

**В.Б. Малеев /д.т.н./, Н.И. Скорынин /к.т.н./, А.А. Кудрявцев**  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ УСТАНОВОК ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

*Разработаны алгоритмы подсистем автоматизированного управления сбором, отмывом, перекачкой, дозированием твердого полезного ископаемого эрлифтного гидроподъема при разработке глубоких водоёмов, при проходе скважин и шахтных стволов методом затопленного бурения.*

**Ключевые слова:** *глубоководный эрлифт, алгоритм управления, режим движения гидросмеси, скорость движения агрегата сбора.*

### **Постановка проблемы**

В последнее время остро стоит вопрос расширения минерально-сырьевой базы за счет освоения морских месторождений полезных ископаемых. Для добычи минерального сырья со дна Мирового океана используется эрлифтный гидроподъем. Гидроподъем – сложный многофункциональный комплекс, состоящий из агрегата сбора железомарганцевых конкреций (ЖМК), их отмыва от ила, перекачки по гибкому трубопроводу от агрегата сбора до бункера-накопителя и дозирования из последнего в транспортный трубопровод гидравлического подъема, а из него – до обеспечивающего судна.

Поэтому разработка систем автоматизированного управления глубоководными эрлифтными гидроподъемами в составе предприятий по освоению залежей морских месторождений является актуальной задачей.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

В работах [1...3] разработаны алгоритмы запуска и остановки глубоководного эрлифта согласованно с операциями добычного оборудования. В рамках разработанных алгоритмов решена задача длительности переходных процессов в элементах используемого оборудования за счет совмещения во времени пусковых операций гидроподъема и данного блока, упрощена процедура повторного запуска установки. Однако в этих работах не учтено влияние содержания ЖМК в гидросмеси на гидравлические потери в трубопроводах. Поэтому полученные результаты не могут объективно являться основой разработки автоматизированного управления эрлифтными гидравлическими подъемами в составе горных предприятий.

В работе [4] предложен блочно-иерархи-

ческий подход к разработке технологии управления глубоководными добычными комплексами. На основе анализа результатов этой работы сформулированы основные требования к системам управления технологическими процессами сбора, отмыва и перекачки полезного ископаемого, подсистеме управления дозированием и эрлифтным гидроподъемом.

### **Цель (задачи) исследования**

Целью данной работы является создание алгоритмов управления агрегатами технологической цепочки глубоководных эрлифтных гидроподъемов (ГЭГ) с учетом концентрации ила и ЖМК в гидросмеси, расходов гидросмеси и воздуха, плотности твердой фазы и т.д.

### **Основной материал исследования**

Эффективность работы глубоководного эрлифтного гидроподъема в значительной степени зависит от надежности управления взаимосвязанными процессами сбора ЖМК, их отмывом от ила и перекачкой от агрегата сбора до бункера. Перечисленные процессы являются начальным звеном в технологической цепи добычной установки. Поэтому управление этими процессами должно обеспечить максимально возможное извлечение полезного ископаемого при максимальной производительности и допустимом содержании ила на выходе агрегата сбора. При этом рациональный режим перекачки гидросмеси от агрегата сбора до бункера-накопителя, расходы ЖМК и ила на выход агрегата сбора должны быть при минимальных гидравлических потерях на транспортирование железомарганцевых конкреций в гибком трубопроводе. В каждый момент работы установки ее параметры изменяются от начала  $t_n$  до окончания  $t_k$  интервала управления. Установим соответствующие критерии

рии управления.

Массовый расход твердого полезного ископаемого на выходе агрегата сбора (на входе в трубопровод перекачки)

$$Q_{mac} = K_v \cdot \rho_{czt} \cdot Q_{czt} \cdot \frac{\rho_{czt} - \rho_{жс}}{\rho_m - \rho_{жс}},$$

где  $K_v$  – коэффициент, зависящий от отношения скоростей движения частиц полезного ископаемого и гидросмеси в гибком трубопроводе;  $\rho_{czt}$  – плотность гидросмеси в гибком трубопроводе;  $\rho_{жс}$  – плотность несущей среды;  $\rho_m$  – плотность частиц твердого полезного ископаемого;  $Q_{czt}$  – объемный расход гидросмеси в гибком трубопроводе.

С учетом того, что концентрация ЖМК в гидросмеси составляет примерно 5...7 %, плотность несущей жидкости в первом приближении

$$\rho_{жс} = 0,94 \cdot \frac{\rho_{czt} \cdot \rho_m}{\rho_m - 0,06 \cdot \rho_{czt}}.$$

Концентрация ила в гидросмеси

$$S_u = \frac{\rho_{жс} - \rho_{гс}}{\rho_u - \rho_{гс}},$$

где  $\rho_u$  – плотность ила;  $\rho_{гс}$  – плотность морской воды.

Непосредственное раздельное измерение концентраций в гидросмеси ила и ЖМК можно производить с помощью специального устройства [5]. Тогда массовый расход ЖМК

$$Q_{mac} = K_v \cdot \rho_{czt} \cdot Q_{czt} \cdot S_{mzt},$$

где  $S_{mzt}$  – измеренная концентрация ЖМК.

В зависимости от контролируемой скорости движения агрегата сбора  $V_{ac}$  устанавливается частота вращения рабочего органа агрегата  $n_{po}$ :

$$n_{po} = \frac{V_{ac}}{2\pi \cdot R_{po}},$$

где  $R_{po}$  – радиус рабочего органа.

При этой частоте вращения практически отсутствуют потери полезного ископаемого из-за переполнения рабочего органа или излишнего захвата донных илов и пошагово изменяется контролируемое заглубление рабочего органа в грунт  $h_3$  до достижения границы залегания ЖМК, т.е. максимального  $Q_{mac}^{max}$  при допустимом

значении  $S_u$ . Таким образом, обеспечивается выполнение условий:

$$\begin{aligned} Q_{mac} &\leq Q_{mac}^{max}, \\ 0 < n_{po} &\leq n_{po}^{max}, \\ 0 < h_3 &\leq h_3^{max}. \end{aligned} \quad (1)$$

Допустимое содержание илов в гидросмеси в гибком трубопроводе поддерживается путем регулирования подачи воды в магистрали отмыва и изменением заглубления рабочего органа:

$$\begin{aligned} S_u &\leq S_u^{max}, \\ h_3 &\leq h_3^{max}. \end{aligned}$$

Оптимальная стабилизация производительности агрегата сбора полезного ископаемого осуществляется путем изменения скорости движения агрегата сбора  $V_{ac}$  по участку добычи  $0 < V_{ac} \leq V_{ac}^{max}$  и выполнением критерия:

$$\frac{1}{t_k - t_n} \cdot \int_{t_k}^{t_n} |\bar{Q}_{mac} - Q_{macz}|^2 dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_{mac}$  – массовый расход ЖМК на выходе агрегата сбора, усредненный на некотором временном интервале, длительность которого определяется частотными характеристиками плотности залегания ЖМК на участке добычи;  $Q_{macz}$  – заданное оператором-технологом значение массового расхода ЖМК на выходе агрегата сбора.

Тогда для обеспечения задаваемого оператором-технологом уровня стабилизируемой производительности  $Q_{macz}$  скорость движения агрегата сбора

$$V_{ac} = \frac{Q_{macz}}{n_k \cdot \epsilon_{po}},$$

где  $n_k$  – плотность залегания конкреций на поверхности участка добычи;  $\epsilon_{po}$  – ширина захвата рабочего органа агрегата сбора.

Полученное расчетное значение скорости движения агрегата сбора  $V_{ac}$  выдается в систему управления или оператору вождения агрегата сбора в качестве рекомендуемого значения. При этом скорость вращения рабочего органа и его заглубление в грунт должно соответствовать критерию (1).

При транспортировании гидросмеси с объемной концентрацией твердой фазы до 30 % и

средневзвешенным диаметром твердых частиц более 2 мм в горизонтальном трубопроводе (наклонный гибкий трубопровод от агрегата сбора до бункера по условиям транспортирования близок к горизонтальному), согласно [6...10], гидравлический уклон равен:

$$i_{zm} = i_o \cdot \left( 1 + \frac{S_m \cdot K_i}{V_{zc}^3} \right), \quad (3)$$

где  $i_o$  – гидравлический уклон в данном трубопроводе при движении чистой воды (без содержания твердых частиц);  $S_m$  – объемная концентрация твердых частиц в гидросмеси;  $V_{zc}$  – скорость движения гидросмеси;  $K_i = F \cdot [g \cdot d_{zm} \cdot (\rho_m - 1)]^{3/2}$ ;  $F$  – эмпирический коэффициент, зависящий от коэффициента трения для воды и коэффициента трения твердых частиц о стенки трубопровода;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $d_{zm}$  – внутренний диаметр гибкого трубопровода.

Гидравлический уклон при движении чистой воды

$$i_o = \frac{\lambda \cdot V_{zc}^2}{2g \cdot d_{zm}},$$

где  $\lambda$  – коэффициент Дарси для трубопровода.

Подставим значение  $i_o$  в уравнение (3), возьмем производную  $di_{zm}/dV_{zc}$  и приравняем ее к нулю, тогда критическая скорость гидросмеси, соответствующая минимальному гидравлическому уклону,

$$V_{кр\ zc} = \left( \frac{S_m \cdot K_i}{2} \right)^{1/3}.$$

При  $V_{zc} = V_{кр\ zc}$ , из уравнения (3) следует, что отношение критического гидравлического уклона к гидравлическому уклону при движении чистой воды есть величина постоянная, не зависящая ни от концентрации гидросмеси, ни от плотности твердых частиц:  $i_{кр}/i_o = 3$ .

Так как режим движения гидросмеси с критической скоростью является наиболее эффективным по затратам энергии и производительности, то при управлении необходимо поддерживать в гибком трубопроводе режим движения, близкий к критическому. Известно, что для предотвращения осаждения ЖМК в трубопроводе скорость гидросмеси должна быть больше критической на 15...20 %, что соответствует отношению гидравлических уклонов при движении гидросмеси и воды, равному 2,32. Указанное отношение может быть определено по величине

отношения перепадов давления на концах гибкого трубопровода при движении гидросмеси и воды, но так как нижний конец трубопровода со стороны агрегата сбора открыт, то давление на этом конце равно гидростатическому, и перепад на концах трубопровода определяется на верхнем его конце – перед насосом перекачки.

Гидросмесь в гибком трубопроводе содержит значительное количество илов, извлекаемых в процессе сбора полезных ископаемых вместе с ЖМК. На основании экспериментальных исследований известно, что при концентрациях, близких к критическим, добавление в гидросмесь мелких частиц (средний диаметр не превышает 0,025 мм) вызывает существенное, порядка 30...200 %, снижение гидравлического уклона и критической скорости гидросмеси в трубопроводе [11,12]. Объясняется это уменьшением сил трения между самими транспортируемыми частицами и этими частицами со стенками трубопровода. Таким образом, мелкие частицы играют роль «смазки». При этом эффективность транспортирования существенно возрастает при 7...10 % мелкодисперсных частиц от общего количества твердых материалов в гидросмеси, а при увеличении их содержания до 15 % гидравлический уклон практически не уменьшается. Поэтому для повышения эффективности транспортирования ЖМК в гибком трубопроводе целесообразно удалять «лишний» ил, содержание которого в гидросмеси не приводит к снижению давления на выходе гибкого трубопровода.

Таким образом, для реализации способа управления, предложенного в [13], необходимо:

$$\begin{aligned} N_{ин} &\leq N_{ин}^{\max}, \\ n_{ин} &\leq n_{ин}^{\max}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N_{ин}, N_{ин}^{\max}$  – соответственно мощность, потребляемая насосом перекачки, и ее допустимое значение;  $n_{ин}, n_{ин}^{\max}$  – соответственно частота вращения вала насоса перекачки и ее максимальное значение.

В процессе разгона насоса перекачки на воде до достижения максимального расхода измеряется и запоминается ряд последовательных значений давления на выходе насоса перекачки и соответствующих им значений расхода воды в гибком трубопроводе. Затем запускается агрегат сбора и увеличивается подача твердых материалов в гибкий трубопровод при максимальной частоте вращения вала насоса перекачки. При этом возрастают плотность гидросмеси и гидравлический уклон в трубопроводе. Контролируя давление на выходе насоса перекачки и вы-

числя отношение этого давления к соответствующему его значению при работе на воде с тем же расходом, можно определить момент, когда величина указанного отношения достигнет заданного значения – 2,32, что соответствует максимально допустимой надкритической концентрации твердой фазы. В этот момент следует прекратить увеличение производительности агрегата сбора и стабилизировать ее в соответствии с критерием (2). При этом необходимо увеличивать расход воды в магистрали отмыва до тех пор, пока гидравлический уклон в гибком трубопроводе (давление на выходе насоса перекачки) не начнет возрастать, т.е. до достижения оптимальной концентрации ила в гидросмеси. В результате этого снижается критическая скорость гидросмеси и можно увеличить подачу ЖМК агрегатом сбора и т.д.

В процессе управления необходимо непрерывно контролировать мощность насоса перекачки, и при выполнении условия (4) следует выдавать либо соответствующее сообщение оператору-технологу с целью уменьшения задания на производительность агрегата сбора, либо выяснять и устранять другие причины недопустимого возрастания мощности.

При коротком вертикальном гибком трубопроводе перекачки расход гидросмеси в нем обеспечивается на расчетном минимальном надкритическом уровне.

Процесс дозирования заключается в регулировании подачи ЖМК в транспортный трубопровод из бункера-накопителя, в котором собирается поток ЖМК, поступающий от агрегата сбора через гибкий трубопровод. Интенсивность подачи ЖМК регулируется путем соответствующего изменения, задающего воздействие на привод дозатора. Критерий управления процессом дозирования следующий:

$$\frac{1}{t_k - t_n} \cdot \int_{t_n}^{t_k} |\bar{Q}_{m\delta} - Q_{m\delta z}|^2 dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

при ограничениях:  $n_\delta \leq n_\delta^{\max}$ ,  $Q_{m\delta} \leq Q_{m\delta}^{\text{don}}$ ,  $N_\delta \leq N_\delta^{\text{don}}$ ,  $0 < u_{3\delta} \leq u_{3\delta}^{\max}$ .

Здесь:  $\bar{Q}_{m\delta}$  – среднее значение расхода ЖМК на временном интервале, равном периоду оборота вала дозатора  $T_\delta$ ;  $Q_{m\delta z}$  – заданная оператором производительность подъема по ЖМК;  $Q_{m\delta}^{\text{don}}$  – максимально допустимый расход ЖМК на выходе дозатора;  $t_n$ ,  $t_k$  – соответственно моменты начала и окончания интервала времени регулирования расхода ЖМК на уровне  $Q_{m\delta z}$ ;  $u_{3\delta}$ ,

$u_{3\delta}^{\max}$  – соответственно задающее и максимально допустимое воздействие на привод дозатора;  $n_\delta$ ,  $n_\delta^{\max}$  – текущее и максимально допустимое значение частоты вращения вала дозатора;  $N_\delta$ ,  $N_\delta^{\text{don}}$  – текущее и максимально допустимое значение мощности привода дозатора;  $\bar{Q}_{m\delta} = \frac{1}{T_\delta} \cdot \int_{T_\delta-t}^t Q_m dt$ .

Величина расхода твердой фазы на выходе дозатора в процессе управления определяется косвенно по контролируемому расходу гидросмеси и ее плотности над выходным отверстием дозатора:

$$Q_{m\delta} = \frac{\rho_{cmm} - \rho_e}{\rho_m - \rho_e} \cdot \rho_{cmm} \cdot Q_{cmm},$$

где  $\rho_{cmm}$  – плотность гидросмеси в транспортируемом трубопроводе;  $\rho_e$  – плотность морской воды;  $Q_{cmm}$  – объемный расход гидросмеси в транспортном трубопроводе.

Поскольку измерение плотности соответствующим датчиком производится на некотором удалении от дозатора, то и величина  $Q_{m\delta}$  определяется с запаздыванием по отношению к моменту его фактического изменения, причем величина времени запаздывания зависит от величины  $Q_{cmm}$  и может приводить к неустойчивости системы управления, замкнутой по контролируемому расходу ЖМК. Для управления подобными нестационарными объектами с запаздыванием целесообразно реализовывать метод управления по возмущению, основанный на прогнозировании значений переменных с помощью адаптивной математической модели [14].

Максимально допустимый расход ЖМК  $Q_{m\delta}^{\text{don}}$  соответствует максимально возможной концентрации твердого полезного ископаемого в гидросмеси, обеспечивающей надкритический режим при максимальном расходе гидросмеси в транспортном трубопроводе. При достижении такого режима, когда невозможно уменьшить концентрацию ЖМК в гидросмеси путем увеличения расхода гидросмеси, необходимо уменьшить задание на расход ЖМК до выхода из критического режима.

Превышение предельной мощности привода дозатора  $N_\delta^{\text{don}}$  или отсутствие вращения при наличии допустимого воздействия на привод дозатора свидетельствует о стопорении вала дозатора. Для выхода из режима стопорения необходимо реверсировать привод дозатора. Если при этом в течение некоторого времени нагрузка на привод дозатора при работе с малой частотой

вращения снижается до допустимых значений, то далее дозатор переводится в нормальный режим стабилизации расхода твердой фазы. В противном случае привод дозатора отключается.

Максимально допустимый расход твердой фазы  $Q_{m\delta}^{don}$  соответствует максимальной концентрации твердой фазы в гидросмеси, обеспечивающей надкритический режим при максимальном расходе гидросмеси в транспортном (подающем) трубопроводе. Если ограничения (5) не выполняются, т.е. при заданном расходе твердой фазы достигнут критический расход гидросмеси в транспортном трубопроводе и нельзя выйти из этого режима путем увеличения расхода гидросмеси, то формируется и выдается сообщение о такой ситуации оператору-технологу, при этом необходимо уменьшать задание на расход твердого  $Q_{m\delta}$  до тех пор, пока критический режим не будет ликвидирован.

Выходной информацией подсистем управления технологическими процессами сбора, отмыва, перекачки и дозирования ЖМК, исходя из вышеприведенного, является:

- управляющие воздействия на приводы насосов отмыва и перекачки дозатора, а также задание на частоту вращения и заглублиения рабочего органа агрегата сбора;

- команды на включение и отключение агрегатов;

- сообщение о режимах агрегатов рассматриваемой подсистемы, выводимые на терминал оператора-технолога;

- значения регулируемых переменных, выводимые на терминал оператора-технолога.

На основании вышеприведенных исследований разработан алгоритм управления этими процессами.

Входная информация, необходимая для подсистемы управления технологическими процессами сбора, отмыва, перекачки и дозирования твердого полезного ископаемого, подразделяется на переменную и условно постоянную. К переменной относится информация, поступающая от соответствующих датчиков системы управления, которая характеризует: скорость движения агрегата сбора  $V_{ac}$ ; заданный массовый расход твердых полезных ископаемых  $Q_{mT3}$ ; напор насоса отмыва  $H_{но}$ ; объемный расход воды в магистрали отмыва  $Q_{во}$ ; объемный расход гидросмеси в гибком трубопроводе  $Q_{ггс}$ ; плотность гидросмеси на входе гибкого трубопровода  $\rho_{ггс}$ ; напор насоса перекачки  $H_{пн}$ ; частоту вращения насоса перекачки  $n_{пн}$ ; мощность насоса перекачки  $N_{пн}$ ; уровень твердого полезного ископаемого в бункере-накопителе  $h_{тб}$ ; частоту вращения вала дозатора

$n_{\delta}$ ; мощность привода дозатора  $N_{\delta}$ ; объемный расход гидросмеси в подающей части транспортного (подводящего) трубопровода  $Q_{гс}$ ; плотность гидросмеси над дозатором  $\rho_{гс\delta}$ ; заданный массовый расход железомарганцевых конкреций на выходе дозатора  $Q_{mT\delta}$ .

К условно постоянной относится информация, вводимая оператором-технологом и содержащая постоянные и настроечные параметры системы управления. Параметры этого вида информации следующие: плотность частиц твердого полезного ископаемого  $\rho_T$  (1750...2600 кг/м<sup>3</sup>); плотность ила  $\rho_n$  (1200...1350 кг/м<sup>3</sup>); плотность морской воды  $\rho_{с}$  (1080...1100 кг/м<sup>3</sup>); радиус рабочего органа агрегата сбора  $R_{po}$ ; ширина захвата рабочего органа агрегата сбора  $b_{po}$ ; максимально допустимый уровень твердого полезного ископаемого в бункере-накопителе  $h_{тб}^{max}$ ; максимальный массовый расход твердого на выходе агрегата сбора  $Q_{mTac}^{max}$ ; максимальная частота вращения вала насоса перекачки  $n_{пн}^{max}$ ; максимальное заглублиение рабочего органа агрегата сбора  $h_{зб}^{max}$ ; максимально допустимая концентрация ила в гибком трубопроводе  $S_n^{max}$ ; отношение давления на выходе гибкого трубопровода в надкритическом режиме к тому же давлению при отсутствии твердого в гибком трубопроводе  $P_{ггс}^{sp}/P_{ггс} = 2,32$ ; средний диаметр частиц твердого полезного ископаемого (ТПИ)  $d_T$ ; минимальная частота вращения вала двигателя дозатора в рабочем режиме  $n_{\delta}^{min}$ ; допустимая частота вращения вала двигателя дозатора при стопорении  $n_{\delta}$ ; максимально допустимая мощность привода дозатора в рабочем режиме  $N_{\delta}^{don}$ ; допустимая длительность работы дозатора на реверсе при стопорении  $t_{\delta}^p$  ( $\leq 20$  с); допустимое отклонение расхода железомарганцевых конкреций от заданного значения ( $Q_{mT\delta} \leq \pm Q_{mT3}$ ); плотность залегания конкреций на данном участке дна  $n_k$ .

На рис. 1 представлена схема алгоритма управления технологическими процессами сбора, отмыва и перекачки твердых полезных ископаемых от агрегата сбора до бункера-накопителя. Функционирование подсистемы начинается вводом условно постоянной информации (символы 1, 2). При этом фиксируются моменты начала интервала работы  $t_0$  и начала шага работы  $t_M$ , а также организуется счетчик числа шагов работы (символ 3).

В начале каждого шага производится ввод значений параметров переменной информации (символ 4).

В символе 5 производится анализ условия:  $n_{нп} < n_{нп}^{max}$ , где  $n_{нп}$ ,  $n_{нп}^{max}$  – соответственно текущая и максимальная частота вращения вала насоса перекачки.

При выполнении этого условия производится выдача на вход звена «привод насоса перекачки» управляющего воздействия:

$$u_{нпз(i)} = u_{нпzi} + \Delta u,$$

где  $u_{нпз(i)}$  – управляющее воздействие на привод

насоса перекачки для следующего шага ( $i+1$ );  $u_{нпzi}$  – то же воздействие на текущем ( $i$ ) шаге;  $\Delta u$  – шаг приращения  $u_{нпз}$  при разгоне насоса перекачки (символ 6).

Если при анализе в символе 5 установлено равенство, то далее выполняется шаг рабочего режима сбора и перекачки железомарганцевых конкреций. При этом определяется задание частоты вращения рабочего органа агрегата сбора  $n_{роз}$ , соответствующей текущей скорости движения агрегата сбора  $V_{ас}$  (символ 8) и регулируется частота  $n_{po}$  на расчетном уровне  $n_{роз}$  (символ 9).

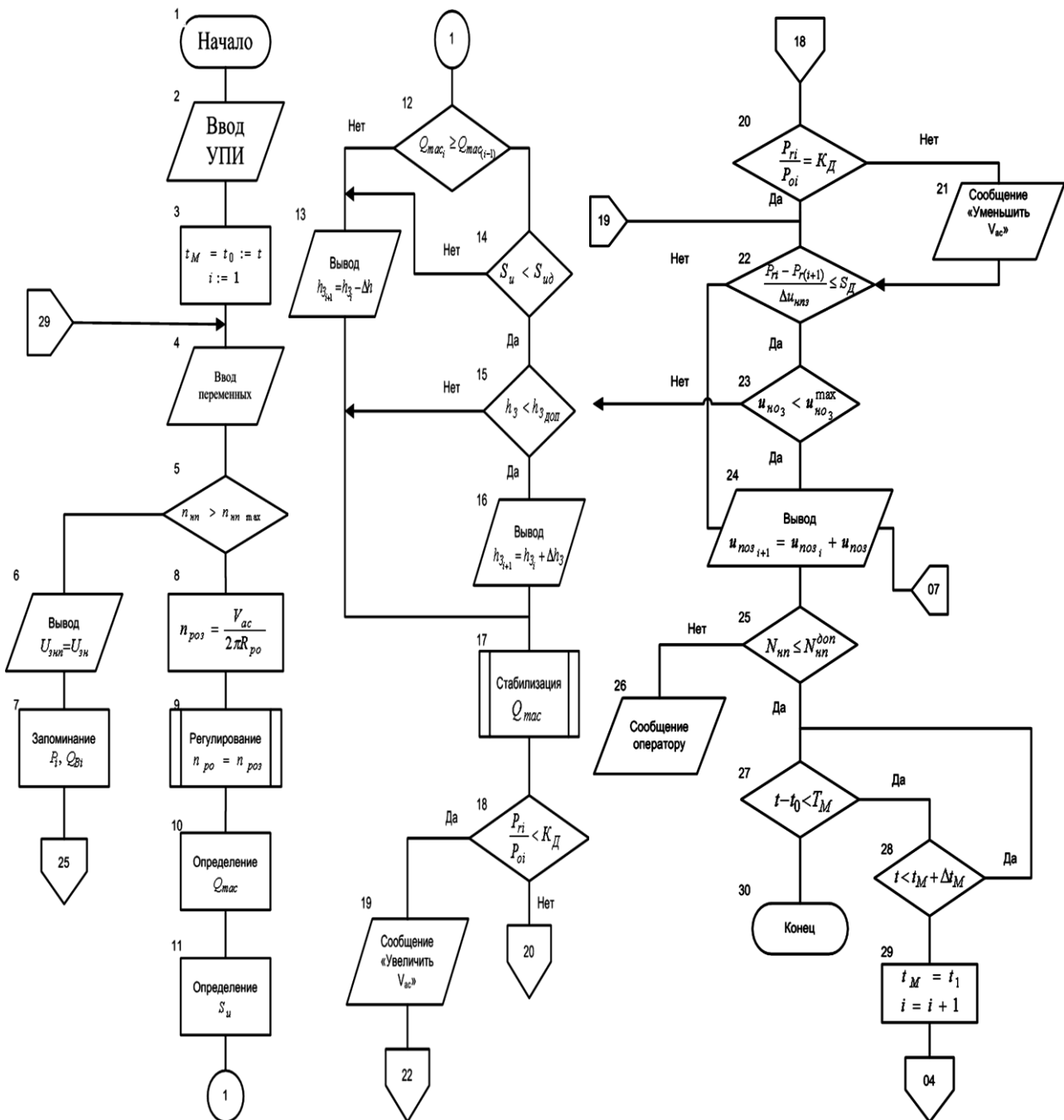


Рис. 1. Алгоритм подсистемы управления технологическими процессами сбора, отмыва и перекачки твердого полезного ископаемого

Затем в символах 10, 11 определяются значения расхода ТПИ и ила на входе гибкого трубопровода  $Q_{mac}$  и  $S_n$ , а в символе 12 анализируется изменение  $Q_{mac}$  за один шаг. Если приращение  $\Delta Q_{mac} > 0$ , концентрация илов  $S_n$  не превышает допустимую величину  $S_{nd}$  (проверка в символе 14), а величина заглупления рабочего органа агрегата сбора  $h_3$  не достигла максимально допустимой  $h_{3\,don}$  (символ 15), то изменяется заглупление рабочего органа в грунт на заданную величину  $\Delta h_3$  (символ 16). В случае если  $\Delta Q_{mac} < 0$  либо  $S_n > S_{nd}$ , изменяется заглупление рабочего органа из грунта на величину  $\Delta h_3$  (символ 13).

Запоминаются текущие значения давления на выходе насоса и соответствующего ему расхода воды в гибком трубопроводе (символ 7).

Таким образом, осуществляется минимизация потерь твердых полезных ископаемых при добыче и обеспечивается допустимое содержание илов в гидросмеси в гибком трубопроводе.

Регулирование производительности агрегата сбора на заданном оператором уровне достигается путем соответствующего регулирования скорости движения агрегата сбора (символ 17). При этом увеличение производительности агрегата сбора, т.е.  $V_{ac}$ , на каждом шаге управления производится до тех пор, пока отношение давления гидросмеси  $P_{zcci}$  на выходе гибкого трубопровода к давлению  $P_{foi}$  воды при разгоне насоса перекачки до расхода воды, равного измеренному текущему расходу гидросмеси, не достигнет заданной величины  $K_3$  (символы 18, 19). В случае, если  $P_{zcci}/P_{foi} > K_3$  производится уменьшение  $V_{ac}$ , а, следовательно, и производительности агрегата сбора (символы 20, 31). Таким образом, достигается оптимальная (с точки зрения потерь в трубопроводе перекачки) концентрация ЖМК в гидросмеси. Процесс отмыва твердого от ила представлен символами (20...24): увеличение задания на насос отмыва  $u_{noz}$  происходит до тех пор, пока контролируемое отношение приращения за один шаг изменения давления ( $P_{zcci} - P_{zcc(i-1)}$ ) к приращению за тот же шаг задания на расходы в магистрали отмыва  $\Delta u_{noz}$  не превысит заданного допустимого значения  $S_0$ , либо пока  $u_{noz}$  не достигнет своей допустимой границы  $u_{noz}^{max}$ .

В конце каждого шага изменения параметров производится контроль мощности насоса перекачки  $N_{nn}$  (символ 25), при превышении которой максимально допустимого значения  $N_{nn}^{don}$  выдается соответствующее сообщение оператору (символ 26). Затем, если интервал работы ( $t - t_0$ ) меньше заданного значения  $T_M$  (символ 27), а время, прошедшее от начала текущего шага, до-

стигло заданной величины шага работы  $\Delta t_M$  (символ 28), выполняется следующий шаг (модификация счетчика числа шагов и запоминание момента начала текущего шага (символ 29), а затем – возврат к символу 4. При  $(t - t_0) = T_M$  процесс завершается (символы 27, 30).

При проверке разгона насоса перекачки на каждом шаге выполняются только операции, представленные символами 1...7 и 25...29.

На рис. 2 представлен алгоритм подсистемы управления технологическим процессом дозирования ТПИ из бункера-накопителя в транспортный (подающий) трубопровод. Функционирование начинается вводом соответствующей условно постоянной информации (символы 1, 2). Затем фиксируются моменты начала работы  $t_0$  и начала шага  $t_M$  (символ 3) и производится ввод входных контролируемых переменных (символ 4). В символе 5 производится анализ уровня ЖМК в бункере-накопителе,  $h_T$ . Если  $h_T \geq h_T^{min}$ , то происходит включение дозатора (символы 6, 7), а при невыполнении этого соотношения – выключение дозатора. Происходит выдача соответствующего сообщения оператору (символы 8, 9) и завершение процесса (переход к символу 28).

При включенном дозаторе производится анализ задающего воздействия, выдаваемого на привод дозатора  $u_{dz}$  (символ 10) и, если  $u_{dz}$  меньше  $u_{dz}^{min}$ , минимально допустимого уровня,  $u_{dz}$  присваивается значение  $u_{dz}^{min}$  (символ 11) и выполняется новый шаг (переход к символу 22).

Нулевая частота вращения вала дозатора  $n_0$  при ненулевом задании  $u_{dz}$  (анализ в символе 12) либо превышение расчетной допустимой мощности привода дозатора (расчет производится по паспортным данным привода в символе 13, а анализ этого условия в символе 14) являются признаками стопорения вала дозатора. Обработка стопорного режима осуществляется операциями в символах 15...20, а именно: выдается сообщение о стопорении оператору (символ 15), осуществляется реверс привода дозатора (символ 16) и работа в режиме при задающем воздействии  $u_{dz}^{don}$  (символ 17). Если при этом в течение допустимого времени  $\Delta t^{don}$  частота вращения и мощность дозатора изменяются до допустимой величины, происходит обратный реверс привода для нормального режима работы дозатора (символы 18...20), а в противном случае процесс дозирования завершается (возврат к символу 9).

Если на текущем шаге в результате анализа режима работы дозатора в символах 10...14, 19 не выявлен режим стопорения, то в символе 21

производится расчет задающего воздействия  $u_{03}$ , соответствующего заданному расходу ЖМК на выходе дозатора  $Q_{mT03}$  при текущих значениях плотности и размеров частиц ТПИ по зависимости:  $Q_{mT03}=f(n_0, d_T, \rho_T)$ , с учетом равенства  $Q_{mT0}=Q_{mT03}$  и характеристики  $n_0=f(u_{03})$ . В этих функциях

$Q_{mT0}$ ,  $Q_{mT03}$  – соответственно текущий и заданный расходы ТПИ на выходе дозатора;  $n_0$  – частота вращения вала дозатора;  $d_T$  – средний размер частиц твердого в бункере-накопителе;  $\rho_T$  – плотность частиц твердого;  $u_{03}$  – задающее воздействие на привод дозатора.

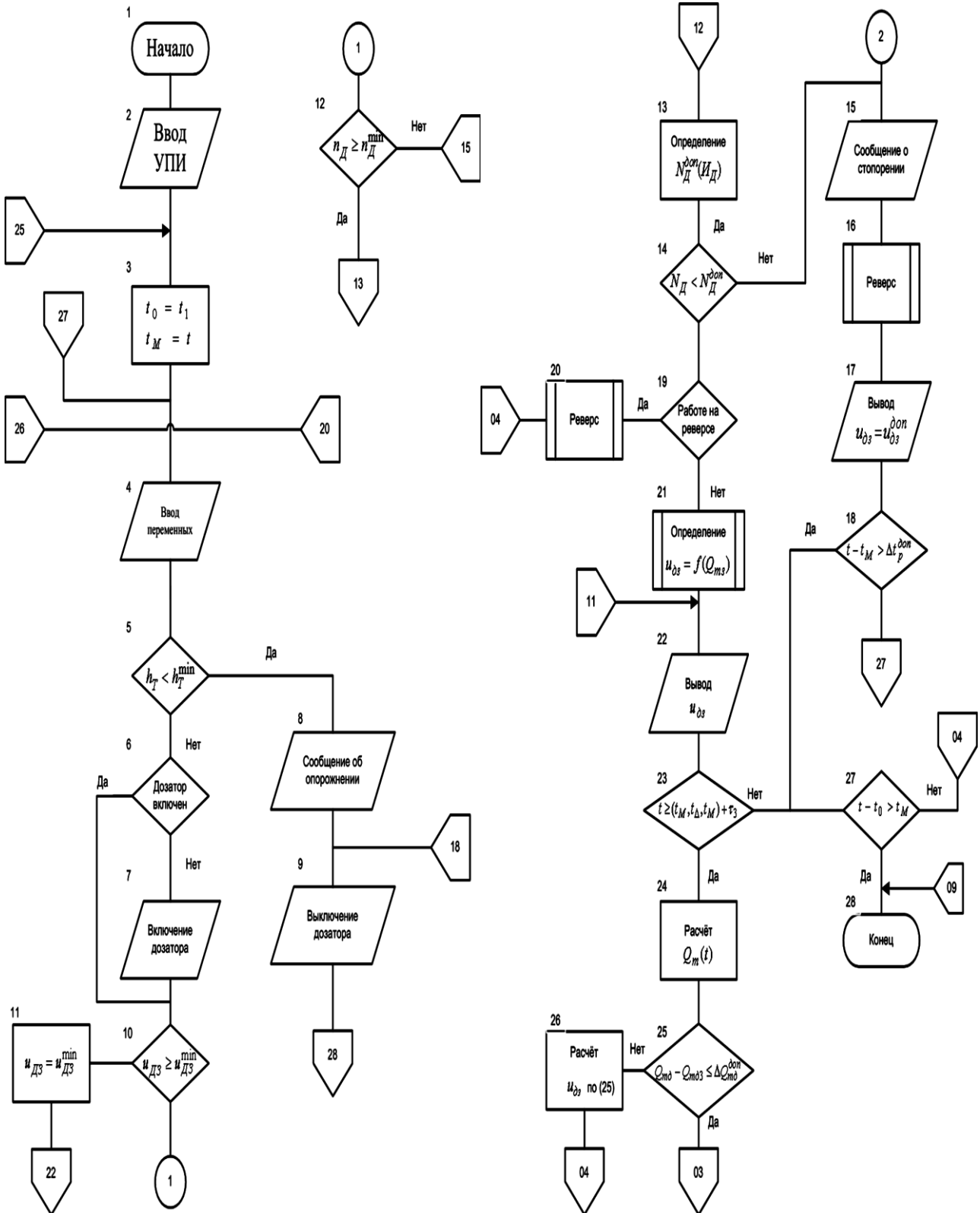


Рис. 2. Алгоритм подсистемы управления технологическим процессом дозирования твердого полезного ископаемого



Расчетное значение  $u_{\partial z}$  выдается на вход звена «привод дозатора» в течение шага  $\Delta t_M$  и времени  $\tau_3$ , соответствующего запаздыванию в канале измерения плотности гидросмеси в транспортном трубопроводе на выходе дозатора (символ 23 – анализ завершения интервала  $\Delta t_M + \tau_3$ ).

После завершения указанного интервала времени производится определение расхода ЖМК по полученным значениям плотности и расхода гидросмеси в транспортном трубопроводе (символ 24), а затем производится регулирование  $Q_{mT\partial}$  по отклонению от  $Q_{mT\partial z}$ , при котором задающее воздействие на привод дозатора  $u_{\partial z}$  рассчитывается в символе 26 в соответствии со следующим законом:

$$u_{\partial z(t_M + \Delta t_M)} = u_{\partial z(t_M)} - K_p \frac{n_{\partial(t_M)}}{Q_{mT\partial(t_M)}} \cdot (Q_{mT\partial(t_M)} - Q_{mT\partial z}),$$

где  $u_{\partial z(t_M)}$ ,  $u_{\partial z(t_M + \Delta t_M)}$  – задание, выдаваемое на привод дозатора соответственно на текущем и последующем шагах;  $K_p$  – коэффициент усиления регулятора;  $n_{\partial(t_M)}$  – текущая частота вращения вала дозатора;  $Q_{mT\partial(t_M)}$  – текущий расход твердого на выходе дозатора.

Регулирование завершается, если отклонение  $Q_{mT\partial}$  от  $Q_{mT\partial z}$  не превышает заданной допустимой величины  $\Delta Q_{mT\partial}^{don}$  (анализ в символе 25). В символе 27 на каждом шаге анализируется полное время  $(t-t_0)$  и, если оно превышает заданную длительность  $\Delta T_M$ , процесс завершается (символ 28).

## Выводы

Получены алгоритмы подсистем управления технологическими процессами сбора, отмыва, перекачки и дозирования ТПИ. В дальнейших исследованиях необходимо разработать алгоритм автоматического управления технологическим процессом эрлифтного гидроподъема.

## Список литературы

1. Самуся, В.И. Разработка алгоритмов управления переходными режимами в глубоководных эрлифтных гидроподъемах / В.И. Самуся, В.Е. Кириченко, В.В. Евтеев // Наукові праці ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – Вип. 16 (142). – С. 239-244. (сер.: гірничо-електромеханічна).
2. Исследование устойчивости системы автоматического регулирования многосмесительных эрлифтных гидроподъемов / В.Б. Малеев [и др.] // Материалы XV Международной научно-технической конференции «Горная

энергомеханика и автоматика» 24-27 ноября 2015 г. в г. Донецке. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 56.

3. Работа компрессора на эрлифтный гидроподъем при осушении скважин и стволов / В.Б. Малеев [и др.] // Научные труды ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып.2(25). – С. 24-34. (серия: горно-геологическая).
4. Кириченко, Е.А. Особенности разработки экспериментальной автоматизированной системы управления морскими горными добычными комплексами / Е.А. Кириченко, В.И. Самуся, В.Е. Кириченко // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2008. – Вип. 30. – С. 112-120.
5. Патент №2622175 (ФРГ). М. кл. 01 23/08, 01 5/00 Способ определения составных частей объема трехкомпонентной смеси / У. Фангер, Р. Пепельник, В. Мтхаэлисот. – 10.08.1978.
6. Мияэ, С. Оптимальные условия гидравлической транспортировки сыпучих веществ // Рюттайкогакку. – 1976. – №9, Т.12. – С. 536-544.
7. Многосмесительные эрлифтные установки для откачки воды из шахтных стволов и скважин / В.Б. Малеев [и др.] // Научные труды ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып.1(26). – С. 23-37. (сер.: горно-геологическая).
8. Wakton, W.H. Aerodynamic Capture of Particles / W.H. Wakton, A. Woolcock. – N.Y.: Pergamon, 1960. – 129 p.
9. Bilardo, U. Simulazione di procedure di sollevamento di solidi in Colonna liquida con air-lift // Ind. Miner. – 1994. – No.5. – P. 23-28.
10. Nicklin, D.J. The air-lift pump: theory and optimization // Trans. Inst. Chem. Eng. – 1963. – No.1. Vol.41. – P. 29-39.
11. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / И.А. Асауленко [и др.] – Киев: Наукова думка, 1981. – 364 с.
12. Малеев, В.Б. Развитие научных основ системы шахтного водоотлива: дис. ... док. техн. наук: 05.05.06 / Малеев Виктор Борисович. – Донецк, 2003. – 317 с.
13. А.с. №284569 СССР. М. кл. Е 02Г 3/94. Способ автоматического управления гидроподъемом твердых полезных ископаемых со дна и устройство для его осуществления / М.С. Фельзер и др. – 28.07.1988.
14. Александровский, А.М. Адаптивные системы управления сложными технологическими процессами // А.М. Александровский, С.В. Егоров, Р.Е. Кузин. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.

V.B. Maleev /Dr. Sci. (Eng.)/, N.I. Scorynin /Cand. Sci. (Eng.)/, A.A. Kudryavtsev  
 Donetsk National Technical University (Donetsk)

**AUTOMATED OPERATION MANAGEMENT  
 OF DEEP-WATER MINERALS MINING INSTALLATIONS**

**Background.** The paper shows that the performance of the deep-water hydraulic airlift depends on the reliability of the management of the processes of mining minerals, washing them from silt and pumping from the collection unit to the hopper. Depending on the controlled speed of the collection unit, its rotation frequency is determined. Established, that the mode of motion of the mixture in the flexible pipeline must be maintained close to critical. Herewith, the ratio of the significant hydraulic gradient to the hydraulic gradient during the movement of pure water is a constant value that does not depend on either the concentration or the density of solid particles and is equal to three. With a short vertical flexible pumping pipeline, the flow rate of the slurry in it is maintained at the calculated supercritical level.

**Materials and/or methods.** The dosing process consists in regulating the supply of minerals to the transport pipeline from the storage hopper. The intensity of the minerals feed is adjusted by a corresponding change in the setting effect on the doser drive. The perturbation control method is implemented using an adaptive mathematical model. It is necessary to reverse the drive of the doser to exit the locking mode. Output information of subsystems of gathering, washing, pumping and dosing is: the control of pump actuators of washing and pumping of the doser, as well as setting the speed and depth of the working body of the collection unit; information about the operating modes of the subsystem in question output to the operator-technologist terminal, and values of regulated variables output to the same terminal. Input information required for the subsystem of control of technological processes of collection, washing, pumping and dosing of solid minerals is divided into variable and conditionally constant.

**Results.** The developed algorithms of subsystems of control of collecting, washing, pumping and dosing of solid minerals are used at the automation of lifting.

**Conclusion.** Control algorithms of subsystems of collecting, washing, pumping and dosing of solid mineral of hydraulic airlift allow creating the scheme of the automated control.

**Keywords:** deep-water airlift, control algorithm, motion mode of the hydraulic mixture, the collection unit movement speed.

**Сведения об авторах**

**В.Б. Малеев**

SPIN-код: 7651-9977  
 Телефон: +380 (71) 321-97-68  
 Эл почта: teormeh@fimm.donntu.org

**Н.И. Скорынин**

SPIN-код: 1869-5382  
 Телефон: +380 (71) 330-18-85  
 Эл почта: teormeh@fimm.donntu.org

**А.А. Кудрявцев**

SPIN-код: 5524-4958  
 Телефон: +380 (71) 302-85-39  
 Эл почта: tmec\_kaa@mail.ru

Статья поступила 20.05.2019 г.

© В.Б. Малеев, Н.И. Скорынин, А.А. Кудрявцев, 2019  
 Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко