W; \int_0^L \frac{w_s}{v_s} dx > H_S - H_H, \quad (8)$$

где  $H_H$  – геодезический уровень борта перелива;  $k'_H$  – коэффициент, допустимое превышение уровня борта перелива над геодезической отметкой дна ХО;  $k''_H$  – коэффициент, допустимое превышение текущей высоты зеркала воды в ХО над уровнем борта перелива;  $L$  – расстояние от точки сброса пульпы до борта перелива;  $w_s$  – разница гидравлической крупности твердых частиц и вертикальной скорости воды;  $v_s$  – скорость твердых частиц в горизонтальном направлении;  $x$  – текущая координата.

В общем случае рассматривается система дифференциальных уравнений, аналогичная математической модели течения гидросмеси в вертикальном ступителе гравитационного типа со слоем перелива.

Исходя из общей концепции безопасной эксплуатации гидроотвалов [11], складирование отходов обогащения путем их намыва на пляж должно осуществляться при обеспечении на протяжении всей эксплуатации требуемого превышения гребня намывной дамбы хранилища над уровнем воды отстойного пруда и необходимой ширины пляжа. При этом обеспечивается безопасностью эксплуатации хранилища и гарантируется его целостность при эксплуатационном переливе отстойного пруда, который может производить недопустимое загрязнение окружающей среды [11]:

$$\Delta H > \Delta H_{\text{доп}}; \quad L > L_{\text{доп}}, \quad (9)$$

где  $\Delta H$  – текущее превышение гребня намывной дамбы ХО над уровнем воды отстойного пруда;  $\Delta H_{\text{доп}}$  – допустимая величина превышения гребня намывной дамбы ХО над уровнем воды отстойного пруда;  $L$  – текущая ширина пляжа;  $L_{\text{доп}}$  – допустимая величина ширины намываемого пляжа ХО.

Величины  $\Delta H$  и  $L_{\text{доп}}$  являются контрольными величинами, определяемыми расчетным путем. Эти величины являются технологическими критериями оценки безопасности эксплуатации ХО, так как они формируются в процессе укладки хвостов и свойствами хвостовой пульпы, транспортируемой к месту укладки. Таким образом, надежность процесса укладки отходов обогащения характеризуется следующими коэффициентами:

$$k_h = \frac{\Delta H}{\Delta H_{\text{доп}}}; \quad k_l = \frac{L}{L_{\text{доп}}}. \quad (10)$$

Вероятность сгущения заданного объема отходов определяется технологическими характеристиками узла сгущения, которые характеризуются свойствами твердых частиц и их объемным расходом, объемом подаваемой с пульпой жидкости, а также технологическими требованиями к узлу. Технологические

характеристики узла сгущения комплексно учитывают степень сгущения пульпы отводимой с ОФ ( $\sigma$ ), а технологические требования, могут быть сформулированы в виде одного из следующих условий: обеспечение возврата в технологию требуемого объема оборотной воды; ограничение объема воды, подаваемой в ХО; ограничение объема пульпы, подаваемой в ХО; обеспечение объемной расходной концентрации пульпы, подаваемой в ХО.

В некоторых случаях к работе узла сгущения предъявляются одновременно несколько из вышеперечисленных технологических требований.

Необходимость обеспечения возврата в технологию требуемого объема оборотной воды может быть сформулирована в виде следующего неравенства:

$$Q_{\sigma} \geq k_{\sigma} Q_W, \quad (11)$$

где  $Q_{\sigma}$  – объем воды, направляемой на ОФ после сгущения отходов обогащения;  $Q_W$  – суммарный объем воды, направляемый на ОФ;  $k_{\sigma}$  – коэффициент, показывающий какую долю от объема воды, подаваемой на ОФ, компенсирует узел сгущения.

При ограничении объема воды, подаваемой в ХО, рассматривается условие:

$$Q_X^W \leq 1 - k_{\sigma} \bar{Q}_W, \quad (12)$$

где  $Q_X^W$  – объем воды, поступающей в ХО после сгущения пульпы.

Ограничение объема пульпы, подаваемой в ХО, выражается в следующем виде:

$$Q_X \leq \Phi, \quad (13)$$

где  $Q_X$  – расход пульпы, поступающей в ХО после сгущения;  $\Phi$  – допустимый по нормам укладки отходов и правилам эксплуатации хранилища, расход пульпы, поступающей в ХО после сгущения.

В случае, когда технологические требования накладываются на объемную расходную концентрацию пульпы, подаваемой в ХО, то рассматривается условие в виде неравенства:

$$C_P^X \geq \Phi_P, \quad (14)$$

где  $C_P^X$  – объемная расходная концентрация пульпы, поступающей в ХО после сгущения;  $\Phi_P$  – минимально допустимая объемная расходная концентрация пульпы, поступающей в ХО после сгущения.

Вероятность обеспечения гидротранспортным комплексом требуемой производительности по пульпе и твердому материалу определяется близостью рабочей точки гидротранспортной установки при перекачивании гидросмеси заданной концентрации к требуемой подаче пульпы:

$$\left| \frac{Q - Q_P}{Q_P} \right| \leq \delta_Q; \quad \left| \frac{\rho_T Q_T - G_P}{G_P} \right| \leq \delta_G, \quad (15)$$

где  $Q$  – текущий объемный расход пульпы на ОФ;  $Q_P$  – регламентированный объемный расход пульпы на ОФ;  $\delta_Q$  – допустимое относительное отклонение объемного расхода пульпы, поступающего на ОФ, от регламентированного значения;  $G_P$  – регламентированный грузопоток исходных песков на ОФ;  $\rho_T$  – плотность исходных песков, т/м<sup>3</sup>;  $\delta_G$  – допустимое относительное отклонение грузопотока исходных песков на ОФ от регламентированного значения.

Неравенство (15), согласуется с условиями (11) и (12), требует ограничения рабочей точки системы областью, находящейся между вертикальными линиями, проходящими через соответствующие расходы, и кривыми расходно-напорной характеристики (РНХ) магистрали при граничных значениях длины и геодезического перепада [2]. Для выполнения поставленного условия суммарная РНХ насосов должна пересекать полученную область в ее средней трети [2].

Вероятность обеспечения системой обратного водоснабжения требуемой подачи требуемого объема воды, при условии осветления достаточного ее объема в существующей системе очистки, определяется близостью рабочей точки насосной установки обратного водоснабжения в заданном диапазоне изменения длины и геодезического перепада магистрали:

$$\left| 1 - \frac{W}{1 + b(Q_w + Q_0)} \right| \leq \delta_W, \quad (16)$$

где  $W$  – текущая производительность насосной установки системы обратного водоснабжения;  $\delta_W$  – допустимое относительное отклонение производительности насосной установки системы обратного водоснабжения от регламентированного значения.

Неравенство (16), согласуется с условием (4), требует ограничения рабочей точки насосной установки областью, находящейся между вертикальными линиями, проходящими через соответствующие расходы, и кривыми РНХ магистрали при граничных значениях длины и геодезического перепада. Для выполнения поставленного условия суммарная РНХ насосов должна пересекать полученную область в ее средней трети [2].

Наиболее часто оценка надежности ГСТОМС производится при изменении основных параметров, что обусловлено необходимостью обоснования модернизации оборудования или его замены. В некоторых случаях одновременно с этим выполняют оценку надежности ГСТОМС в период между изменениями основных параметров, что обусловлено планированием работы системы и прогнозам по необходимости модернизации оборудования на период до следующего изменения основных параметров. В редких случаях, при разработке технико-

экономического обоснования, бизнес-плана или инвестиционного проекта осуществляется оценка надежности ГСТОМС за весь период эксплуатации. При этом предполагается, что завершению периода эксплуатации, или отработки месторождения, закончатся сроки эксплуатации ХО и ОФ, или будет начата разработка техногенного месторождения, сформированного из отходов обогащения разрабатываемых полезных ископаемых.

Фонд рабочего времени для ОФ в течение периода оценки надежности, с учетом планово-предупредительных и восстановительных ремонтов, а также простоев, может быть рассчитан пропорционально общему числу часов работы за период оценки с использованием некоторых показателей надежности:

$$T_Q = 1 - k_O \bar{K}_\Gamma T; \quad k_O = \frac{T_O}{T}, \quad (17)$$

где  $T_Q$  – количество часов в работы ОФ за период оценки;  $k_O$  – коэффициент, учитывающий простои ОФ;  $\bar{K}_\Gamma$  – коэффициент готовности технологии обогащения;  $T$  – общее количество часов работы за период оценки.

С учетом выражения (17) и требуемого за период оценки объема товарного концентрата заданного качества, часовая производительность ОФ по концентрату рассчитывается по формуле:

$$Q_K = \frac{Q_A}{1 - k_O \bar{K}_\Gamma T}, \quad (18)$$

где  $Q_A$  – требуемый за период оценки объем товарного концентрата.

Учитывая требования (2), накладываемые на величину  $Q_K$ , которые можно записать в виде двойного неравенства:

$$Q_I \leq Q_K \leq Q_{II}, \quad (19)$$

позволяющего оценить допустимые интервалы изменения показателей надежности и суммарной наработке ОФ:

$$\frac{Q_A}{1 - k_O \bar{K}_\Gamma T_{Q_{II}}} \leq \bar{K}_\Gamma \leq \frac{Q_A}{1 - k_O \bar{K}_\Gamma T_{Q_I}}; \quad (20)$$

$$\left( T - T_O - \frac{Q_A}{Q_I} \right) \frac{\bar{K}_\Gamma}{1 - \bar{K}_\Gamma} \leq T_Q \leq \left( T - T_O - \frac{Q_A}{Q_{II}} \right) \frac{\bar{K}_\Gamma}{1 - \bar{K}_\Gamma}. \quad (21)$$

Для обеспечения требуемой производительности ОФ по товарному концентрату на обогатительное производство необходимо подавать следующие расходы исходных песков и воды:

$$Q_T = \frac{Q_K}{\alpha}; \quad Q_W = qQ_K, \quad (22)$$

где  $q$  – удельный расход воды на переработку одного метра кубического товарного концентрата.

Часть воды поступает на ОФ вместе с пульпой, а часть добавляется в технологический процесс непосредственно из водохранилища или же после сгущения отходов обогащения:

$$Q_w = \bar{q} - w \bar{q} Q_K; \quad Q_o = wqQ_K. \quad (23)$$

С учетом формул (22), (23) оборудование гидротранспортной установки за период оценки будет перекачивать следующий объем гидросмеси

$$Q = \left[ \frac{1}{\alpha} + \bar{q} - w \bar{q} \right] Q_K. \quad (24)$$

При этом в течение периода оценки оборудование гидротранспортной установки и установки оборотного водоснабжения должно будет выработать соответствующее количество ресурсов

$$n_G = \left[ \frac{1}{\alpha} + \bar{q} - w \bar{q} \right] \frac{Q_A}{G}; \quad n_w = wq \frac{Q_A}{G_0}, \quad (25)$$

где  $n_G$  – количество ресурсов, которые необходимо выработать оборудованию гидротранспортной установки за период оценки;  $G$  – ресурсов оборудования гидротранспортной установки;  $n_w$  – количество ресурсов, которые необходимо выработать оборудованию установки оборотного водоснабжения за период оценки;  $G_0$  – ресурсов оборудования установки оборотного водоснабжения.

Не трудно показать, что для рассматриваемых условий наработка часов оборудования гидротранспортной установки и установки оборотного водоснабжения будут рассчитываться по соответствующим формулам:

$$t_G = \frac{\bar{q} - k'_O \bar{K}'_G}{1 - \left( 1 - \frac{\alpha}{1 + \alpha \bar{q} - w \bar{q} Q_A} \right) K'_G} T; \quad t_V = \frac{\bar{q} - k''_O \bar{K}''_G}{1 - \left( 1 - \frac{1}{wq} \frac{W}{Q_A} \right) K''_G} T, \quad (26)$$

где  $t_G$  – межремонтная наработка оборудования гидротранспортной установки;  $k'_O$  – коэффициент, учитывающий простои оборудования гидротранспортной установки;  $K'_G$  – коэффициент готовности технологии оборудования гидротранс-

портной установки;  $t_V$  – межремонтная наработка оборудования установки обратного водоснабжения;  $k_O''$  – коэффициент, учитывающий простои оборудования установки обратного водоснабжения;  $K_G''$  – коэффициент готовности оборудования установки обратного водоснабжения.

Зная межремонтные наработки оборудования (26), значения вероятности безаварийной работы при условии  $\gamma_G$ -% ресурса элементов ГСТОМС вычисляются в соответствии с принятым для рассматриваемых объектов закона распределения [6, 11]:

$$P_{\text{Г}} = 1 - \gamma_G, \quad P_{\text{В}} = 1 - \gamma_V. \quad (27)$$

Зависимости (22) – (24) позволяют определить значения  $H_S$  и  $H_W$ , входящие в критериальные условия надежности складирования отходов обогащения (5), а также в неравенство (8), определяющее надежность осветления заданного объема оборотной воды как корни следующих интегральных уравнений:

$$\int_0^{H_W} F_W dz = \left[ a + b - w^2 q + wq + \frac{\alpha - 1 + m}{\alpha m} - \varphi \right] Q_K; \quad (28)$$

$$\int_0^{H_S} F_S dz = \frac{1 - \alpha}{\alpha m} Q_K, \quad (29)$$

где  $\varphi$  – влажность концентратов, поступающих на сушку.

Надежность работы узла сгущения пульпы обеспечивается выбором соответствующего уровня резервирования.

Таким образом, впервые гидротехнические системы технологий обогащения минерального сырья проанализированы как объект теории надежности, выделены уровни формирования надежности, сформулированы критерии надежности, указаны характерные периоды оценки надежности, а также предложен метод расчета показателей надежности рассматриваемых систем на расчетный период.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий: Монография / А.Ф. Булат, О.В. Витушко, Е.В. Семененко; Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.
2. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е.В. Семененко – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
3. Головачев, Н.В. Обоснование технического обслуживания и ремонта оборудования для повышения эффективности эксплуатации системы гидротранспорта на горных предприятиях: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.05.06 / Н.В. Головачев – Санкт-Петербург, 2010. – 136 с.
4. Гаркушин, Ю.К. Надежность и эффективность оборудования углеобогажительных фабрик / Ю.К. Гаркушин, В.В. Смирнов. – Днепропетровск: Поліграфіст, 1999. – 182 с.
5. Болошин, Н.Н. Надежность работы технологических узлов и оборудования обогатительных фабрик / Н.Н. Болошин, В.И. Гашичев. – М.: Недра, 1974. – 137 с.
6. Надежность напорных гидротранспортных систем / А.И. Борохович, Л.И. Махарадзе, М.Т. Куция, Т.Ш. Гочиташвили. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1992. – 224 с.

7. ГОСТ 27.004-85. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 22954-78; Введ. 01.07.86. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 11 с.
8. ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. – Введ. впервые; Введ. 01.01.85. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 38 с.
9. ГОСТ 27.202-83. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции. – Взамен ГОСТ 23641-79, ГОСТ 16467-70, ГОСТ 16.304-74, ГОСТ 16.305-74, ГОСТ 16.306-74; Введ. 01.07.84. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 52 с.
10. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. – Чинний від 01.01.1996. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 40 с.
11. Докукин, В.П. Повышение эффективности эксплуатации систем трубопроводного гидротранспорта / В.П. Докукин. – Санкт-Петербург: СПГИ(ТУ), 2005. – 105 с.

**УДК 622.647.2**

Д-р техн. наук В.Ф. Монастырский,  
канд. техн. наук Р.В. Кирия,  
инженеры А.Н. Смирнов, Т.Ф. Мищенко  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРУЗОПОТОКА С РОЛИКООПОРАМИ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Розроблено математичну модель взаємодії вантажу з роликоопорами стрічкового конвеєра різної конструкції. Визначено коефіцієнт динамічності при взаємодії крупних шматків вантажу з роликоопорами. Проведено аналіз залежності коефіцієнта динамічності від швидкості стрічки, параметрів роликоопор, конвеєра та вантажу.

## **BULK AND ROLLER SUPPORTS DYNAMIC EFFORTS INTERACTIONS OBTAINING FOR MINE BELT CONVEYER**

Bulk material interaction with a different belt conveyer construction roller supports mathematical model are proposed. Dynamic factor in large fraction bulk material and roller supports interaction is obtained. Dynamic factor vs belt velocity, roller support, bulk material and conveyer parameters dependents had analysed.

При транспортировании горной массы подземными ленточными конвейерами угольных шахт вследствие взаимодействия грузопотока с роликоопорами возникают динамические усилия, разрушающие роликоопоры и уменьшающие срок службы роликов.

Задачей взаимодействия грузопотока с роликоопорами ленточных конвейеров занимались многие исследователи [1–5]. В этих работах рассматривались задачи взаимодействия крупных кусков груза с роликоопорами мощных ленточных конвейеров с натяжением ленты  $S > 10$  кН. Авторами предполагалось, что динамические усилия при взаимодействии крупных кусков груза с роликоопорами связаны с прогибом ролика [1] или с сжатием конвейерной ленты [2]. При этом оказалось, что динамические усилия не зависят от натяжения ленты конвейера, что противоречит результатам экспериментальных исследований.

В работах [3, 4] предполагалось, что из-за разности направления скоростей центра тяжести крупных кусков груза и ленты в момент взаимодействия с ро-