

Б.А. Вишняк, В.В. Морозов, Т.С. Николаева

КОМБИНИРОВАННОЕ МОДЕЛЬ-ОРИЕНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СУШИЛЬНО-ФИЛЬТРОВАНЫМ КОМПЛЕКСОМ

При моделировании процессов фильтрации и сушки сильвинитовых концентратов последние изучены как единый объект управления. Получены линейные математические модели вакуум-фильтров, сушилки, дозаторов и иных узлов сушильно-фильтровального комплекса. Составляющие модель уравнения связывают влажность осадка и производительность барабанного вакуум-фильтра со скоростью вращения барабана, величиной вакуума, подводимого к барабану, соотношения жидкой и твердой фаз суспензии питания. Модель сушки связывает влажность концентрата и массовую долю антислеживающей добавки с расходом концентрата, поступающего в сушилку, его влажностью, расходом топлива, массовой долей нерастворимого остатка в поступающем концентрате. На основе полученных статистических моделей переделов создан алгоритм и система автоматизированного управления сушильно-фильтровальным комплексом, обеспечивающая оптимизацию технологического режима. Показано, что при комбинированном автоматизированном управлении достигается уменьшение влажности концентрата на 0,25% при сокращении расхода топлива на 11,8% и снижении расхода антислеживателей.

Ключевые слова: сильвинитовые руды, концентрат, фильтрация, сушка, комбинированная модель, алгоритм, система управления.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-22-29

Введение

Сушильно-фильтровальный комплекс сильвинитовой обогатительной фабрики включает в себя ряд параллельно работающих групп аппаратов: вакуум-фильтров и барабанных сушилок [1, 2]. Анализ существующих решений по автоматизации и управлению технологическими процессами фильтрации и сушки показал, что в большинстве случаев АСУ ТП обезвоживания концентрата в условиях сильвинитовой обогатительной фабрики состоит из локальных систем автоматического контроля и регулирования каждого процесса в отдельности [3, 4].

Задача эффективного управления состоит в том, чтобы обеспечить оптимальную работу всего сушильно-фильтровального комплекса, что обеспечит улучшения качества выпускаемой продукции, экономичное и рациональное использование топлива [5, 6].

Общие принципы создания объединенной АСУ ТП

Основной целью исследований была разработка модели и алгоритма для автоматизированной системы управления сушильно-фильтровальным комплексом (СФК), обеспечивающей повышение эф-

фективности использования топливно-энергетических, сырьевых ресурсов и качества выпускаемой продукции. Для решения поставленной задачи были использованы принципы комбинированного модель-ориентированного управления технологическими процессами, разработанными зарубежными и российскими учеными [7–9].

Поставленная цель определила перечень основных задач:

- выбор общего критерия эффективности и постановка задач управления комплексом;
- разработка математических моделей процессов фильтрования, сушки и комплекса в целом;
- разработка критериев и математическая формулировка задач управления технологическими процессами СФК с учетом взаимосвязей между ними;
- выбор методов и решение задач оптимального управления;
- разработка на основе решения этих задач алгоритмов и способов управления технологическими процессами, выбор структуры системы автоматизированного управления СФК;
- опытно-промышленная проверка и техническая реализация выполненных исследований и разработок.

Действующие на калийных предприятиях вакуум-фильтры позволяют обезвоживать концентрат, как правило, до влажности 6,5–12%. Более значительное уменьшение влажности осадка чрезмерно увеличивает затраты на фильтрование и в то же время значительное увеличение влажности осадка вызывает рост затрат на сушку. Получение концентрата оптимальной влажности снижает расход топлива и степень выгорания реагентов (антислеживающих добавок) при сушке, а, следовательно, уменьшает их расход в высушенный концентрат, что также снижает суммарные затраты при обезвоживании [10].

Минимума суммарных затрат при эксплуатации СФК можно достичь последовательным решением задач оптимального управления процессами фильтрования и сушки калийного концентрата, где решением первой задачи является выбор режима работы вакуум-фильтров, обеспечивающего оптимальную влажность общего осадка (в условиях имеющейся мощности фильтровального оборудования), решением второй – поддержание минимума эксплуатационных затрат, связанных с расходом топлива и антислеживающей добавки на единицу высушенного концентрата.

Разработка моделей процессов фильтрации-сушки

Сушильно-фильтровальный комплекс сильвинитовой обогатительной фабрики, включает в себя последовательное соединение m вакуум-фильтров $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$ и n барабанных сушилок C_1, C_2, \dots, C_n , распределительной емкости PE , установленной перед вакуум-фильтрами, распределительного конвейера PK — перед сушильными барабанами и сборного конвейера SK — после барабанов (рис. 1).

Каждый промышленный аппарат, несмотря на их однотипность, имеет определенную специфику или, иначе говоря, собственную нагрузочную характеристику. Это связано с неравномерностью износа, различием значений управляющих и возмущающих воздействий, например, отличием в значении подсосов для сушилок, состояния фильтроткани для вакуумфильтров, различием конструктивных элементов рассматриваемых аппаратов.

С учетом вышеизложенного в общем виде линейные математические модели статике для i -го вакуум-фильтра, k -ой сушилки и всего СФК в целом запишутся:

$$W_i^{oc} = a_{oi} + a_{1i}N_i - a_{2i}P + a_{3i}\beta^{nmi} + a_{4i}p, \quad (1)$$

$$i = 1, \bar{m};$$

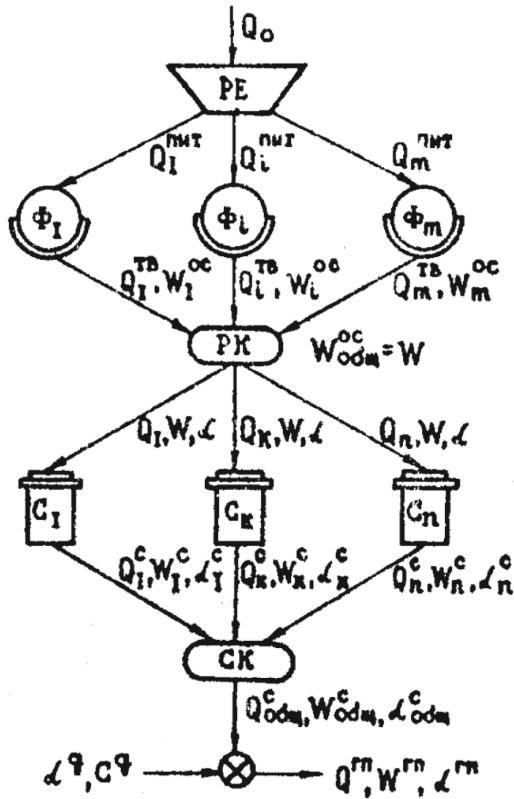


Рис. 1. Принципиальная схема цепи аппаратов сушильно-фильтровального комплекса

$$Q_i^{TB} = b_{0i} + b_{1i}N_i + b_{2i}P - b_{3i}\rho, \quad i = 1, \bar{m}; \quad (2)$$

$$W_k^c = -c_{0k} + c_{1k}Q_k + c_{2k}W - c_{3k}Q_k^T + c_{4k}\beta - c_{5k}t_k^{отх}, \quad k = 1, \bar{n}; \quad (3)$$

$$\alpha_k^c = -d_{0k} + d_{1k}\alpha + d_{2k}Q_k + d_{3k}W - d_{4k}t_k^{отх}, \quad k = 1, \bar{n}, \quad (4)$$

где $W_{ос}^i$ — влажность осадка, %; Q_i^{TB} — производительность фильтра по твердому, т/ч; N^i — скорость вращения барабана вакуум-фильтра, об/мин; P — величина вакуума, подводимого к барабанам вакуум-фильтров, кгс/см²; $\beta^{пвт}$ — массовая доля нерастворимого остатка (н.о.), %; ρ — массовое отношение жидкой фазы к твердой, ж/т; i — номер вакуум-фильтра; W_k^c — влажность высушенного концентрата, %; α_k^c — массовая доля антислеживающей добавки в высушенном концентрате, г/т; Q_k — расход кон-

центрата, поступающего в сушилку, т/ч; W — его влажность, %; Q_k^T — расход топлива, кг/ч; β — массовая доля н.о. в поступающем концентрате, %; $t_k^{отх}$ — температура отходящих газов, °С; α — массовая доля антислеживающей добавки в поступающем концентрате, г/т; k — номер барабанной сушилки; $a_{jk}, b_{ji}, c_{jk}, d_{jk}$ — параметры при переменных.

Полученные уравнения связывают влажность осадка и производительность по твердому барабанного вакуум-фильтра со скоростью вращения барабана, величины вакуума, подводимого к барабану, соотношения жидкой и твердой фаз суспензии питания. Значительное влияние на влажность осадка оказывает содержание нерастворимого остатка ($\beta^{пвт}$) в суспензии питания. Повышенное содержание $\beta^{пвт}$ в суспензии увеличивает

ет влажность осадка и вызывает дополнительный расход топлива при сушке последнего, что следует из уравнения (3). Наличие $\beta^{пт}$ в суспензии питания, поступающей на фильтрование и концентрате, поступающем на сушку, является специфичным, отрицательным явлением для процессов обезвоживания сильвинитовой обогатительной фабрики.

Модель процесса сушки связывает влажность высушенного концентрата и массовую долю антислеживающей добавки в высушенном концентрате с расходом концентрата, поступающего в сушилку, его влажностью, расходом топлива, массовой долей нерастворимого остатка в поступающем концентрате. Учитываются температура отходящих газов и массовая доля антислеживающей добавки в поступающем концентрате.

Также специфичным для СФК сильвинитовой обогатительной фабрики является наличие антислеживающих реагентов — аминов в концентрате, поступающем в сушку. Исключение их излишнего выгорания — одна из основных задач экономичного ведения процесса сушки.

Уравнения (1)–(4) использованы в дальнейшем для определения оптимальных управляющих воздействий каждого из m параллельно работающих вакуум-фильтров и n барабанных сушилок.

Используя аддитивность общего критерия оптимизации, введем для процесса фильтрования следующую целевую функцию, обеспечивающую минимум влажности общего осадка:

$$W_{\text{общ}}^{\text{OC}} = \frac{\sum_{i=1}^m W_i^{\text{OC}} \cdot Q_i^{\text{TB}}}{\sum_{i=1}^m (100 - W_i^{\text{OC}}) \cdot Q_i^{\text{TB}}} \rightarrow \min \quad (5)$$

при заданном общем расходе (нагрузке) по твердому и условиях (1), (2). Аналогичным образом вводится целевая функция для процесса сушки, учитыва-

ющая как расход топлива, так и степень выгорания антислеживателя в процессе сушки:

$$\tilde{C}_{\text{yg}} = \frac{S^T \cdot \sum_{k=1}^n g_k^T \cdot Q_k^C - S^g \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k^C \cdot Q_k^C}{\sum_{k=1}^n Q_k^C} \rightarrow \min \quad (6)$$

при заданной общей нагрузке по влажному концентрату и условиях (3), (4), где \tilde{C}_{yg} — переменная часть эксплуатационных затрат, связанных с расходами топлива и антислеживателя, руб/т; S^T — цена топлива, руб/кг; S^g — цена реагента-антислеживателя, руб/г; g_k^T — удельный расход топлива, кг/т; α_k^C — удельная массовая доля антислеживателя в высушенном концентрате, г/т; Q_k^C — расход высушенного концентрата, т/ч.

Одновременно вводится следующее ограничение: усредненная влажность общего потока концентрата после барабанных сушилок на сборном конвейере $W_{\text{общ}}^C$ должна соответствовать заданному значению M

$$W_{\text{общ}}^{\text{OC}} = \frac{\sum_{k=1}^n W_k^C \cdot Q_k^C}{\sum_{k=1}^n Q_k^C} = M = \text{const.} \quad (7)$$

В выражениях (5), (6) используются индивидуальные характеристики параллельно работающих вакуум-фильтров и сушилок, что позволяет определить оптимальные значения управляющих воздействий для всех аппаратов СФК.

Разработанные критерии и задачи управления технологическими процессами СФК имеют однозначную связь с суммарными затратами всего комплекса в условиях сильвинитовых обогатительных фабрик. Решение поставленных задач получено методом неопределенных множителей Лагранжа, позволяющим свести задачи с ограничениями к обычным экстремальным задачам без ограничений. При этом первая задача

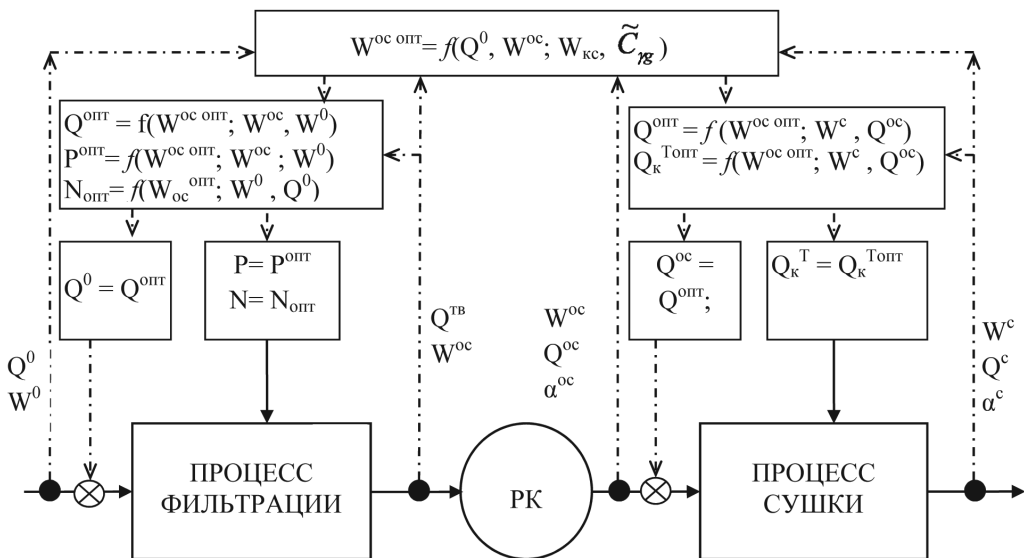


Рис. 2. Блок-схема управления процессами фильтрации-сушки: W – влажность (плотность); Q – производительность (расход); α – массовая доля антислеживателя; P – вакуум на фильтре; N – скорость вращения барабана фильтра; PK – распределитель кека; 0 – исходного питания; тв,oc – осушенного концентрата (после фильтрации или перед сушкой); c – сухого концентрата (после сушки); т – топлива; opt – оптимальное значение

(5) сводится к решению системы линейных, а вторая (6) – к решению системы нелинейных уравнений.

Аналитическим решением системы линейных уравнений получена формула для определения оптимальных значений скоростей вращения барабанов вакуум-фильтров:

$$N_i = \frac{\beta_i}{\alpha_i} \frac{b_{1i} \left(\sum_{i=1}^m A_i - Q_0 - \sum_{i=1}^m b_{1i} \cdot \frac{\beta_i}{\alpha_i} \right)}{\sum_{i=1}^m b_{1i}^2}, \quad (8)$$

$$i = 1, \bar{m},$$

$$\text{где } \beta_i = (a_{1i} A_i + b_{1i} B_i) \cdot Q_0^{-1};$$

$$\alpha_i = 2a_{1i} \cdot b_{1i} \cdot Q_0^{-1}; A_i = b_{0i} + b_{2i} P - b_{3i} \rho;$$

$$B_i = a_{0i} - a_{2i} P + a_{3i} \beta^{пит} + a_{4i} \rho.$$

Решение системы нелинейных уравнений задачи оптимального управления процессом сушки производилось методом Ньютона, в результате были определены оптимальные значения расходов концентрата, поступающего на барабан-

ные сушилки и соответствующие им расходы топлива.

Испытания АСУТП комплекса фильтрации-сушки

Результаты выполненных исследований были проверены в промышленных условиях в СФК сльвинитовой обогатительной фабрики ОАО «Беларуськалий». Реализация разработанных алгоритмов управления обеспечивалась АСУ СФК, структура которой представлена на рис. 2. Автоматизированное управление СФК сльвинитовой обогатительной фабрики осуществляется в режиме супервизорного управления решением задач стабилизации и оптимизации процессов фильтрования и сушки, согласования нагрузок и ввода водорастворимых антислеживающих добавок в высушенный концентрат с последующей реализацией управляющих воздействий.

Опытно-промышленные испытания разработанных алгоритмов проведены

Значение основных показателей СФК сильвинитовой обогатительной фабрики в режимах фактически существующего и автоматизированного управления

Q_0	Существующий режим управления				Режим комбинированного управления			
	$W_{\text{общ}}^{\text{ос}}$	$\Sigma Q_{\text{к}}^{\text{т}}$	$\alpha_{\text{общ}}^{\text{с}}$	$W_{\text{общ}}^{\text{с}}$	$W_{\text{общ}}^{\text{ос}}$	$\Sigma Q_{\text{к}}^{\text{т}}$	$\alpha_{\text{общ}}^{\text{с}}$	$W_{\text{общ}}^{\text{с}}$
70	7,12	735,4	43,8	0,5	6,80	898,2	48,8	0,5
80	7,51	1012,5	36,5	0,2	7,23	581,3	36,8	0,5
90	7,87	1277,5	38,6	0,4	7,66	919,0	40,8	0,5
100	8,31	1478,8	42,2	0,3	8,10	1250,0	45,1	0,5
110	8,71	1594,9	46,2	0,5	8,51	1589,1	49,4	0,5
120	9,16	2231,3	51,6	0,5	8,94	2111,8	51,3	0,5
Среднее	8,12	1388,4	43,2	0,4	7,84	1224,9	45,4	0,5

на трех параллельно работающих вакуум-фильтрах и двух барабанных сушилках. Расчет управляющих воздействий на аппараты (скорость вращения барабанов вакуум-фильтров, расходы концентрата и топлива на барабанные сушилки) был произведен по разработанным алгоритмам с учетом ограничений, наложенных на управляющие воздействия и соответствующих промышленным условиям.

В таблице представлены сравнительные результаты основных показателей, характеризующие эффективность использования автоматизированной системы управления при различных значениях входной нагрузки Q_0 , поступающей на обезвоживание.

Сравнение приведенных данных показывает, что применение комбинированного автоматизированного управления в соответствии с разработанными алгоритмами позволяет снизить влажность концентрата после фильтрования, в среднем на 0,25%, уменьшить расход топлива на 11,8% и увеличить содержание остаточных флотореагентов (антислеживателей) в высушенном концентрате на 5,1%, что в целом снижает эксплуатационные затраты на единицу продукции. Полученные результаты подтвердили возможность повышения эф-

фективности работы СФК за счет экономии топливно-энергетических ресурсов, а также дорогостоящих антислеживающих добавок.

Выводы

Разработаны модель и алгоритм комбинированного управления сушильно-фильтровальным предельным с применением статистических моделей барабанного вакуум-фильтра и барабанной сушилки, устанавливающих связь влажности осадка, производительности по твердому, влажности высушенного концентрата, содержания в нем остаточных флотореагентов (антислеживающих добавок) с входными переменными, управляющими и возмущающими воздействиями рассматриваемых аппаратов.

Сравнение основных показателей СФК сильвинитовой обогатительной фабрики в режимах эксплуатации фактически существующей и разработанной системы автоматизированного управления показало, что при комбинированном автоматизированном управлении достигается существенное улучшение показателей комплекса, выражающееся в уменьшении влажности осадка вакуум-фильтров в среднем на 0,25%, исключении пересушки концентрата на выходе барабанных сушилок, в среднем,

на 0,1% абс. при одновременном сокращении расхода топлива на 11,8% и увеличении содержания остаточных флотореагентов (антислеживателей) в вы-

сушенном концентрате на 5,1%, что позволяет в целом уменьшить удельные эксплуатационные затраты на фильтрацию и сушку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титков С. Н., Мамедов А. И., Соловьев Е. И. Обогащение калийных руд. — М.: Недра, 1982. — 216 с.
2. Рухля И. Е. Технологические схемы получения калия хлористого из сильвинита и их описание. Учебно-методическое пособие. — Минск: БНТУ, 2011. — 25 с.
3. Вишняк Б. А. Автоматизированное управление процессами усреднения качества руды, сгущения шламов, выщелачивания концентрата и сушки готового продукта на сильвинитовых обогатительных фабриках РУП «ПО «Беларуськалий» / Сборник трудов ГП ЗУМК. Вып. 3. — Пермь: ООО «ЗУМК-Инжиниринг», 2007. — С. 121–139.
4. Cao Qinbo Surface Chemistry Features in the Flotation of KCl // Minerals Engineering, 2010. — 23. — pp. 365–3732.
5. Вишняк Б. А., Поздеев А. А., Поляков А. Е., Морозов В. В. Повышение эффективности обогащения калийных руд с применением взаимосвязанных адаптивных систем управления / Труды международной научно-практической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». — Екатеринбург, 2013.
6. Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. — М.: ИД «Руда и Металлы», 2013. — 512 с.
7. Sirkka-Liisa Jämsä-Jounela, Greg Baiden. Springer Handbook of Automation. — Springer Berlin Heidelberg, 2007, Part F. — Pp. 1001–1013.
8. Hodouin D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants // Journal of Process Control, 2011. — 21. — pp. 211–225.
9. Шапировский М. Р., Осовский Л. М., Литвинов С. С. Математическое моделирование металлургических процессов. — М.: МИСиС, 1987. — 89 с.
10. Тетерина Н. Н., Алиферова С. Н., Апполонов В. Н., Молоштанова Н. Е. Влияние несолевых минералов на технологические свойства руды и продукты обогащения Верхнекамского месторождения солей // Обогащение руд. — 2005. — № 1. — С. 16–19. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вишняк Борис Андреевич — кандидат технических наук, руководитель научно-технического центра ООО «ЗУМК-Инжиниринг», Морозов Валерий Валентинович¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: dchmggu@mail.ru, Николаева Татьяна Сергеевна¹ — кандидат технических наук, доцент, ¹ НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 8, pp. 22–29.

UDC 622.794.:622.7.09

B.A. Vishnyak, V.V. Morozov, T.S. Nikolaeva

INTEGRATED MODEL-ORIENTED CONTROL OVER TEAM OF DRYING AND SCREENING EQUIPMENT

The processes of filtration and drying of sylvinitе concentrates have been studied as a single object of management. Linear mathematical models of vacuum filters, dryers and the whole drying and filtering complex as a whole are obtained. The constituent model of the equation relates the

moisture content of the sediment and the performance of the drum vacuum filter with the speed of rotation of the drum, the amount of vacuum applied to the drum, the ratio of the liquid and solid phases of the food suspension. The drying model relates the moisture content of the concentrate and the mass fraction of the anti-caking additive with the concentrate consumption entering the dryer, its moisture content, fuel consumption, the mass fraction of the insoluble residue in the incoming concentrate. On the basis of the statistical process models obtained, an algorithm and a system for automated control of the drying and filtering complex have been created, which ensures the optimization of the technological regime. It is shown that with combined automated control, a reduction in the moisture content of the concentrate by 0.25% is achieved with a reduction in fuel consumption by 11.8% and a decrease in the consumption of anti-caking agents.

Key words: sylvinitic ores, concentrate, filtration, drying, combined model, algorithm, control system.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-22-29

AUTHORS

Vishnyak B.A., Candidate of Technical Sciences,
Head of the Scientific and Technical Center
of LLC «ZUMK-Engineering», 614000, Perm, Russia,
Morozov V.V.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: dchmggu@mail.ru,
Nikolaeva T.S.¹, Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor,
¹ National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Titkov S. N., Mamedov A. I., Solov'ev E. I. *Obogashchenie kaliynykh rud* (Potassium ore dressing), Moscow, Nedra, 1982, 216 p.
2. Rukhlya I. E. *Tekhnologicheskoe skhemy polucheniya kaliya khloristogo iz sil'vinitai ikh opisaniye*. Uchebno-metodicheskoe posobie (Process charts of potassium chloride production from sylvinitic and their description. Textbook), Minsk, BNTU, 2011, 25 p.
3. Vishnyak B. A. *Sbornik trudov GP ZUMK*, Vyp. 3 (Western-Ural Machine Building Concern Transactions, issue 3), Perm, OOO «ZUMK-Inzhiniring», 2007, pp. 121–139.
4. Cao Qinbo Surface. Chemistry Features in the Flotation of KCl. *Minerals Engineering*, 2010. 23. pp. 365–3732.
5. Vishnyak B. A. Pozdeev A. A., Polyakov A. E., Morozov V. V. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya»* (Theory and Practice of Ore and Mine Waste Processing: International Conference Proceedings), Ekaterinburg, 2013.
6. Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* (Development and use of automated control systems for mineral dressing processes), Moscow, ID «Ruda i Metally», 2013, 512 p.
7. Sirkka-Liisa Jämsä-Jounela, Greg Baiden. *Springer Handbook of Automation*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, Part F, pp. 1001–1013.
8. Hodouin D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants. *Journal of Process Control*, 2011, 21, pp. 211–225.
9. Shapirovskiy M. R., Osovskiy L. M., Litvinov S. S. *Matematicheskoe modelirovaniye metallurgicheskikh protsessov* (Mathematical modeling of metallurgical processes), Moscow, MISiS, 1987, 89 p.
10. Teterina N. N., Aliferova S. N., Appolonov V. N., Moloshtanova N. E. *Obogashchenie rud*. 2005. no 1, pp. 16–19.

