

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ФЛОТАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ

М.Н. Фелькер, К.Д. Бахтерева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Россия

В статье рассмотрены создание алгоритма и синтез двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью вместо действующей одноконтурной. **Цель исследования.** Стабилизация плотности и стабилизация питания флотационной машины с помощью создания двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью с целью улучшения качества конечного продукта. **Материалы и методы.** Поскольку в системе нет чистого запаздывания, то настройка регулятора производится по методу параметрической оптимизации, а именно: по критериям модульного оптимума (МО) или симметричного оптимума (СО). Для настройки контура применяется также критерий МО/СО. Все системы автоматического управления реализованы в программном пакете MATLAB Simulink. После синтеза локальных и комбинированных систем автоматического регулирования (САР) рассчитываются основные показатели качества, чтобы узнать, какая из САР является наиболее приемлемой. Качество управления определяется по такими показателям, как время переходного процесса, перерегулирование и ошибка системы. Первые два показателя показывают динамику процесса, а последний показатель показывает точность системы. **Заключение.** Готовая двухконтурная система автоматического управления, разработанная в программном пакете MATLAB Simulink, согласно анализу полученных показателей регулирования процесса обеспечивает стабилизацию плотности и уровня в агитационном чане для флотации.

Ключевые слова: флотация, реагентный режим, пульпа, агитационный чан, стабилизация плотности, стабилизация уровня.

Введение

Получение качественного продукта зависит от многих факторов технологического процесса, но особое внимание нужно уделить флотации хлористого калия, поскольку качество продукта зависит от правильно подобранного реагентного режима, что в свою очередь обуславливает поддержание заданных параметров. Флотация – это процесс обогащения мельчайших минералов (0–0,8 мм), при котором полезные минералы отделяются от примесей и других неиспользуемых минералов, при этом используются их физико-химические свойства, а именно: различие в смачиваемости водой.

На рис. 1 представлен флотационный аппарат пневматического колонного типа, использующийся на предприятии ООО «ЕвроХим – УКК» в качестве перемешивающей флотации хлористого калия.

Подготовленная пульпа направляется по трубопроводу в аэратор, который установлен в верхней части машины над камерой флотации, непосредственно на вертикальной питающей трубе [1].

Далее пульпа поступает через центральный трубопровод на распределительное кольцо, там поток делится в нижней части камеры. Через форсунки пульпа выходит в вертикальном направлении вверх. Поскольку машина является самовсасывающей (принцип Вентури), т. е. пульпа поступает в аэратор под давлением благодаря шламовому насосу, то нет необходимости устанавливать дополнительный компрессор для наддува воздуха [2].

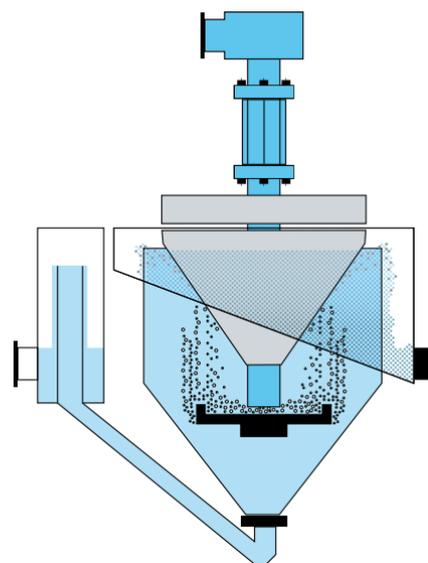
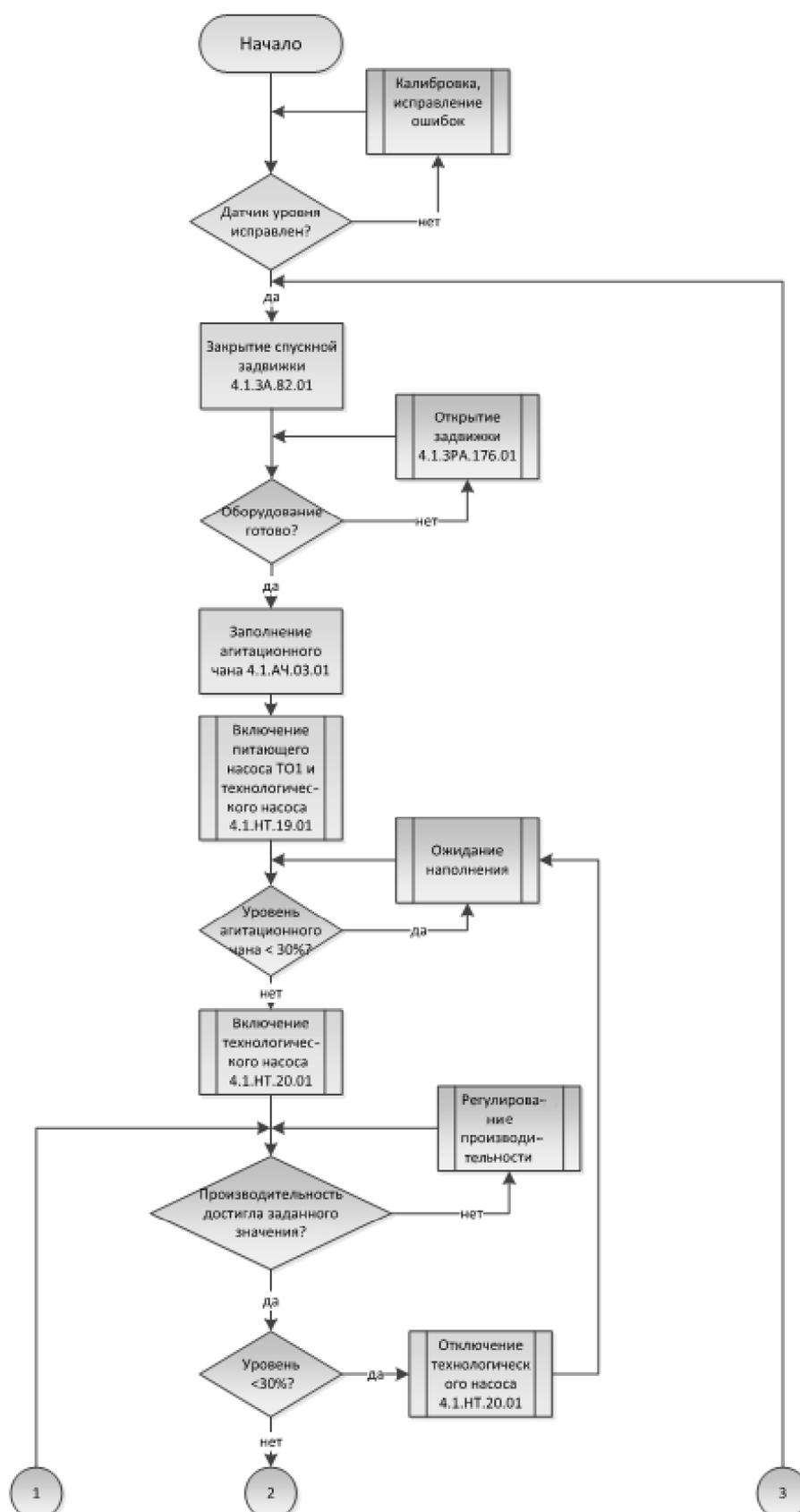


Рис. 1. Флотационный аппарат пневматического колонного типа
Fig. 1. Pneumatic column flotation apparatus

Автоматизированные системы управления...

Существующая система автоматизации и управления флотационным процессом хлористого калия предприятия ООО «ЕвроХим – УМК» имеет только регулирование уровня в агитационном чане.

На рис. 2 представлен алгоритм управления уровнем в агитационном чане.



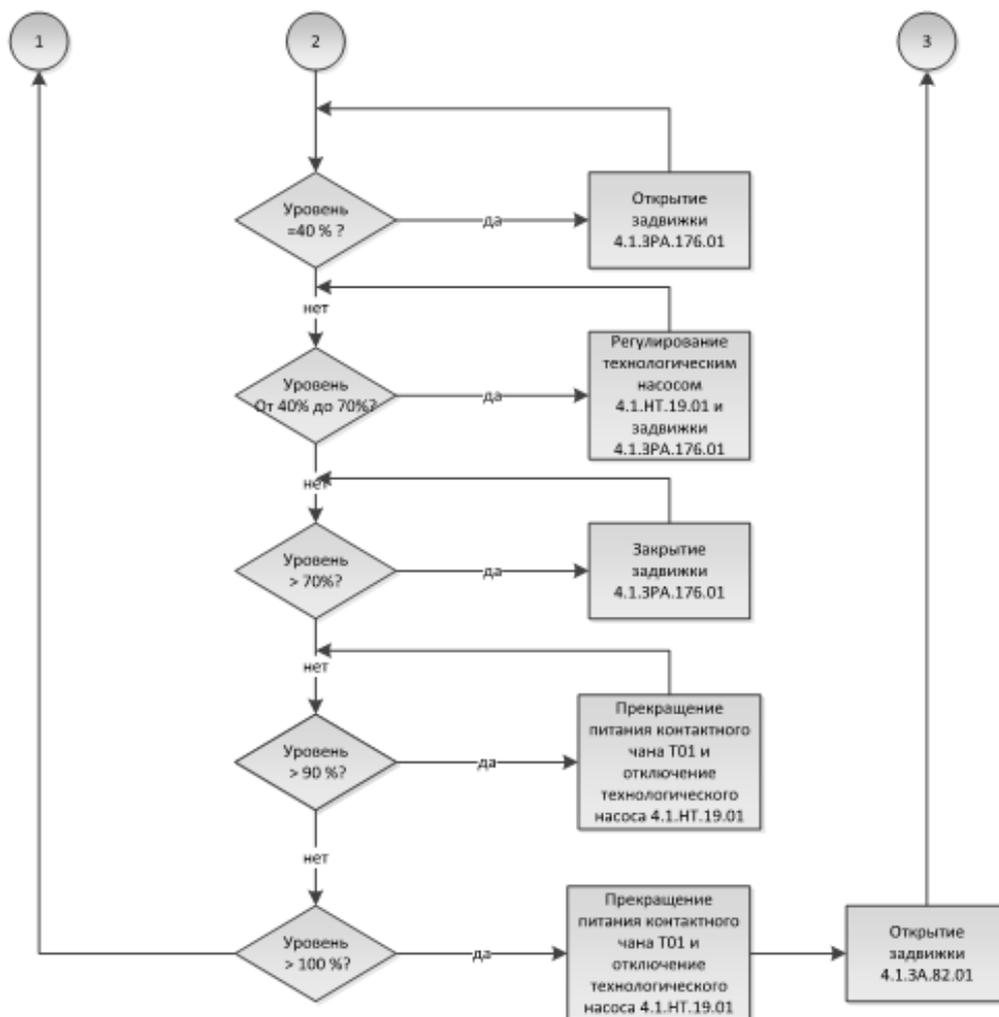


Рис. 2. Алгоритм управления уровнем
Fig. 2. Level control algorithm

1. Разработка алгоритма двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью

Создание двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотности позволяет достичь две цели: стабилизации плотности и стабилизации питания флотационной машины.

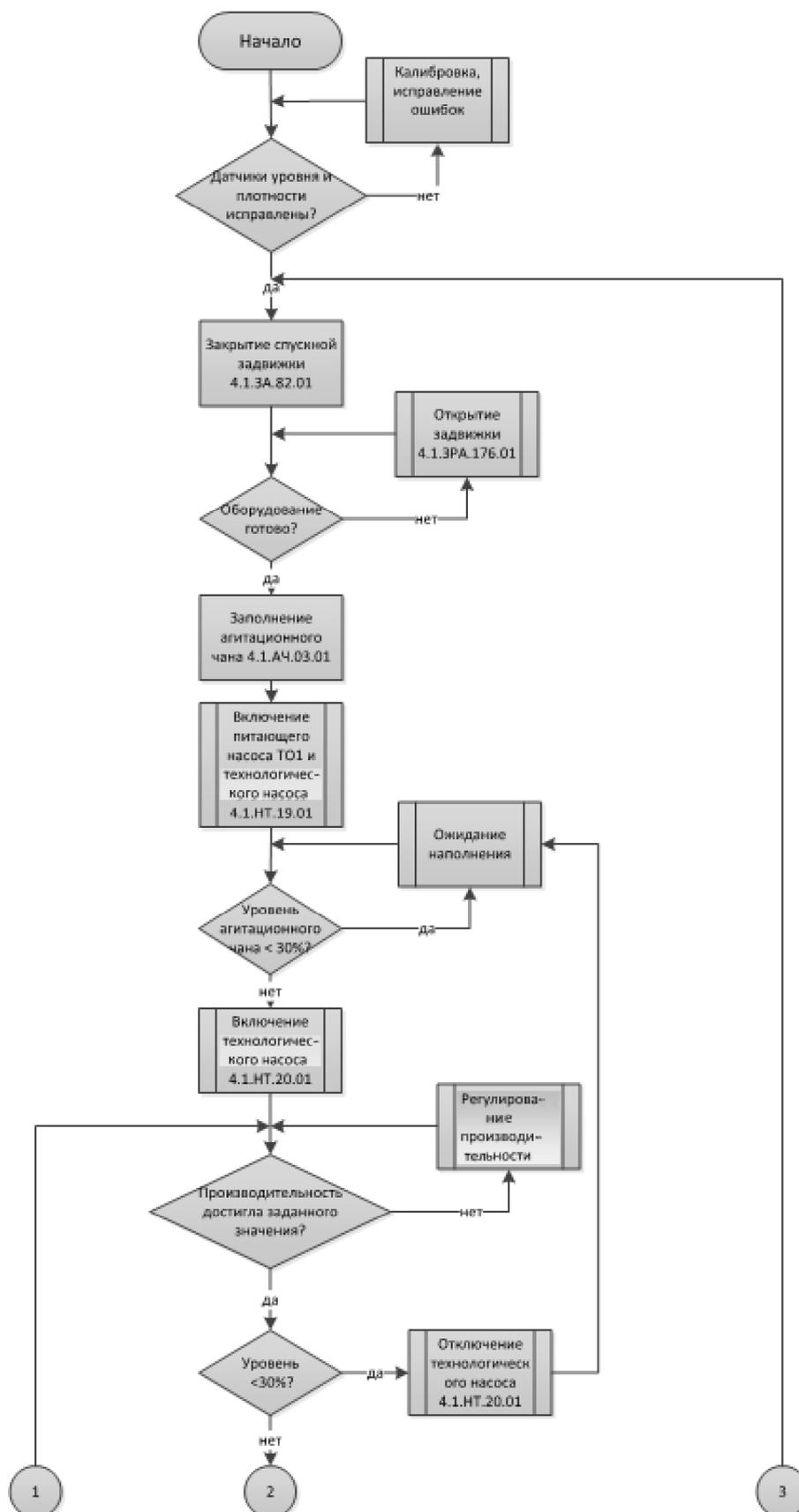
Создание алгоритма управления двухконтурной системой управления позволяет определить порядок выработки управляющих команд и последовательность действий. На рис. 3 изображен алгоритм управления уровнем и плотностью.

2. Синтез двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью

Синтез системы управления флотационным процессом хлористого калия подразумевает нахождение структуры этой системы, а также ее параметров для обеспечения заданных показателей качества управления при известных входных воздействиях.

С учетом алгоритмов управления были выделены 2 локальных контура регулирования уровня и плотности в агитационном чане.

Объект управления – агитационный чан – является емкостью, которая накапливает и сохраняет вещество, такими свойствами обладает идеальное интегрирующее звено.



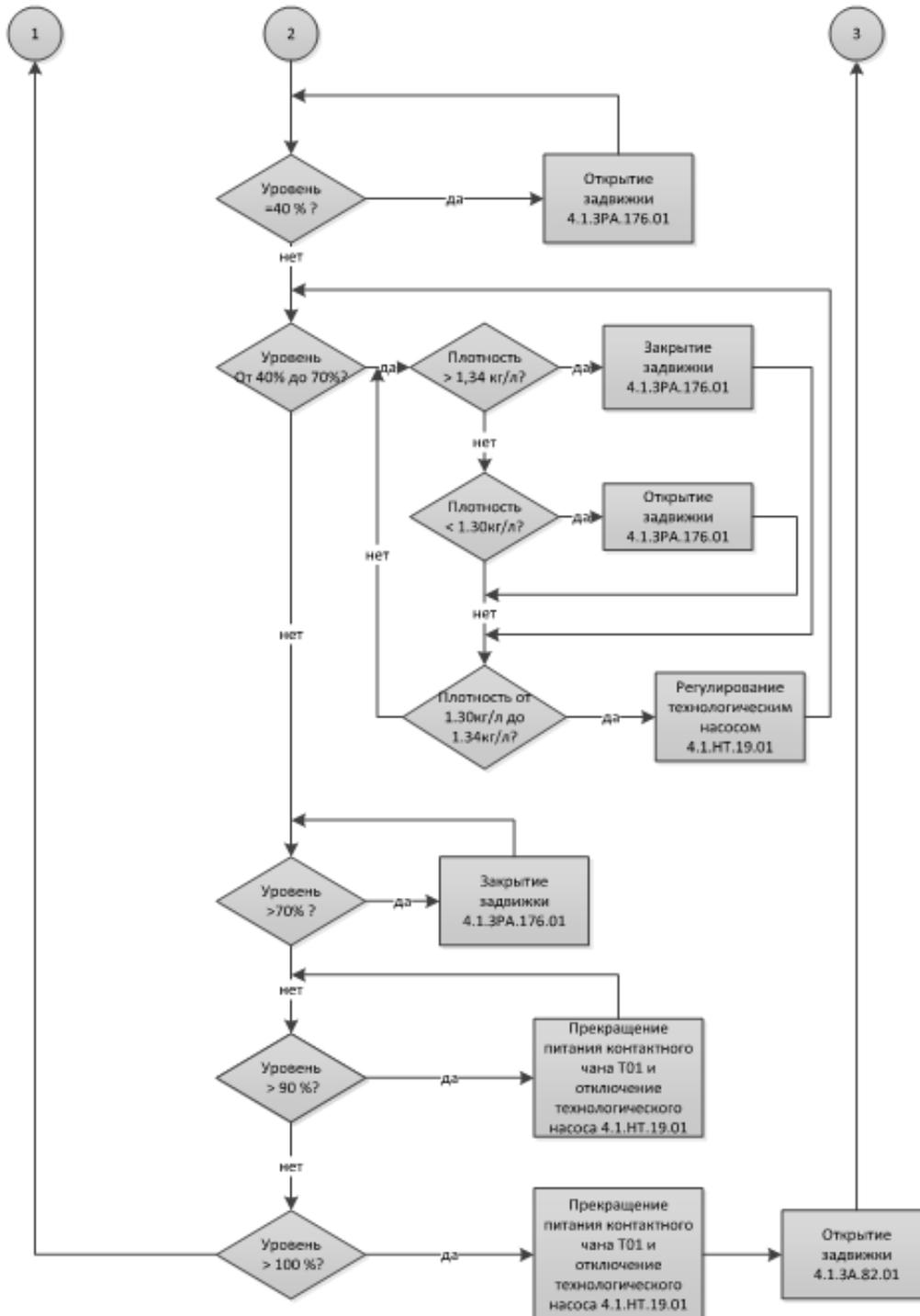


Рис. 3. Алгоритм управления уровнем и плотностью
Fig. 3. Algorithm for level and density control

Передаточная функция агитационного чана имеет вид:

$$W_{\text{АЧ}} = \frac{K_{\text{АЧ}}}{p} \quad (1)$$

Уровень в чане измеряется радарным уровнемером, где измерение уровня основано на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня. Передаточная функция датчика уровня выглядит следующим образом:

$$W_{\text{ДУ}} = K_{\text{ДУ}} \quad (2)$$

Автоматизированные системы управления...

Исполнительный механизм включает в себя преобразователь частоты, асинхронный двигатель и насос, передаточные функции которых представляют в виде апериодического звена первого порядка [3]:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{Tp+1}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлена структурная схема регулирования уровня в агитационном чане.

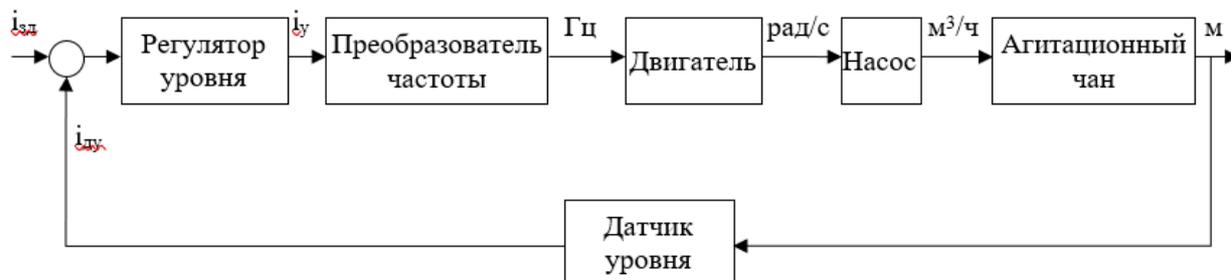


Рис. 4. Структурная схема регулирования уровня в агитационном чане
Fig. 4. Block diagram of level regulation in the agitation vat

Далее проводится расчёт всех объектов, которые включает в себя структурная схема (рис. 5).

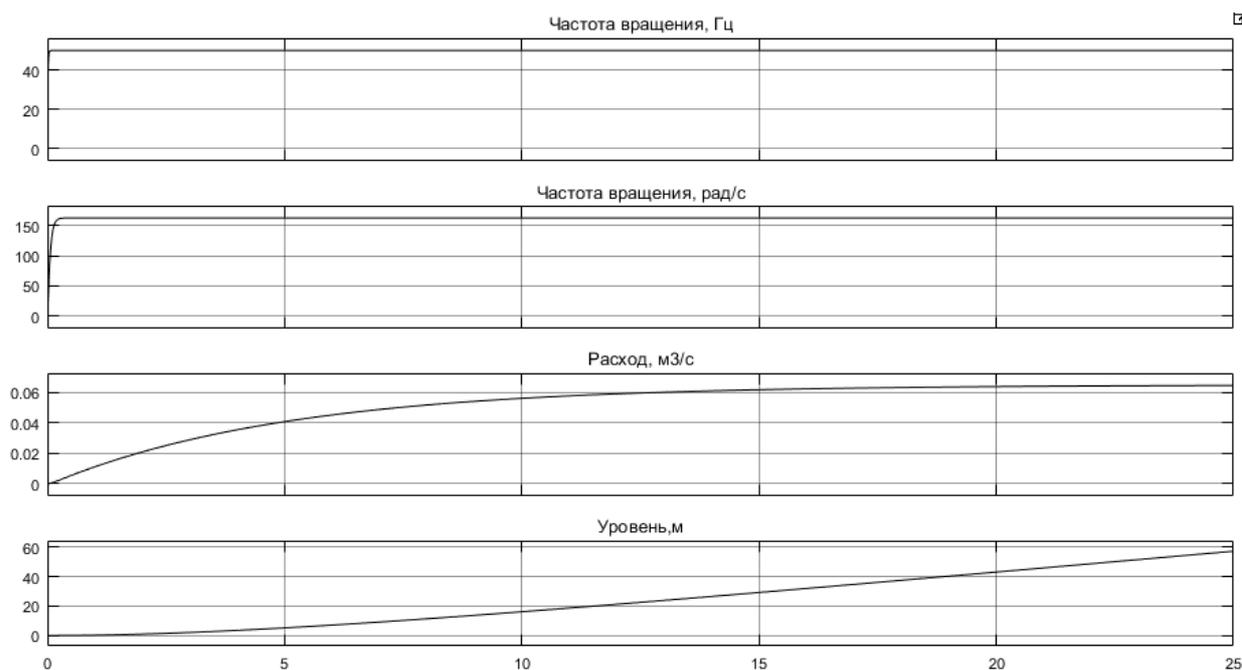


Рис. 5. График переходного процесса заполнения чана
Fig. 5. Schedule of the transient process of filling the vat

Поскольку в системе нет чистого запаздывания, то настройку регулятора произведем по методу параметрической оптимизации, а именно по критериям модульного (МО) или симметричного оптимума (СО).

Структурная схема системы управления уровнем с ПИД-регулятором приведена на рис. 6. График переходного процесса приведен на рис. 7.

Контур регулирования плотности в агитационном чане обеспечивает стабилизацию плотности в заданном интервале. Стабилизация плотности осуществляется регулированием расхода более густой пульпы через запорно-регулирующую арматуру (далее клапан), которая поступает из самой флотационной камеры в агитационный чан.

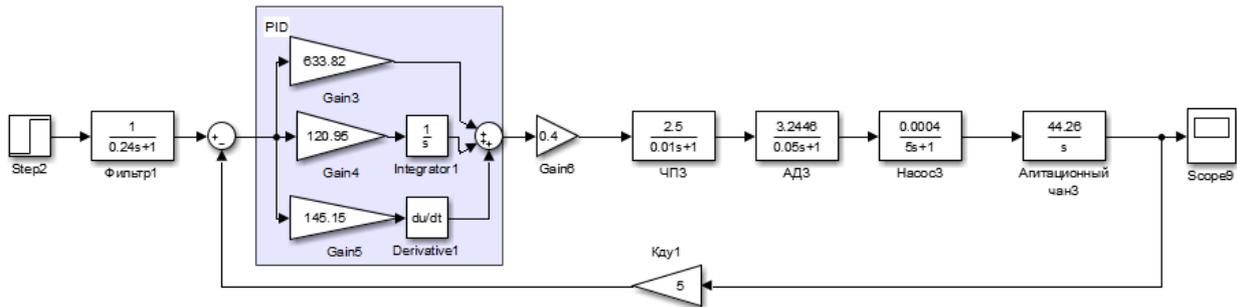


Рис. 6. Система управления с ПИД-регулятором
Fig. 6. Control system with PID controller

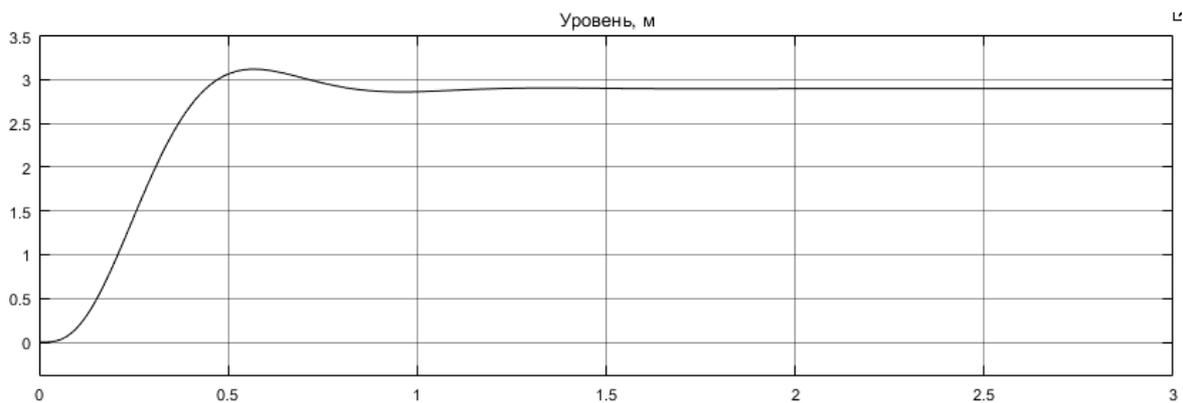


Рис. 7. График переходного процесса в системе управления с ПИД-регулятором
Fig. 7. Transient graph in a control system with a PID controller

В данном контуре регулирования объект управления – агитационный чан – является емкостью, которая осуществляет смешивание густой пульпы с маточным раствором, и для достижения однородной пульпы нужно время, поэтому передаточная функция объекта управления примет вид инерционного (апериодического) звена первого порядка. Передаточная функция агитационного чана имеет вид:

$$W_{\text{АЧ}} = \frac{K_{\text{АЧ1}}}{T_{\text{АЧ}} \cdot p + 1} \tag{4}$$

Плотность в чане измеряется проточным плотномером, где измерение плотности происходит напрямую. Передаточная функция датчика примет вид:

$$W_{\text{ДП}} = K_{\text{ДП}} \tag{5}$$

Исполнительным механизмом является клапан, передаточная функция которого выглядит как формула (3).

На рис. 8 представлена структурная схема регулирования плотности в агитационном чане.

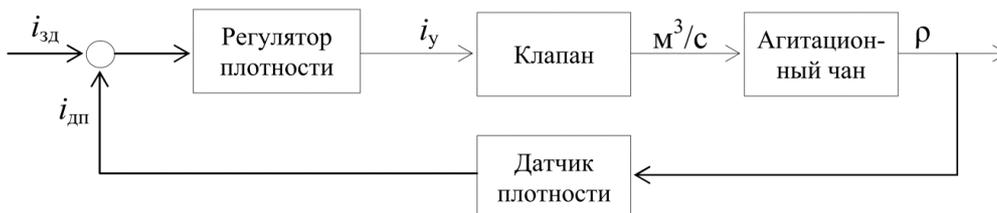


Рис. 8. Структурная схема регулирования плотности в агитационном чане
Fig. 8. Block diagram of density regulation in the agitation vat

Далее проводится расчёт всех объектов, которые включает в себя структурная схема.

После моделирования были получены графики переходных процессов, которые представлены на рис. 9.

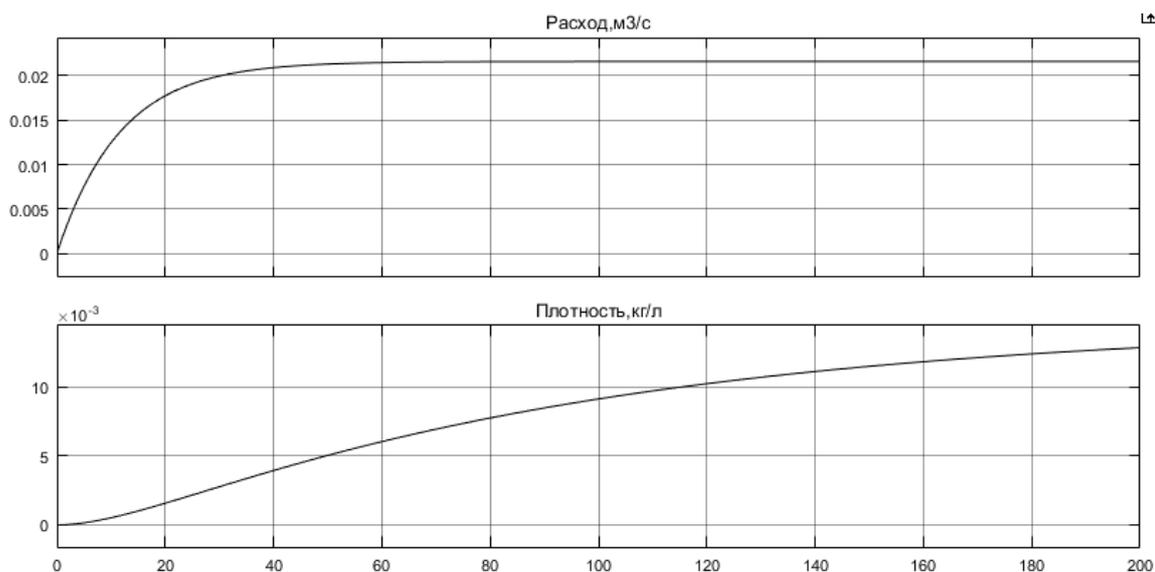


Рис. 9. График переходного процесса заполнения чана
Fig. 9. Schedule of the transient process of filling the vat

Для настройки контура применяется также критерий МО/СО [4]. Берется разомкнутая система с учетом датчика плотности, а также вводится дополнительный коэффициент, равный 0,2, который будет переводить сигнал процентного задания открывания клапана в аналоговый сигнал [5–8].

Структурная схема системы управления уровнем с ПИ-регулятором приведена на рис. 10. График переходного процесса приведен на рис. 11.

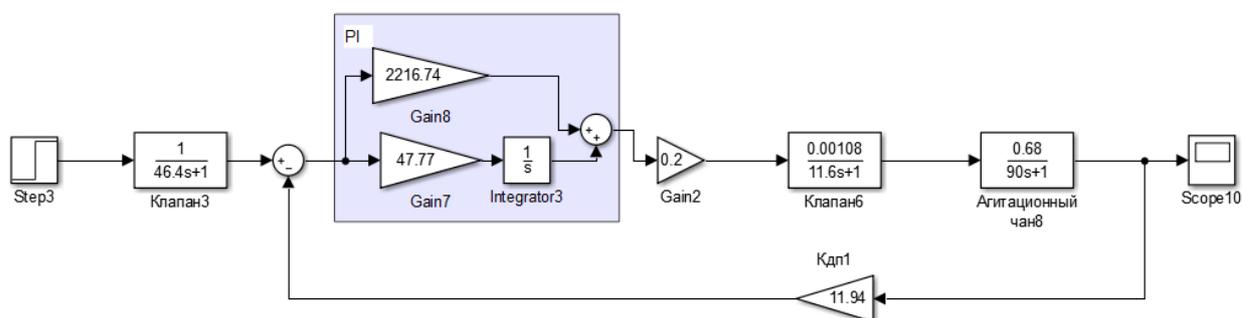


Рис. 10. Система управления с ПИ-регулятором
Fig. 10. Control system with PI controller

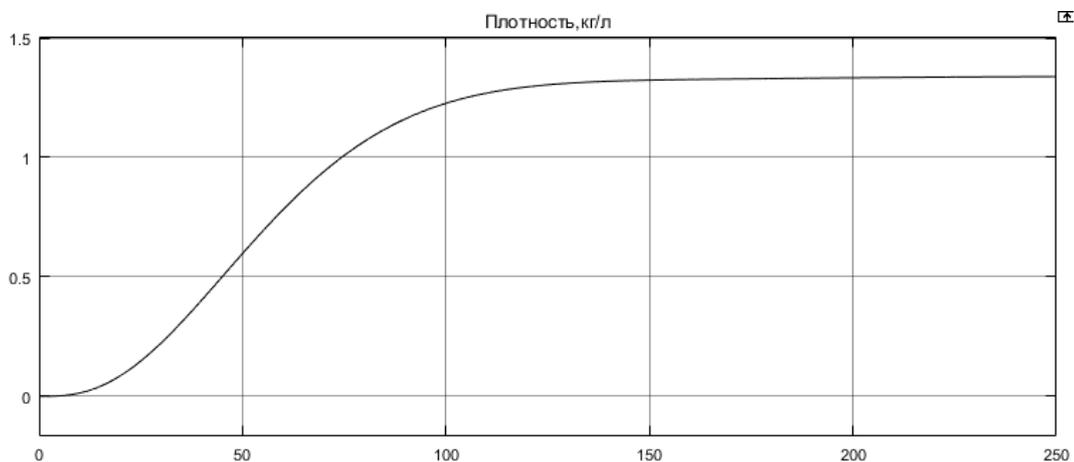


Рис. 11. График переходного процесса в системе управления с ПИ-регулятором
Fig. 11. Graph of the transient process in a control system with a PI controller

Объединим контур регулирования уровня пульпы в агитационном чане с контуром регулирования плотности пульпы, причем локальный контур регулирования плотности будет возмущающим воздействием для локального контура регулирования уровня [9–12].

Структурная схема и графики переходных процессов представлены на рис. 12 и 13 соответственно.

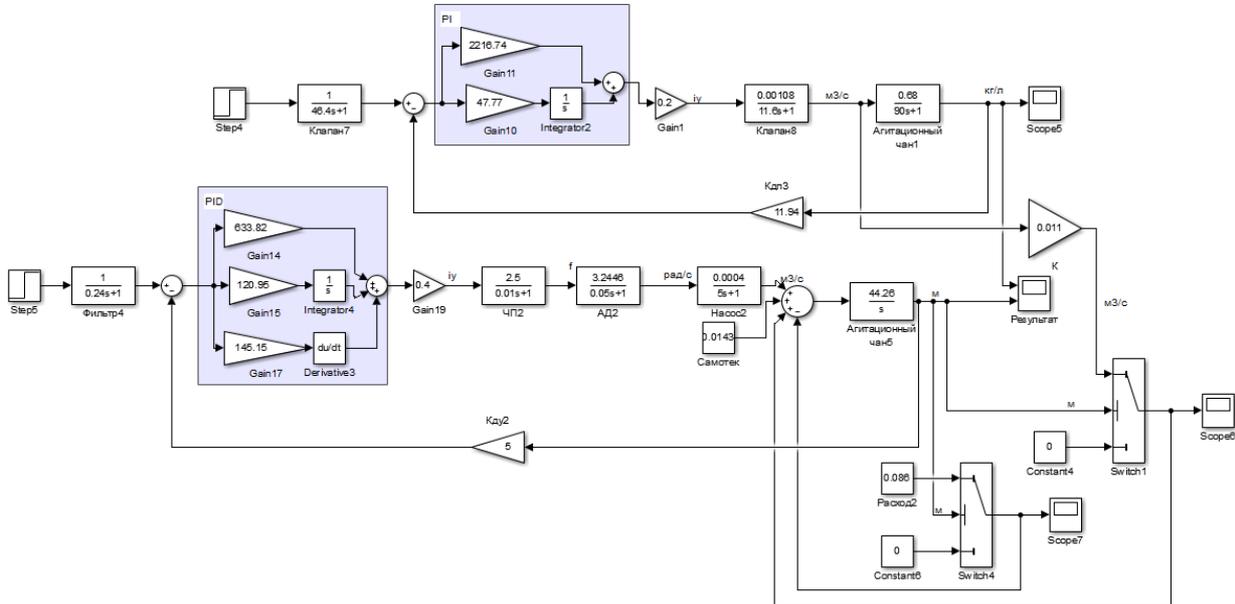


Рис. 12. Система управления
Fig. 12. Control system

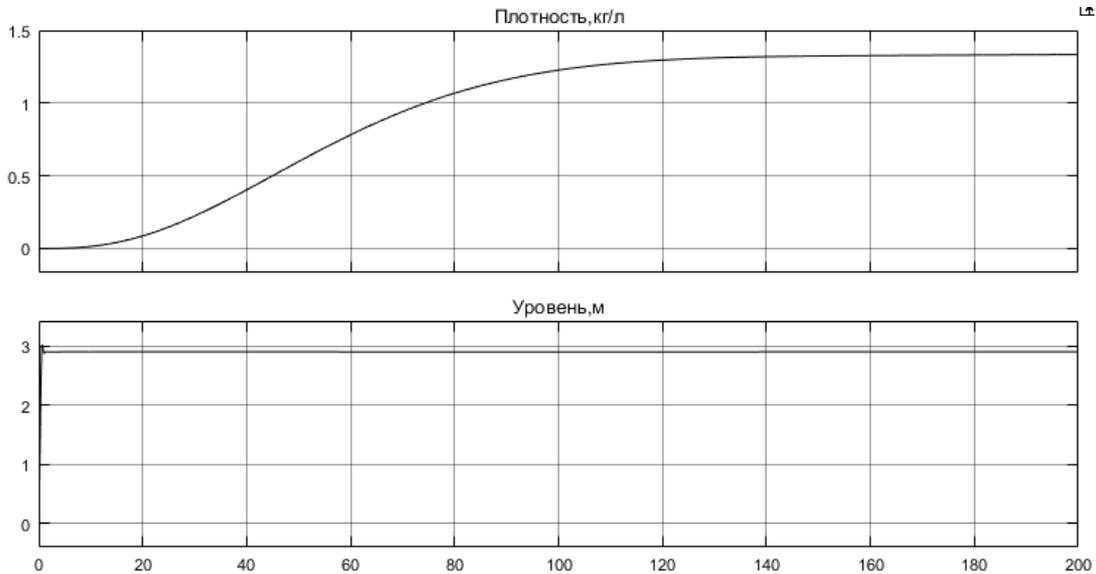


Рис. 13. Переходные процессы
Fig. 13. Transient processes

3. Анализ полученных систем автоматического регулирования

После синтеза локальных и комбинированных САР необходимо рассчитать основные показатели качества для удостоверения, что САР является приемлемой. Рассмотрим отдельно показатели качества локальных САР и комбинированную САР.

Качество системы определяется такими показателями, как время переходного процесса, перерегулирование и ошибка системы. Первые два показателя показывают динамику процесса, а последний показатель показывает точность системы.

Автоматизированные системы управления...

Время переходного процесса показывает общее время процесса, за которое выходная величина $h(t)$ входит в пятипроцентную зону и не выходит из нее. Этот показатель характеризует быстроедействие системы [13–15].

Далее представлена сводная таблица показателей качества.

Основные показатели качества САР
The main indicators of the quality of ACS

САР \ ПК	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$e(\infty)$
САР уровня	0,674	7,5	0
САР плотности	110,3	0	0
Комбинированная САР	Уровень/Плотность 0,493/110,3	Уровень/Плотность 4,3/0	0

Заключение

Готовая двухконтурная система автоматического управления, разработанная в программном пакете MATLAB Simulink, согласно анализу полученных показателей процесса обеспечивает стабилизацию плотности и уровня в агитационном чане для флотации.

Литература

1. Печковский, В.В. *Технология калийных удобрений: учеб. пособие для вузов* / В.В. Печковский, Х.М. Александрович, Г.Ф. Пинаев. – Минск: Вышэйш. шк, 1968.
2. Кувшинский, М.Н. *Процессы и аппараты химической промышленности* / М.Н. Кувшинский. – М., 1998.
3. Топчиев, Ю.И. *Атлас для проектирования систем автоматического регулирования* / Ю.И. Топчиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
4. Андриевская, Н.В. *Теория автоматического управления* / Н.В. Андриевская. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2006. – 92 с.
5. *An evaluation of machine learning and artificial intelligence models for predicting the flotation behavior of fine high-ash coal* / D. Ali, M.B. Hayat, L. Alagha, O.K. Molatlhegi // *Advanced Powder Technology*. – 2018. – Vol. 29. – P. 3493–3506. DOI: 10.1016/j.apt.2018.09.032
6. *Carvalho, M.T. Control of a flotation column using fuzzy logic inference* / M.T. Carvalho, F. Durão // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2002. – Vol. 125. – P. 121–133. DOI: 10.1016/S0165-0114(01)00048-3
7. *Chettibi, M. Physicochemical modeling of galena flotation system* / M. Chettibi, A. Boutrid, A.A. Abramov // *Journal of Mining Science*. – 2014. – Vol. 50, no. 6. – P. 1069–1078. DOI: 10.1134/S106273911406009X
8. *Farrokhpay, S. The significance of froth stability in mineral flotation – a review* / S. Farrokhpay // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 166. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.cis.2011.03.001
9. *Fayed, H. Numerical simulations of two-phase flow in a self-aerated flotation machine and kinetics modeling* / H. Fayed, S. Ragab // *Minerals*. – 2015. – Vol. 5 (2). – P. 164–188. DOI: 10.3390/min5020164
10. *Jovanović, I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review* // *Mineral Engineering*. – 2015. – Vol. 70. – P. 228–249. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.022
11. *Flotation froth monitoring using multiresolutional multivariate image analysis* / J.J. Liu, J.F. MacGregor, C. Duchesne, G. Bartolacci // *Mineral Engineering*. – 2005. – Vol. 18. – P. 65–76. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.010
12. *Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастической модели процесса флотации калийной руды* / А.В. Затонский, С.А. Варламова, А.В. Мальшева, А.А. Мясников // *Интернет-журнал Науковедение*. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 87.
13. *Мальшева, А.В. Исследование перспектив перехода на автоматическое управление процессом флотации калийной руды* / А.В. Затонский, А.В. Мальшева // *Автоматизация. Современные технологии*. – 2019. – № 3. – С. 119–127.

14. Малышева, А.В. Модернизация алгоритмов блочного распознавания параметров пенного слоя при флотации калийных руд / А.В. Затонский, А.В. Малышева // Обогащение руд. – 2018. – № 2 (374). – С. 35–41.

15. Малышева, А.В. Определение параметров переходных процессов в промышленной флотомашине калийной руды по данным видеоряда / А.В. Затонский, А.В. Малышева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 26–39.

Фелькер Мария Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; erymarya@yandex.ru.

Бахтерева Карина Дмитриевна, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; ganzert_karina96@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr210113

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE FLOTATION PROCESS OF POTASSIUM CHLORIDE

M.N. Fel'ker, erymarya@yandex.ru,
K.D. Bakhtereva, ganzert_karina96@mail.ru

*Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch,
Berezniki, Russian Federation*

The article discusses the creation of an algorithm and the synthesis of a two-loop automatic control system for level and density, instead of the current single-loop one. **Aim.** Density stabilization and stabilization of the flotation machine power supply by creating a two-circuit automatic level and density control system in order to improve the quality of the final product. **Materials and methods.** Since there is no net lag in the system, the controller is tuned using the parametric optimization method, namely: according to the criteria of modular (MO) or symmetric optimum (CO). The MO/CO criterion is also used to adjust the contour. All automatic control systems are obtained in the MATLAB Simulink software package. Control quality is measured by metrics such as transient time, overshoot, and system error. The first two indicators show the dynamics of the process, and the last indicator shows the accuracy of the system. **Conclusion.** The finished two-loop automatic control system, developed in the software package MATLAB Simulink, according to the analysis of the obtained process parameters, provides stabilization of the density and level in the agitation tank for flotation.

Keywords: flotation, reagent mode, pulp, agitation vat, density stabilization, level stabilization.

References

1. Pechkovskiy V.V. *Tekhnologiya kaliynykh udobreniy* [Potash fertilizers technology]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1968. 264 p.
2. Kuvshinskiy M.N. *Protsessy i apparaty khimicheskoy promyshlennosti* [Processes and devices of the chemical industry]. Moscow, 1998.
3. Topcheyev Yu.I. *Atlas dlya proyektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Atlas for the design of automatic control systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 752p.
4. Andrievskaya N.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. Perm, Perm St. Techn. Univ. Publ., 2006. 92 p.

5. Ali D. An evaluation of machine learning and artificial intelligence models for predicting the flotation behavior of fine high-ash coal. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29, pp. 3493–3506. DOI: 10.1016/j.appt.2018.09.032
6. Carvalho M.T. Control of a flotation column using fuzzy logic inference. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, vol. 125, pp. 121–133. DOI: 10.1016/S0165-0114(01)00048-3
7. Chettibi M. Physicochemical modeling of galena flotation. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 1069–1078. DOI: 10.1134/S106273911406009X
8. Farrokhpay S. The significance of froth stability in mineral flotation – a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 166, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.cis.2011.03.001
9. Fayed H. Numerical simulations of two-phase flow in a self-aerated flotation machine and kinetics modeling. *Minerals*, 2015, vol. 5 (2), pp.164–188. DOI: 10.3390/min5020164
10. Jovanović I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review. *Mineral Engineering*, 2015, vol. 70, pp. 228–249. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.022
11. Liu J.J. Flotation froth monitoring using multiresolutional multivariate image analysis. *Mineral Engineering*, 2005, vol. 18, pp. 65–76. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.010
12. Malysheva A.V. [Using videographic information to clarify the dynamic stochastic model of the potash ore flotation process]. *Internet Journal of Science*, 2017, vol. 9, no. 2, p. 87. (in Russ.)
13. Malysheva A.V. [Investigation of the prospects for the transition to automatic control of the potash ore flotation]. *Automation. Modern Technologies*, 2019, no. 3, pp. 119–127. (in Russ.)
14. Malysheva A.V. [Modernization of algorithms for glare recognition of foam layer parameters during flotation of potash ores]. *Processing of Ores*, 2018, no. 2 (374), pp. 35–41. (in Russ.)
15. Malysheva A.V. [Determination of the parameters of transient processes in an industrial potash ore flotation machine according to video data]. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics*, 2019, no. 1, pp. 26–39. (in Russ.)

Received 28 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Фелькер, М.Н. Разработка системы автоматического управления флотационным процессом хлористого калия / М.Н. Фелькер, К.Д. Бахтерева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 147–158. DOI: 10.14529/ctcr210113

FOR CITATION

Fel'ker M.N., Bakhtereva K.D. Development of an Automatic Control System for the Flotation Process of Potassium Chloride. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 147–158. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210113