

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

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГИДРОСМЕСИ В ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

*Разработаны алгоритмы регулирования гидросмеси в подающем трубопроводе эрлифтной установки и контроля критического режима транспортирования гидросмеси.*

**Ключевые слова:** гидросмесь, подъемная труба, эрлифтная установка, переходный процесс регулирования, критический режим (забутовка), перепад давлений.

### Постановка проблемы

Как известно, в технологических процессах добычи полезных ископаемых со дна водоемов, удаления осевших твердых частиц из водоотливных емкостей шахт эрлифтный гидравлический подъем выполняет важную роль.

При этом следует отметить, что управление рабочим режимом гидравлического подъема в значительной мере зависит от концентрации гидросмеси в подъемной трубе эрлифта, которая, в свою очередь, зависит от концентрации гидросмеси в транспортном (подающем) трубопроводе. В этом случае при минимуме энергозатрат на получение объемной концентрации гидросмеси мощность подводимого к смесителю эрлифта сжатого воздуха будет минимальной.

Все вышеприведенное определяет значимость разработки системы автоматического регулирования и контроля концентрации гидросмеси в подъемной трубе эрлифтной установки.

### Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1,4...6] показано, что вывод эрлифта на расчетный рабочий режим по концентрации гидросмеси осуществляется путем ее регулирования, определения такого значения концентрации, при котором энергозатраты на гидроподъем близки к минимальным. Однако в этих работах не сказано, как этого можно достичь.

### Цель (задачи) исследования

Цель настоящего исследования – разработать систему автоматического регулирования расхода гидросмеси и ее концентрации в транспортном (подающем) трубопроводе эрлифтной установки.

### Основной материал исследования

Основным режимом управления гидравлическим эрлифтным гидроподъемом является оптимальное управление концентрацией твердого материала в подъемном трубопроводе с целью

повышения эффективности работы эрлифта за счет минимизации энергозатрат на подъем заданного количества твердого [1...3].

Ниже приводится последовательность действий и операций, реализуемых в процессе решения задачи автоматического регулирования расхода гидросмеси в транспортном трубопроводе (рис. 1). Начало решения задачи – в символе 1, в символе 2 осуществляется ввод необходимой входной информации для рассматриваемого режима. В символе 3 производится анализ задания на расход гидросмеси в транспортном трубопроводе  $Q_{сстз}$ .

Если  $Q_{сстз}$  изменилось (отличается от задания на предыдущем цикле задачи), то выполняется переход на символ 4, если нет – переход на символ 16. В символе 16 производится контроль приближения к критическому режиму и формируется признак  $a$ , в символе 17 проверяется признак  $a$ , характеризующий режим гидроподъема. Если  $a=1$ , т.е. текущий расход гидросмеси близок к критическому – производится переход на символ 21, если нет – на символ 18. Символы 18...20: если признак  $a$  изменил состояние из 1 в 0, т.е. в данный момент произошел выход из критического режима, то сбрасывается признак ограничения по расходу гидросмеси  $K_k=0$  и устанавливается признак  $T_c=0$ .

Если признак  $a$  не изменил своего состояния (нормальный режим работы), то производится переход на символ 21, в котором устанавливается стабилизируемый уровень расхода гидросмеси  $Q_{сс}$ , равный заданному  $Q_{сз}$ . В символе 22 производится анализ признака  $a$ . Если признак  $a$  изменил состояние из 0 в 1 (приближение к зоне критического расхода), запоминается текущий расход  $Q_{сз}$  (символ 23) как критический  $Q_{сскр}$  и устанавливается признак ограничения  $K_k=1$  (символ 24).

В символе 25 производится анализ задания  $Q_{сз}$ . Если  $Q_{сз} < 1,1 Q_{сскр}$ , осуществляется переход на символ 26 (нормальный режим), если нет –

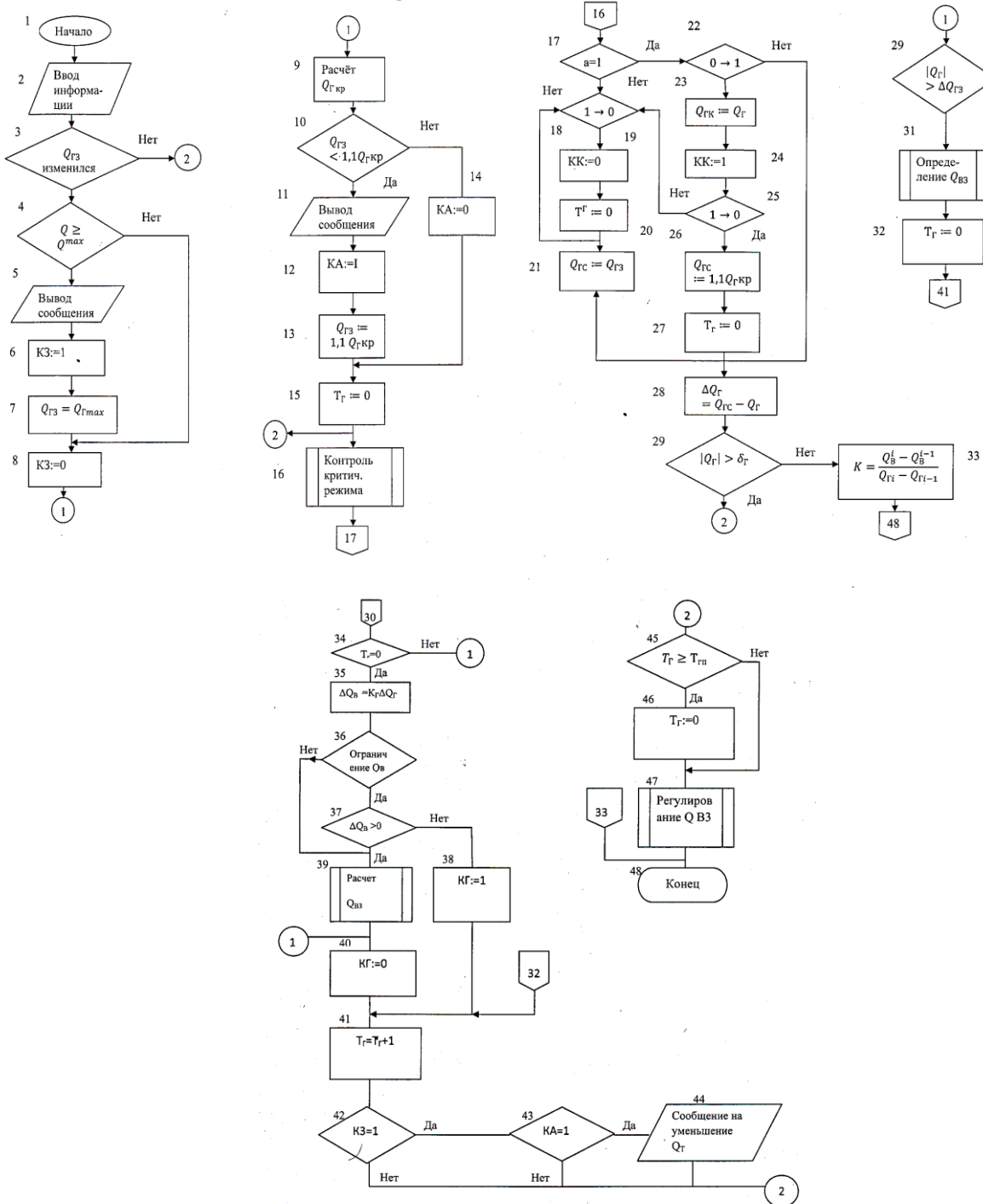


Рис. 1. Алгоритм регулирования гидросмеси в подающем транспортном трубопроводе эрлифтной установки

на символ 19. Затем устанавливается стабилизируемый уровень расхода гидросмеси, равный минимальному надкритическому (символ 26).

Символ 27 устанавливает признак начала переходного процесса по расходу гидросмеси. Рассчитывается отклонение  $\Delta Q_{гс}$  текущего расхода гидросмеси  $Q_{гс}$  от заданного  $Q_{гсз}$  (стабилизуемого) (символ 28).

В символах 29, 30 производится анализ отклонения  $\Delta Q_{гс}$ . Если  $|\Delta Q_{гс}| < \delta_g$  (где  $\delta_g$  – заданная зона нечувствительности регулирования), вы-

полняется переход на символ 33. Если  $|\Delta Q_{гс}| \leq \Delta Q_{гсз}$  (где  $\Delta Q_{гсз}$  – уровень отклонения, при котором меняется алгоритм формирования управляющего воздействия), осуществляется переход на символ 34, если нет – на символ 31. В последнем определяется требуемый расход воздуха  $\Delta Q_{гсз}$  в смеситель в зависимости от задания на расход  $\Delta Q_{гс}$  гидросмеси, концентрации  $S$  и среднего размера  $d_T$  частиц твердой фазы. В символе 32 устанавливается признак начала переходного процесса по гидросмеси ( $T_g=0$ ). Рас-

считывается передаточный коэффициент объекта в рабочей точке на расходной характеристике эрлифта  $K_c$  через значения расходов гидросмеси и воздуха в смеситель на  $i$ -м шаге регулирования ( $Q_{sci}$ ,  $Q_{ai}$ ) и на предыдущем шаге (символ 33). В символе 34 проверяется время переходного процесса. Если переходный процесс по расходу гидросмеси закончен  $T_c=0$ , осуществляется переход на символ 35, если нет – на символ 40.

Символ 35 определяет требуемое приращение  $\Delta Q_a$  воздуха по отклонению текущего расхода гидросмеси от заданного  $\Delta Q_{sc}$ . Анализируется режим работы системы по расходу воздуха (символ 36). Если есть ограничение по расходу воздуха, то выполняется переход на символ 37, если нет – на символ 39. Производится анализ полученного в результате расчета приращения воздуха (символ 37). Если  $\Delta Q_a > 0$ , осуществляется переход на символ 39, если нет – на символ 38, в котором устанавливается признак ( $K_c=1$ ) ограничения по расходу гидросмеси. Определяется требуемый расход воздуха как задание на расход воздуха, полученное на предыдущем цикле решения задачи (символ 39).

Полученное значение  $Q_{вз}$  передается задаче регулирования расхода воздуха в смеситель. Сбрасывается признак ( $K_c=0$ ) ограничения по расходу гидросмеси (символ 40), и производится расчет времени переходного процесса (символ 41).

Если установлен признак ограничения по максимуму и минимуму, т.е. при максимальном расходе гидросмеси и при заданном расходе твердой фазы система подъема работает в режиме критических расходов, то выводится сообщение о необходимости уменьшения расхода твердой фазы с целью вывода системы подъема из критического режима за счет уменьшения расхода твердой фазы (символы 42...44). Производится контроль времени переходного процесса (символы 45, 46) по расходу гидросмеси. Если время с момента вывода управляющего воздействия превысило заданное значение, устанавливается признак конца переходного процесса ( $T_c=0$ ) по предыдущему возмущению.

Решается задача регулирования расхода воздуха в смеситель (символы 47,48), и на этом очередной шаг завершается.

На рис. 2 приведен алгоритм контроля приближения к критическому режиму транспортирования гидросмеси в транспортном (подающем) трубопроводе. Здесь формируется признак приближения к критическому режиму  $a$ .

В начале каждого шага (символы 1...3) производится ввод значений расходов гидросмеси  $\Delta Q_{sc}$  и избыточного давления в трубопроводе на

концах контрольного участка  $P_n$ ,  $P_k$  и определяется перепад давлений на этом участке.

При работе системы гидроподъема на воде (анализ режима в символе 4) производится запоминание значения  $Q_a$  и соответствующего ему значения  $\Delta P$  (символ 5). При работе на гидросмеси в символе 6 производится расчет отношения удельных потерь напора при текущем расходе гидросмеси к потерям при таком же расходе воды ( $i_{zc}/i_o$ ) с учетом средней плотности гидросмеси в контрольном участке ( $\bar{\rho}_{zc}$ ) и его длины ( $l$ ).

Полученное значение – ( $i_{zc}/i_o$ ) (анализ в символе 7). При  $i_{zc}/i_o \geq (i_{zc}/i_o)_3$ , что соответствует приближению к критическому режиму, устанавливается признак  $a=1$  и выводится сообщение (символы 8, 9). При  $i_{zc}/i_o < (i_{zc}/i_o)_3$  сбрасывается признак  $a$  (символ 10), и шаг на этом завершается (символ 11).

Алгоритм автоматического регулирования концентрации гидросмеси приведен на рис. 3. В символах 1, 2 начало операции и вводится входная информация, необходимая для решения задачи. Затем анализируется величина задания на концентрацию гидросмеси в транспортном трубопроводе (символы 3, 4). Если задание изменилось более чем на 10 % по сравнению с предыдущим циклом решения задания, осуществляется переход на символ 5, если нет – на символ 6. В символе 5 по заданному расходу  $\Delta Q_{mз}$  и концентрации  $S_3$  определяется требуемый расход гидросмеси  $Q_{mзc}$ . Производится анализ задания  $Q_{mз}$  на расход твердой фазы (символы 6, 7), и если оно изменилось более чем на 10 % по сравнению с предыдущим циклом решения задачи, то выполняется переход на символ 5, если нет – на символ 9. В символе 8 производится регулирование расхода гидросмеси.

Сравнивается заданная концентрация  $S_3$  с текущей  $S$  (символ 9). Если  $S_3$ , то осуществляется переход на символ 8, если нет – на символ 10. В последнем контролируется переходный процесс по расходу гидросмеси и, если он закончен ( $T_c=0$ ), выполняется переход на символ 11, если нет – на символ 8. В символе 11 производится расчет отклонения текущей концентрации от заданной  $\Delta S$ .

Анализ отклонения  $\Delta S$  осуществляется в символе 12. Если  $|\Delta S| > \delta_3$ , где  $\delta_3$  – зона нечувствительности системы регулирования концентрации, производится переход на символ 13, если нет – на символ 8.

Проверяется наличие ограничения по расходу гидросмеси в соответствии с выражением  $K_{об}=1$  (символ 13).

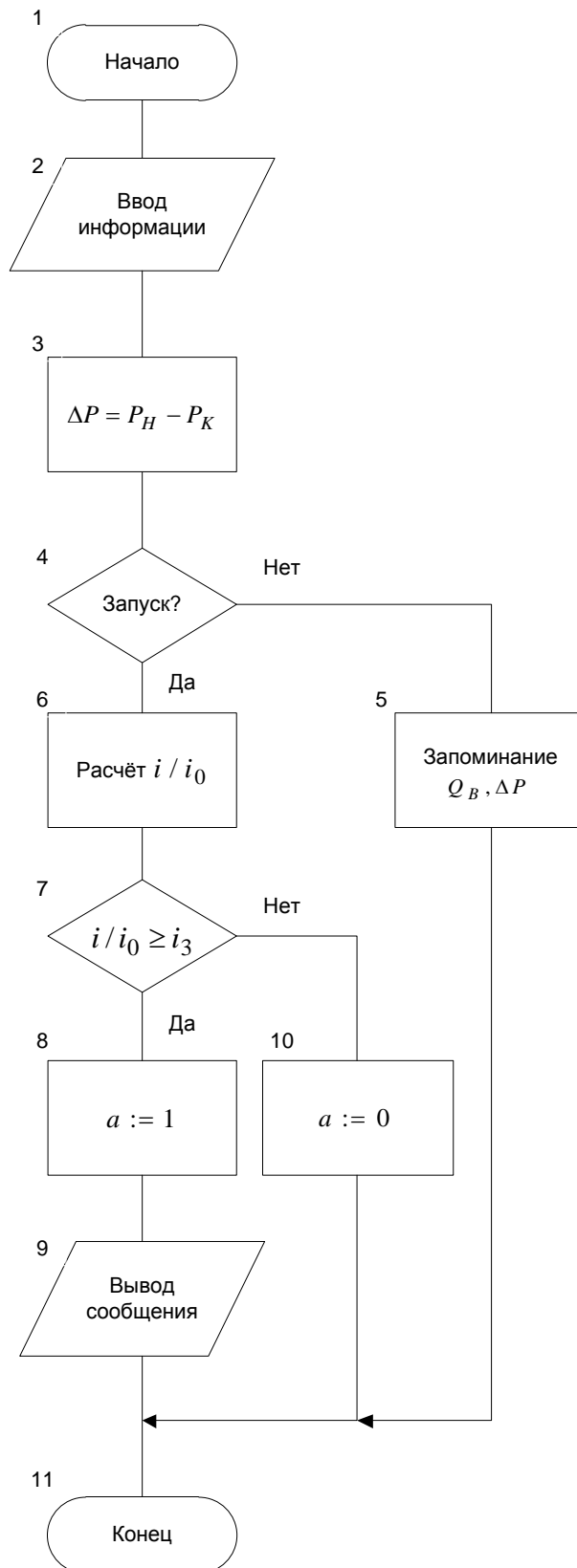


Рис. 2. Алгоритм контроля приближения к критическому расходу гидросмеси

В символах 14...16 производится анализ ограничения по расходу гидросмеси и отклонения текущего значения концентрации от заданного ( $\Delta S$ ). Если есть ограничение по расходу гидросмеси сверху и  $\Delta S > 0$  или ограничение

снизу и  $\Delta S \leq 0$ , то выполняется переход на символ 17, в противном случае – на символ 18. В символе 17 рассчитывается задание на расход гидросмеси, а в символе 18 – конец решения задачи.

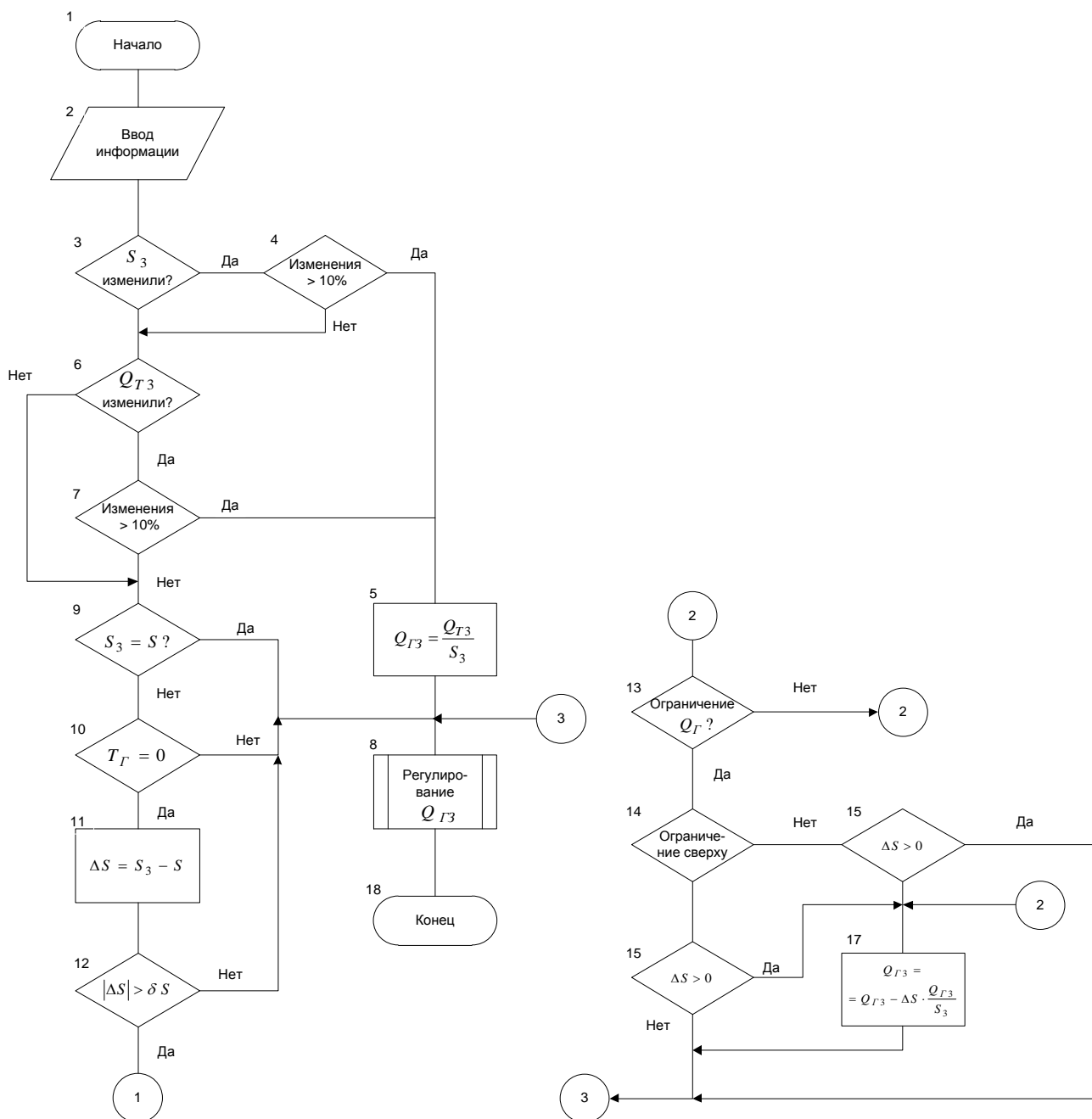


Рис. 3. Алгоритм автоматического регулирования концентрации гидросмеси

**Выводы**

Выполненные исследования позволили разработать алгоритмы регулирования гидросмеси в подающем (подъемном) трубопроводе эрлифтной установки и контроля критического режима транспортирования твердого, что позволяет исключить забутовку трубопровода.

При оптимальном по минимуму энергозатрат значении объемной концентрации гидросмеси мощность подводимого к смесителю сжатого воздуха будет минимальной.

Дальнейшие исследования будут направлены на возможности транспортирования эрлифтной установкой твердого материала повышенной плотности (2000...7000 кг/м<sup>3</sup>).

**Список литературы**

1. Малеев, В.Б. Характеристика задач управления глубоководным эрлифтным гидроподъемом полезных ископаемых / В.Б. Малеев, А.А. Кудрявцев // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2018. – №12 (55). – С.71-76.
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., г. Донецк. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 24-36.

3. Работа компрессора на эрлифтный гидро-подъём при осушении скважин и стволов / В.Б. Малеев [и др.] // Научные труды ДонНТУ. Серия горно-геологическая. – 2016. – №2(25). – С. 24-34.
4. Wakton, W.H. Aerodynamic Capture of Particles / W.H. Wakton, A. Woolcock. – N.Y.: Pergamon, 1960. – 129 p.
5. Soo, S.L. Fluid Dynamics of Multiphase System // Proceedings of Symposium on Interaction between Fluids and Particles, London, June 20-22, 1962. – London: Ins. of Chem. Eng., 1962. – P. 50.
6. Peskin, R.L. Particle-Particle and Particle-Fluid Interactions in Two-Phase Turbulent Flow // Conference Proceedings of Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford, Calif., June 15-17, 1960. – Stanford U.P., 1960. – P. 114-121.

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

### AUTOMATIC REGULATION OF THE SLURRY CONCENTRATION IN THE AIRLIFT PIPE

**Background.** *The new technical solution presented to a problem of optimal control of the hydraulic airlift working mode, which is mainly dependent on the concentration of slurry in the lifting pipe of an airlift. In this case, the power of the compressed air supplied to the mixer will be minimal when the volume concentration of the hydraulic mixture is at the lowest possible energy consumption. All of the above given determines the significance of the development of the automatic control system of the concentration of slurry in the lifting pipe of airlift installation.*

**Materials and/or methods.** *The analysis of the task for the flow of the hydraulic mixture in the transport pipeline performed, and when it approaches the critical mode, the corresponding mode of hydraulic lifting fixed. At the same time, a stabilized level of the hydraulic mixture flow established, equal to the minimum supercritical one. It is shown that the required air flow rate to the mixer is set depending on the flow rate of the hydraulic mixture, the concentration and the average size of the solid phase particles. The control algorithm of the approach to a critical mode of transportation of a hydraulic mixture in the transport (feed) pipelines is shown. In this case, the ratio of specific losses at the current flow rate of the hydraulic mixture to losses at the same water flow rate is calculated taking into account the average density of the hydraulic mixture in the control area and its length. The control system compares the specified concentration of solid particles with the current one and controls the transition process at the flow rate of the mixture. If the deviation of the solid concentration is higher than the dead zone of the concentration control system, the presence of a limit on the flow of the hydraulic mixture checked.*

**Results.** *The performed studies allowed developing the control algorithms for slurry in the feed (lift) pipe of the airlift installation and control of a critical mode of transportation of solid, eliminating the pipeline filling.*

**Conclusion.** *With the optimal minimum energy consumption value of the volume concentration of the hydraulic mixture, the power of the compressed air supplied to the mixer will be minimal.*

**Keywords:** *slurry, lifting pipe, airlift installation, transient regulation, critical, differential pressure.*

#### 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: tmech\_kaa@mail.ru

*Статья поступила 25.04.2019 г.*

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