ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(8):125-140
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 553.632+628.23+681.5 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_125

УПРАВЛЕНИЕ ПЛОТНОСТЬЮ ПИТАНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА СТАДИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИЛЬВИНИТОВОЙ РУДЫ

А.В. Затонский[1], В.Ф. Беккер[1], Ю.О. Сарамага[1]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия, e-mail: zxenon@narod.ru

Аннотация: Большие энергозатраты в процессе измельчения снижают экономическую эффективность рудоподготовки. Особенно актуальным является совершенствование систем управления процессами измельчения сильвинитовой руды при производстве калийных удобрений, объем которых – миллионы тонн ежегодно. Рациональное управление может обеспечить снижение этих затрат и повышение качества готового продукта при относительно небольших капитальных вложениях. Улучшение регулирования процессом измельчения калийной руды достигнуто благодаря использованию дополнительной информации от существующих измерительных приборов и авторской динамической модели процесса измельчения. Описан технологический процесс мокрого измельчения. Консервативная модель динамики построена на традиционных представлениях об отдельных стадиях технологического процесса как самостоятельных звеньях сложного объекта управления – соляной стержневой барабанной мельницы ООО «Еврохим – Усольский калийный комбинат» (Пермский край). На стадии измельчения сильвинитовой руды до флотационной крупности управление мельницей, во взаимодействии с высокоэффективными грохотами, позволяет значительно снизить переизмельчение, которое в конечном итоге ведет к потере полезного компонента. Предложено в инвариантном контуре системы регулирования плотности пульпы использовать информацию о возмущающем воздействии – массовом расходе рециркулирующей продукции. Имитационная модель реализована в системе Simulink среды MATLAB, с помощью которой рассчитаны оценки эффективности предложенной реконструкции системы автоматического регулирования. Оценено управление плотностью потока на выходе мельницы с использованием существующей системы измерения с пропорциональным регулятором и предложенной комбинированной системы. В ходе проведенного исследования установлено, что учет влияния возмущающего воздействия и его компенсация позволяет существенно повысить качество регулирования по сравнению с ручным или пропорциональным управлением. Следовательно, предложенная реорганизация системы автоматического регулирования может быть рекомендована к внедрению на действующем производстве. Использование предлагаемых информационных подходов для совершенствования процесса управления возможно как в других процессах рудоподготовки, так и при измельчении других природных минеральных руд.

Ключевые слова: калийная руда, обогащение, измельчение, модель, регулирование, компенсация возмущений, переходный процесс, эффективность.

© А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, Ю.О. Сарамага. 2024.

Для цитирования: *Затонский А. В., Беккер В. Ф., Сарамага Ю. О.* Управление плотностью питания стержневой барабанной мельницы на стадии измельчения сильвинитовой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 125–140. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_125.

Feed density control in rod drum mill at sylvinite ore milling stage

A.V. Zatonskiy[1], V.F. Bekker[1], Yu.O. Saramaga[1]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia, e-mail: zxenon@narod.ru

Abstract: High energy input of milling decreases economic efficiency of ore pretreatment. It is of current concern to improve control over milling of sylvinite ore in production of potassium fertilizer at an annual output of millions of tons. The efficient control can reduce the energy input of the process and increases the quality of the end product at relatively low investment. The improved control of milling ore of potassium is achieved owing to the use of additional information from existing gauges and from the authorial dynamic model of the milling process. The wet milling technology is described. The conservative dynamic model is built using the customary representation of the process flow stages as independent links of a complex object of control – a salt rod drum mill at EuroChem Usolskiy, Perm Krai. At the stage of sylvinite ore milling down to flotation size, the control of the mill in its interaction with the high-performance sieves enables a considerable decrease in over-milling which leads to the loss of a useful component. It is proposed to support the invariant loop of control of the pulp density by information on the disturbance–mass flow of recycle stock. The simulation model is implemented in MATLAB Simulink to calculate efficiency of the proposed reconstruction of the automatic control system. The flow density control at the mill outlet is assessed using the existing measurement system with the proportional regulator and using the proposed combination system. The research shows that the inclusion of the disturbance into the process control and the disturbance action compensation enables essential improvement of the control quality as compared with the manual or proportional control. Accordingly, the proposed re-organization of the automated control system can be recommended for the introduction into industry. The proposed information approaches to the control improvement are usable both in other processes of ore pretreatment and in milling other ore minerals.

Key words: ore of potassium, processing, milling, model, control, disturbance compensation, transient process, efficiency.

For citation: Zatonskiy A. V., Bekker V. F., Saramaga Yu. O. Feed density control in rod drum mill at sylvinite ore milling stage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(8):125-140. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_125.

Введение

На существующих сегодня обогатительных предприятиях химической и металлургической промышленности первым основополагающим переделом является рудоподготовка, в частности, измельчение руды до определенной крупности, необходимой для дальнейших стадий обогащения.

В производстве калийных удобрений в ООО «Еврохим – Усольский калийный комбинат» (УКК) измельчение осуществляется для выделения целевого компонента хлорида калия и отделения его

от пустой породы [1]. Каждая производственная линия включает стержневые барабанные мельницы, работающие в замкнутом цикле с виброгрохотами — классификаторами, просеивающими измельченную руду через решетчатую поверхность, отделяя крупные ее частицы от мелких. Процесс измельчения характеризуется высокой энергоемкостью и существенными эксплуатационными издержками на обслуживание и ремонт. Отделение измельчения является главным потребителем электроэнергии в масштабах всего производства. Согласно [2], на предприятиях, где применяется стратегическое управление уровня АСУТП, на измельчение в среднем расходуется около 50% энергоресурсов, в остальных случаях затраты могут превышать 70%. Причины низкой эффективности также связаны с особенностями самого процесса. Как правило, на горнодобывающих предприятиях измельчение ведут в горизонтальных мельницах барабанного типа. Хотя данный вид агрегата имеет наиболее широкое применение [3] и накоплен большой опыт их использования, на практике он оказывается малоэффективен: значительная часть энергии разрушения переходит в тепловую энергию трения мелющей и измельчаемой среды, расходуется на износ рабочих органов, бронепластин и лифтов мельницы [4]. В остатке на процесс образования новых поверхностей частиц руды может приходиться лишь 2% расходуемой энергии [5].

Учитывая уже описанные проблемы, следует также отметить устойчивую тенденцию наращивания производственных мощностей, что требует все большей энергетической, технологической и сырьевой базы. Но их рациональное использование всегда сопряжено с внедрением продвинутых систем промышленного контроля и управления, нацеленных на минимизацию затрат при том же, или большем, объеме выпускаемой продукции [6].

Возвращаясь к стадии измельчения калийной руды в УКК, необходимо подробнее описать ход технологического процесса, чтобы составить представление об особенностях данной линии, выявить возможные недостатки существующей системы управления и предложить варианты ее усовершенствования. Это является целью настоящей работы.

Методы

Технологический процесс упрощенно показан на рис. 1 (в схеме не учтены вспомогательные жидкостные потоки, подаваемые для транспортировки и предотвращения забивки рудой узлов цикла). Дробленая сильвинитовая руда крупностью менее 8 мм ($F_{р}$) конвейерами подается в пульподелители, где, смешиваясь с маточным раствором ($F_{м1}$), поступает на предварительную классификацию руды флотационной крупности. Пульпа (смесь дробленой руды и маточного раствора), содержащая подрешетные продукты ($F_{под}$), перекачивается насосами на дальнейшую стадию обесшламливания, а надрешетные ($F_{над}$) по транспортирующему желобу поступают на измельчение в мельницу. Таким же образом в мельницу поступает маточный раствор ($F_{м2}$) для создания необходимой плотности пульпы, диспергатор шламов ($F_{д}$) и циркулирующая нагрузка ($F_{рец}$) — пульпа с недоизмельченной рудой. Слив мельницы поступает в зумпф, в который также могут подаваться пески сгустителя промышленных стоков и камерные продукты флотационных машин перечистной флотации сильвина ($F_{возм}$). Далее пульпа, содержащая измельченную до определенной крупности руду, подается на стадию поверочной классификации на вибрационных грохотах по крупности 1,4 мм. Подрешетные продукты поступают на стадию обес-

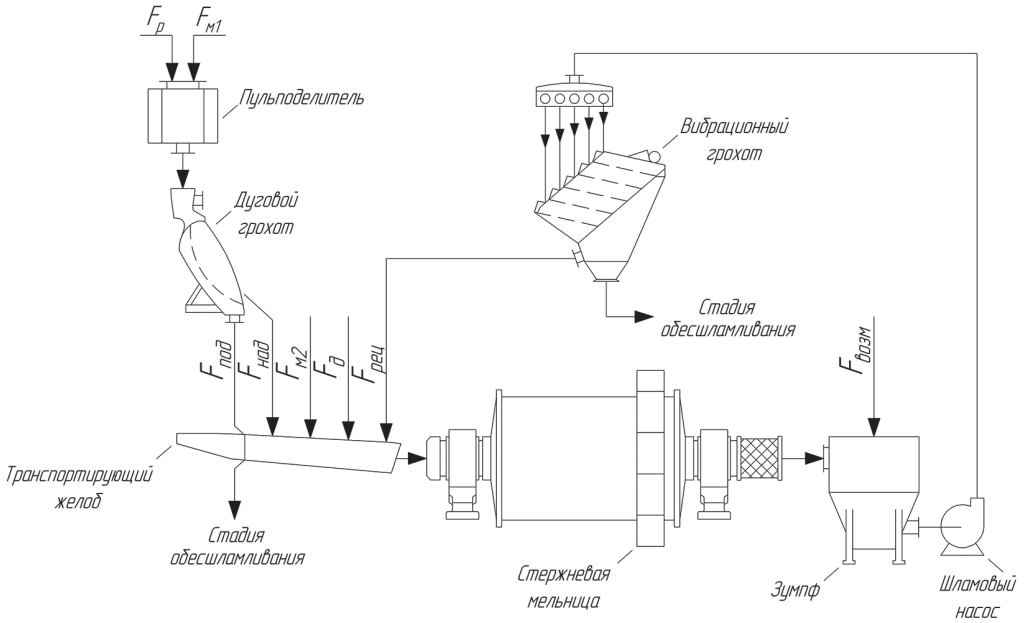

Рис. 1. Схема технологического процесса измельчения
Fig. 1. Scheme of the technological process of grinding

шламливания, а надрешетные возвращаются на доизмельчение.

При неизменной нагрузке линии измельчения по исходной руде возникает необходимость уделять внимание остальным несущим потокам: поступающая в мельницу пульпа должна иметь определенную плотность, значения которой

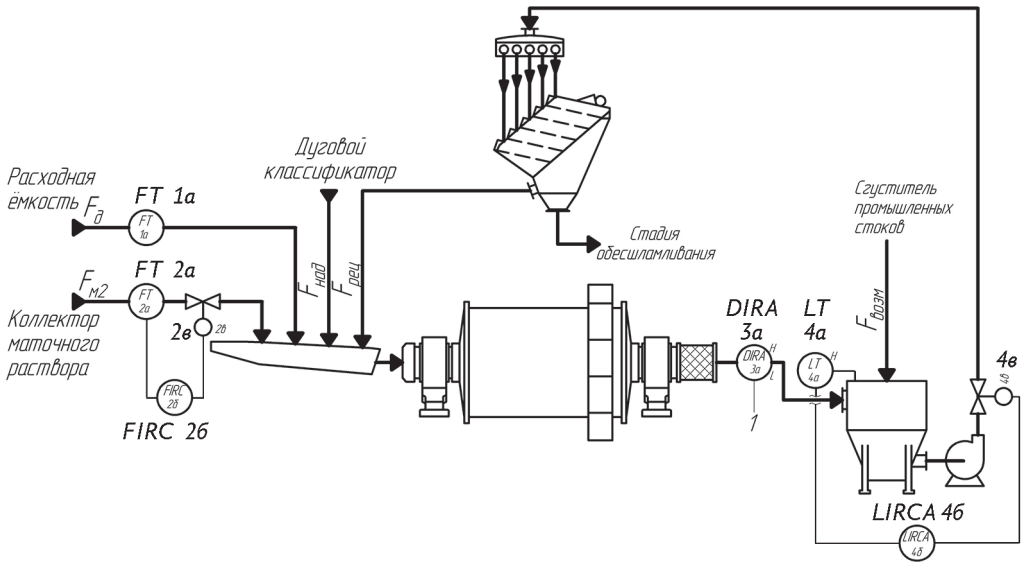

Рис. 2. Схема автоматизации технологического процесса измельчения
Fig. 2. Scheme of the grinding process control

могут допустимо колебаться в узких пределах. Основным возмущением, приводящим к отклонениям данного параметра от нормы, является циркулирующая нагрузка мельницы, характеристики потока которой носят преимущественно случайный характер. Его колебания можно связать как с работой самого цикла измельчения, так и с протеканием процессов, происходящих на других переделах ($F_{возм}$). Поэтому быстрое реагирование на изменение характеристик внутренних и внешних потоков необходимо для получения целевого продукта нужного качества и количества. В связи с этим ставится задача стабилизации плотности пульпы, поступающей в мельницу, как ключевого параметра, определяющего ход технологического процесса [7].

К текущему моменту на фабрике УКК контроль и поддержание плотности пульпы на заданных значениях осуществляется в ручном режиме оператором. Функциональная схема автоматизации существующего контура представлена на рис. 2.

Как видно из схемы, регулирование контуром проходит в условиях низкой информационной обеспеченности: плотномер (рис. 2, *3а*) сообщает лишь о текущем значении плотности на выходе мельницы и неизвестны параметры возмущающих потоков, поступающих на ее питание. С учетом длительного времени пребывания измельчаемой среды в мельнице невозможно своевременно корректировать плотность изменением расхода (рис. 2, *2а*).

Однако даже на основе уже имеющихся на производстве средств измерения и регулирования может быть создана система автоматического управления, позволяющая на возмущающее воздействие ($F_{рец}$) своевременно менять поток маточного раствора, не допуская отклонения важного технологического параметра [8]. Для этого необходимо ввести в контур, представленный на рис. 2, информацию с измерительных приборов, контролирующих объемный расход и плотность циркулирующей нагрузки. Функциональная схема с обозначенными изменениями представлена на рис. 3.

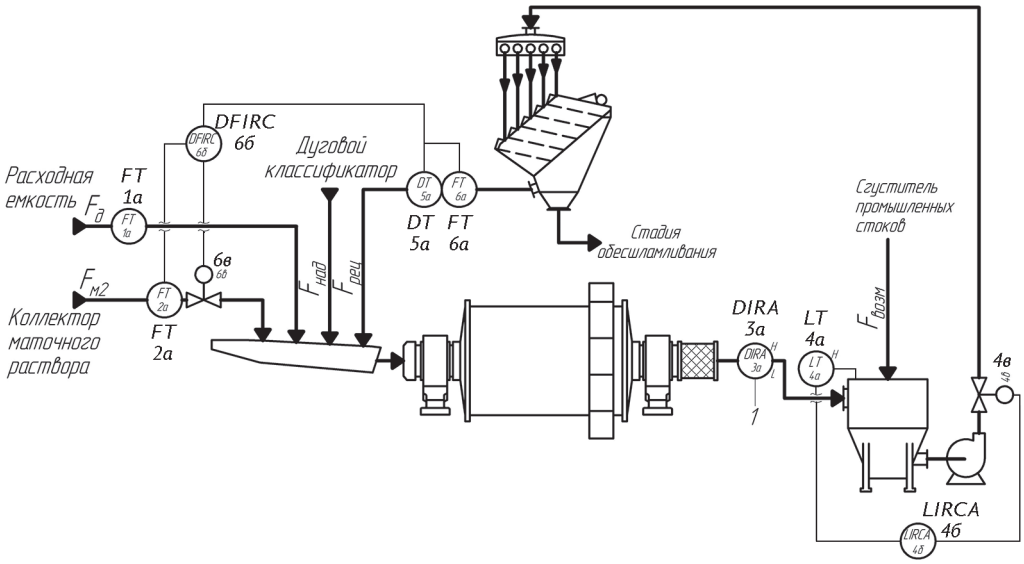

Рис. 3. Схема автоматизации технологического процесса измельчения с компенсирующим контуром
Fig. 3. Scheme of the grinding process control with a compensating circuit

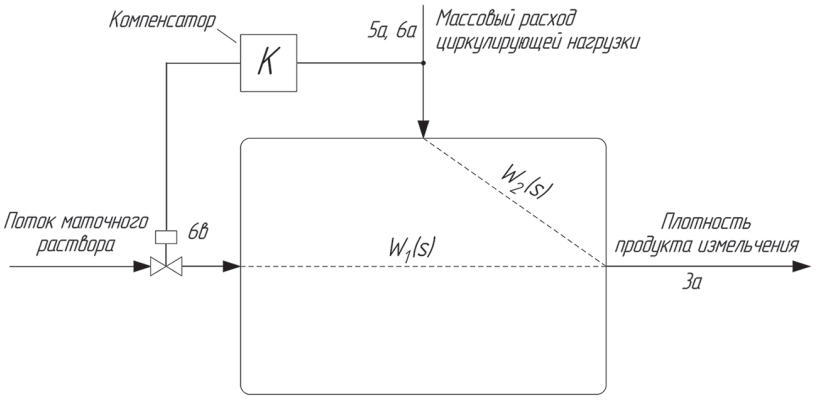

Рис. 4. Структурная схема разомкнутой комбинированной системы регулирования
Fig. 4. Block diagram of an open-loop combined control system

Структурная схема предлагаемой разомкнутой комбинированной системы регулирования по возмущению представлена на рис. 4.

Эффективность предложенного метода исследована на модели, описывающей изменения плотностных характеристик потока внутри барабана по значению плотности, фиксируемому плотномером, с учетом запаздывания реакции на выходе объекта.

В основе модели объекта могут использоваться разные подходы, описывающие движение неоднородной среды, например, в [9] получены уравнения, позволяющие проводить моделирование двухфазных потоков (учитывая дисперсные частицы в потоке жидкости). Также для описания процессов рассматриваются модели на основе уравнений диффузионной модели [10], являющейся реализацией структуры гидродинамических потоков, занимающей промежуточное положение между предельными моделями идеального перемешивания и вытеснения. Их использование позволяет учесть как интенсивное поперечное, так и обратное продольное перемешивание потока пульпы в барабане.

Перечисленные математические модели включают параметры, численные значения которых зачастую определяются на основе данных, полученных в результате пассивного, реже активного, эксперимента на изучаемом объекте [11].

Независимо от преследуемых целей исследования, методы идентификации требуют вмешательства в непрерывный налаженный производственный процесс. Это, как правило, является экономически невыгодным решением и заставляет задуматься об иных способах постановки качественного эксперимента для построения модели динамики объекта [12, 13]. Так, появление современных графических ускорителей, способных эффективно выполнять параллельные вычисления, задало стремительный темп развития различных методов компьютерного моделирования, которые не обошли стороной и сферу горнодобывающей промышленности.

Наибольшее распространение получил метод дискретных элементов (Discrete Element Method), позволивший рассчитывать и описывать фундаментальные процессы, протекающие в барабане мельницы и не поддающиеся наблюдению при классических методах исследования. Такой эффективный инструмент дает возможность инженеру изучать вклад различных параметров процесса при любых сценариях эксплуатации объекта, получая при этом всю необходи-

мую информацию о динамике и теплообмене сыпучей среды, ее контактных взаимодействиях с измельчающей насадкой и иных показателях, на основании которых можно судить об эффективности того или иного режима работы мельницы [14, 15]. Это позволяет уточнять математическое описание объектов измельчительного участка, улучшать алгоритмы их совместного управления [16], существенно повышать уровень адекватности моделей.

В рамках данной статьи рассматривается комбинированная модель [17], включающая последовательное соединение звеньев идеального вытеснения и идеального перемешивания, чтобы приближенно отразить возникающие при вращении барабана и перекатывании стержней турбулизированные течения потоков пульпы и учесть время пребывания измельчаемых частиц в барабане мельницы. С учетом имеющейся информации о материальном балансе стадии измельчения на УКК «ЕвроХим» приняты исходные данные, приведенные в табл. 1.

Модель идеального перемешивания для аппарата:

$$\frac{d\rho_К}{dt} = \frac{Q}{V}\left(\rho_0 - \rho_К\right),$$

где ρ_0 — плотность пульпы на входе мельницы, кг/м³; $\rho_К$ — плотность пульпы на выходе мельницы, кг/м³.

Передаточная функция модели идеального перемешивания:

$$W_{ип}(s) = \frac{1}{T \cdot s + 1} = \frac{1}{\frac{10}{200}s + 1} = \frac{1}{0{,}05s + 1}, \quad (1)$$

где $T = V/Q$ — постоянная времени, ч.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования
Source data for modeling

Обозначения	Численные значения	Расшифровка
V	10 м³	объем барабана, заполненного пульпой
$\tau_{ср}$	65 с	среднее время пребывания частиц в барабане
τ_1	3 с	среднее время, требуемое для перемещения пульпы от желоба до мельницы
τ_2	16 с	среднее время, требуемое для перемещения пульпы от зумпфа к вибрационному классификатору
τ_3	6 с	среднее время, требуемое для перемещения пульпы от вибрационного классификатора к желобу
$Q_р$	80 м³/ч	объемный расход надрешетного продукта предварительной классификации
$\rho_р$	1811 кг/ м³	плотность надрешетного продукта предварительной классификации
$Q_{м2}$	0–100 м³/ч	диапазон варьирования расхода маточного раствора
$\rho_{м2}$	1235 кг/ м³	плотность маточного раствора
$\rho_{зад}$	1575 кг/ м³	плотность пульпы, которую необходимо поддерживать на входе в мельницу; может колебаться в пределах 1550–1600 кг/м³
$Q_{вм}$	120–200 м³/ч	диапазон варьирования расхода пульпы, поступающей в мельницу
$Q_{рец}$	40–60 м³/ч	диапазон варьирования расхода циркулирующей нагрузки
$\rho_{рец}$	1550–1850 кг/ м³	диапазон варьирования плотности циркулирующей нагрузки

Модель идеального вытеснения: $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\omega \frac{\partial \rho}{\partial x}$,

где ω — скорость потока пульпы в барабане, м/ч; x — длина рабочей зоны барабана, м.

Передаточная функция модели идеального вытеснения:

$$W_{ив}(s) = e^{-\tau_{@}s} = e^{-65/3600s} = e^{-0,018s}. \quad (2)$$

Передаточная функция двух последовательно соединенных звеньев:

$$W_{п}(s) = W_{ип}(s) \cdot W_{ив}(s) = \frac{1}{0,05s+1} \cdot e^{-0,018s}. \quad (3)$$

В соответствии с рис. 3, на вход мельницы поступает пульпа из рецикла, маточный раствор и пульпа надрешетного продукта классификаторов (расход диспергатора шламов незначителен, поэтому им можно пренебречь).

Тогда плотность пульпы в желобе, подаваемой на питание в любой момент времени, может быть рассчитана по формуле

$$\rho_0(t) = \frac{G_{р}(t-\tau_{р}) + G_{м2}(t-\tau_{м2}) + G_{рец}(t-\tau_{рец})}{Q_{р}(t-\tau_{р}) + Q_{м2}(t-\tau_{м2}) + Q_{рец}(t-\tau_{рец})}, \quad (4)$$

где $G(t)$ — массовые расходы потоков, указанные выше; τ — время запаздывания, необходимое для прохождения расстояния до точки расчета плотности, принимаемой в конце желоба перед сливом. $\tau_{м2}$ и $\tau_{р}$ считаются от источника маточного раствора и пульпы дуговых сит, соответственно; $\tau_{рец}$ — от введенных датчиков плотности и объемного расхода (рис. 3, *5а* и *6а*). Тогда при условии неизменной нагрузки по руде получим

$$G_{@}(t) = \text{const}. \quad (5)$$

Оставшееся несоответствие во временных характеристиках может быть скомпенсировано либо корректировкой положения предложенных датчиков, либо своевременным изменением расхода маточника в желоб, что настраивается программно на контроллере. В таком случае (4) с учетом (5) примет вид

$$\rho_0(t) = \frac{G_{р}(t-\tau_{р}) + G_{м2}(t-\tau_{м2}) + G_{рец}(t-\tau_{рец})}{Q_{р}(t-\tau_{р}) + Q_{м2}(t-\tau_{м2}) + Q_{рец}(t-\tau_{рец})} = \frac{G_{р} + G_{м2}(t) + G_{рец}(t)}{Q_{р} + Q_{м2}(t) + Q_{рец}(t)}. \quad (6)$$

Примем $\rho_0(t) = \rho_{зад}$. Исходя из этого, может быть рассчитана формула для компенсатора возмущения (расчет осуществляется с помощью DFIRC (рис. 3, *6б*)):

$$\rho_{зад} = \frac{G_{р} + G_{м2}(t) + G_{рец}(t)}{Q_{р} + Q_{м2}(t) + Q_{рец}(t)} = \frac{Q_{р} \cdot \rho_{р} + Q_{м2}(t) \cdot \rho_{м2}(t) + Q_{рец}(t) \cdot \rho_{рец}}{Q_{р} + Q_{м2}(t) + Q_{рец}(t)} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow Q_{м2}(t) = \frac{Q_{р} \cdot \rho_{р} + Q_{рец}(t) \cdot \rho_{рец}(t) - Q_{р} \cdot \rho_{зад} - Q_{рец}(t) \cdot \rho_{зад}}{\rho_{зад} - \rho_{м2}} \quad (7)$$

Полученные уравнения (6), (7) положены в основу Simulink-модели исследуемой системы, чтобы результаты вычислительного эксперимента сравнить с дейст-

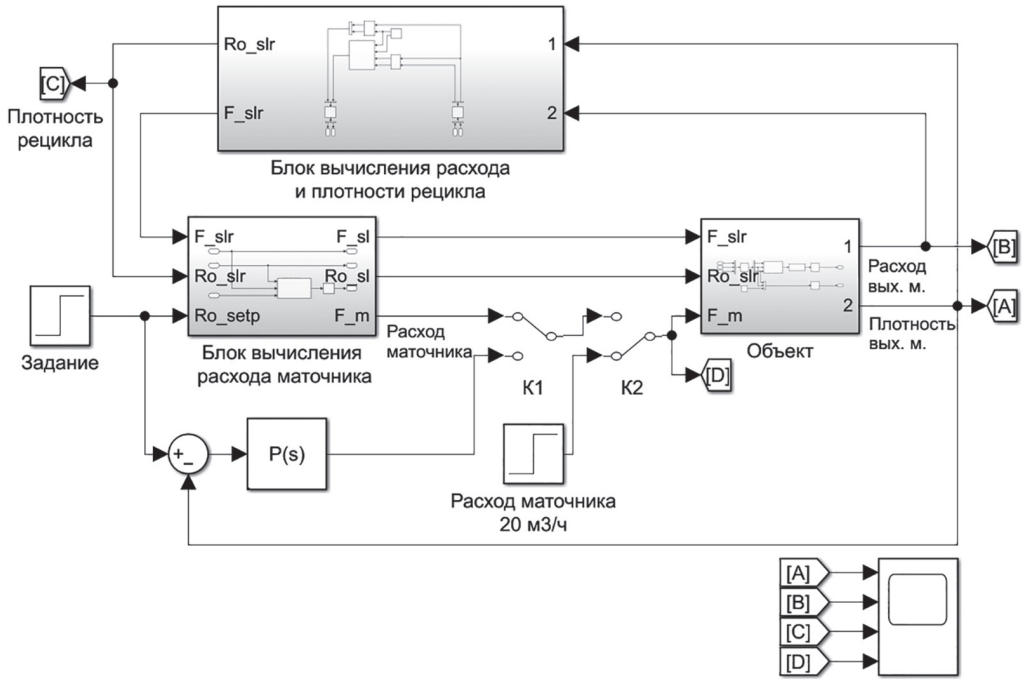

Рис. 5. Схема модели системы управления плотностью пульпы в Simulink
Fig. 5. Diagram of a model of a pulp density control system in Simulink

вующим объектом. Модель представлена на рис. 5.

Для оценки эффективности рассматриваемых стратегий управления использованы следующие критерии:

• квадратичный интеграл от ошибки регулируемой величины (Intregral square error, ISE):

$$ISE = \int_{t_1}^{t_2} \left(\rho_K(t) - \rho_{зад}\right)^2 dt \quad , \qquad (8)$$

где t_1, t_2 — время начала и конца вычислительного эксперимента;

• перерегулирование (недорегулирование) σ:

$$\sigma = \frac{\max\limits_t \left|\rho_K(t)\right| - \rho_{зад}}{\rho_{зад}} \cdot 100\%. \qquad (9)$$

Модель на рис. 5 состоит из трех основных блоков:

• блок объекта, состоящий из передаточной функции $W_п(s)$ согласно (3), функции, рассчитывающей плотность $\rho_0(t)$ на входе мельницы по (6). Выходными величинами являются расход $Q_{вм}$ и плотность $\rho_K(t)$ пульпы;

• блок вычисления расхода $Q_{рец}(t)$ и плотности рецикла $\rho_{рец}(t)$, учитывающий случайные их колебания согласно исходным данным;

• блок вычисления расхода маточника $Q_{м2}$ — компенсатор возмущения, рассчитанный по формуле (7).

Замыканием ключа K2 в нижнее положение воспроизводится переходный процесс при неизменном расходе маточника $Q_{<2}(t) = \text{const}$.

Результаты

Как видно из рис. 6, значение регулируемого параметра $\rho_K(t)$ находится намного выше $\rho_{зад}$ = 1575 кг/м³, и даже превышает граничные значения. Такой режим работы мельницы приводит к слипанию между собой стержней и пре-

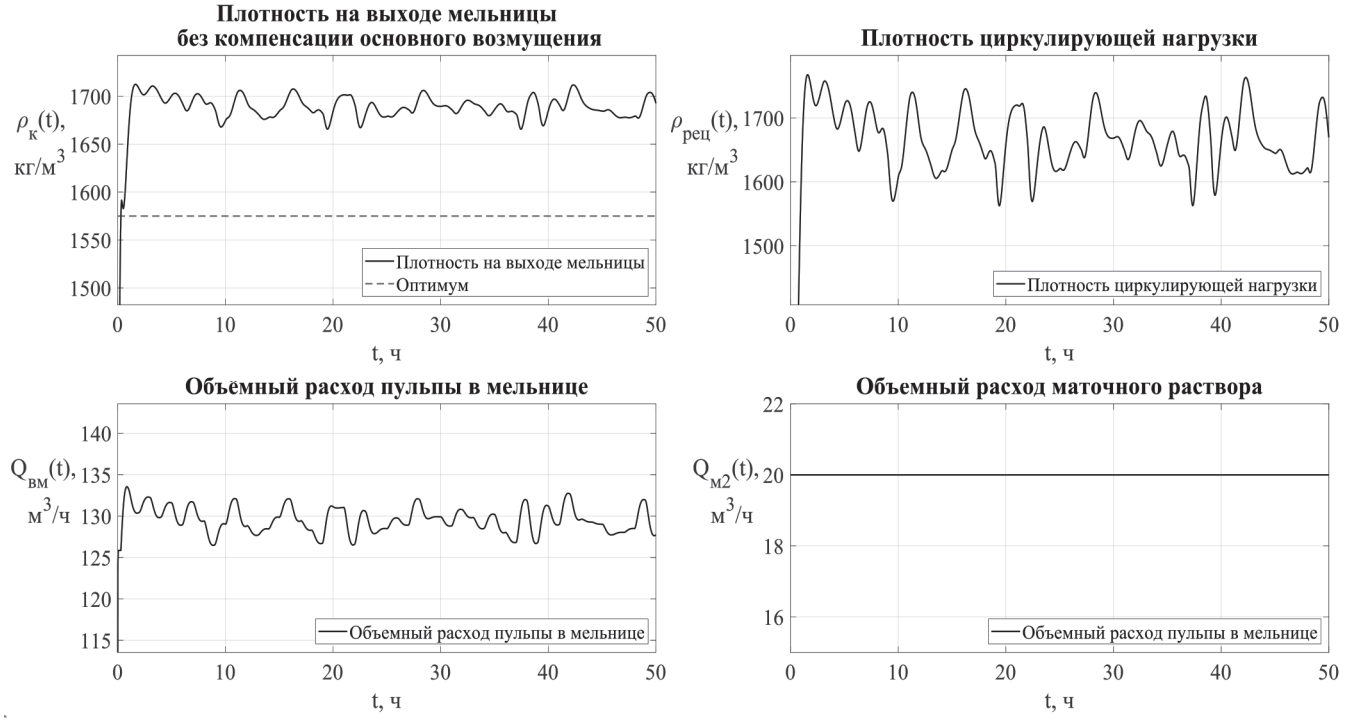

Рис. 6. Тренды основных показателей модели (без подавления возмущения)
Fig. 6. Trends of the main indicators of the model (without disturbance suppression)

кращению выгрузки пульпы из барабана [18]. Для предотвращения этого расход маточного раствора должен быть увеличен.

Остальные параметры находятся в пределах обозначенных границ.

Замыканием ключа 2 в верхнем положении и ключа 1 в нижнем (см. рис. 5) получаем регулирование (по управлению) за счет замкнутого П-регулятора с отрицательной обратной связью. Такой режим хорошо отражает действующую на производстве схему управления, когда для формирования регулирующего воздействия необходимо рассогласование выходной величины $\rho_К(t)$ с заданием $\rho_{зад}$. Коэффициент пропорциональности для регулятора подобран вручную, $K_п = -2{,}3$. Переходный процесс объекта с выбранным регулятором представлен на рис. 7.

Качество регулирования по критерию *ISE*: *ISE* = 30531.

Из первого графика, представленного на рис. 7, видно, что регулятор отрабатывает задание и значение регулируемой величины близко к значению уставки, хотя присутствует статическая ошибка (этому соответствует большое значение критерия *ISE*). Второй график показывает, что при этом величина объемного расхода маточного раствора колеблется в допустимых пределах (0…100 м³/ч), но, например на временном срезе 30…32 ч, наблюдаются нежелательные колебания величины регулирующего воздействия, вызванные наличием звена чистого запаздывания в модели объекта. Такие колебания при высоких значениях амплитуд очень негативно сказываются на эксплуатации запорно-регулирующей арматуры и исполнительных механизмов [19]. При увеличении коэффициента пропорциональности ($K_п > -2{,}3$) растет статическая ошибка регулирования, а его уменьшение приводит к еще большему числу колебаний рассмотренных параметров.

Для повышения качества управления введена интегральная составляющая регулятора. Выбраны следующие значения настроечных параметров: $K_п = -1$, $K_и = -50$ (время интегрирования $T_и = 0{,}02$ ч). Типовые графики плотности $\rho_К(t)$ и рас-

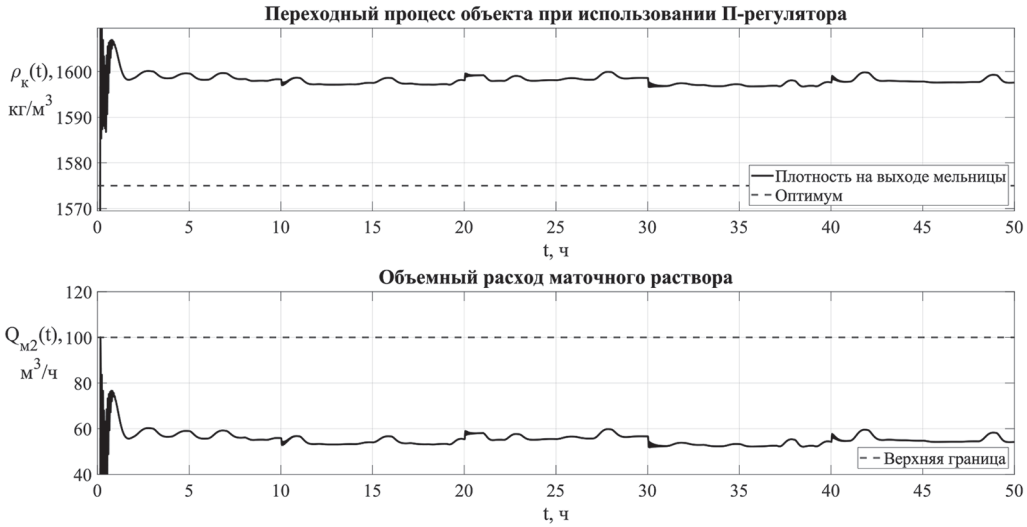

Рис. 7. Тренды стабилизируемого параметра и расхода маточного раствора с П-регулятором в контуре управления

Fig. 7. Trends of the stabilized parameter and flow rate of the mother solution with a P-controller in the control loop

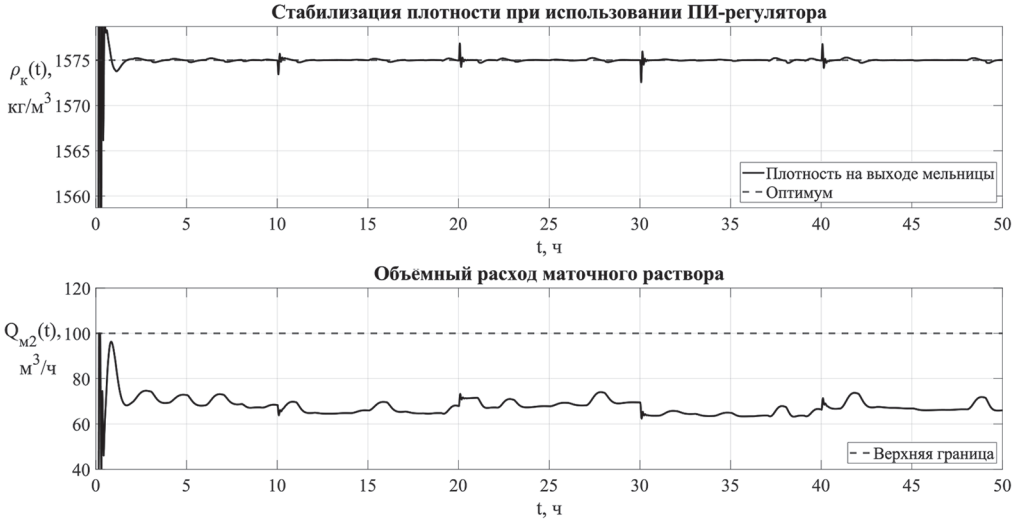

Рис. 8. Тренды стабилизируемого параметра и расхода маточного раствора с ПИ-регулятором в контуре управления

Fig. 8. Trends in the stabilized parameter and flow rate of the mother solution with a PI-regulator in the control loop

хода раствора $Q_{м2}$ изображены на рис. 8. Качество регулирования по критерию *ISE*: *ISE* = 2818.

Введение интегральной составляющей регулятора существенно повышает эффективность стратегии управления по обратной связи [20]. Возмущение подавлено, а колебания стабилизируемого параметра $\rho_К(t)$ при этом незначительны. Дальнейшие изменения соотношения коэффициентов $K_п$ и $K_и$ регулятора к улучшению динамики не приводят.

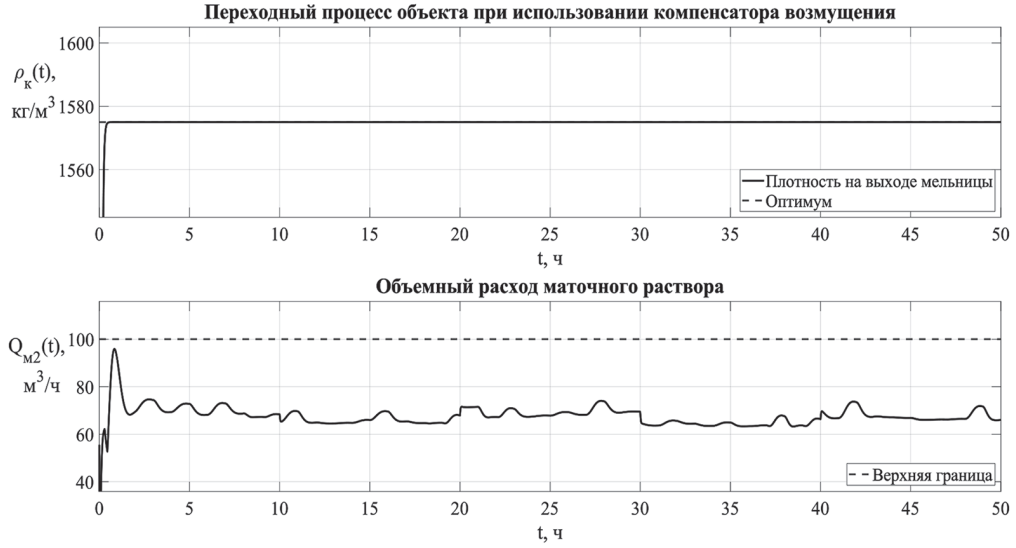

Рис. 9. Тренды стабилизируемого параметра и расхода маточного раствора с комбинированной системой регулирования

Fig. 9. Trends of the stabilized parameter and flow rate of the mother solution with the combined control system

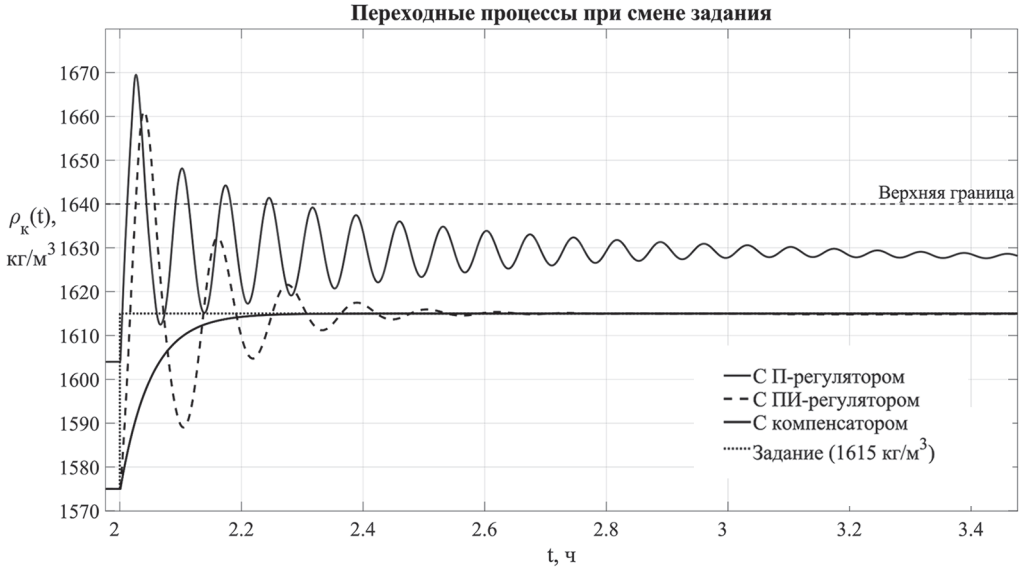

Рис. 10. Тренды переходных процессов при смене уставки
Fig. 10. Trends of transient processes when changing the controller input

Таблица 2

Показатели качества регулирования
Controlling quality indicators

Стратегия	Критерии оценки		
	Интегральный (*ISE*)	Время переходного процесса t_{transp}, ч	Степень перерегулирования σ, %
П-регулятор	**30 531**	1,3	3,28
ПИ-регулятор	2818	0,4	2,79
Компенсатор	204,7	0,13	0

При замыкании ключей 1 и 2 в верхних положениях включается контур САР по возмущению с компенсацией возмущающего потока циркулирующей нагрузки. Работа данного контура продемонстрирована на рис. 9.

Качество регулирования по критерию *ISE*: *ISE* = 204,7.

Судя по значению критерия и графику стабилизируемого параметра $\rho_K(t)$, представленному на рис. 9, компенсатор поддерживает значение параметра на необходимом уровне, полностью подавляя наложенное возмущение. Подаваемый при этом маточный раствор (регулирующее воздействие) расходуется соразмерно величине возмущения, что делает этот принцип также самым экономичным.

В заключительном моделировании более детально рассмотрена реакция системы на смену заданной плотности $\rho_{зад}$ (рис. 10). Динамика оценивается по времени переходного процесса (t_{transp}) и степени перерегулирования (σ). Полученные значения занесены в табл. 2.

Обсуждение результатов

Сравнивая оценки качества регулирования (см. табл. 1), важно отметить,

что лучший результат по всем критериям был достигнут с применением компенсатора, обеспечившего желаемое качество регулирования данного объекта. Управление с использованием классических регуляторов в обратной связи показало неудовлетворительные результаты по критерию перерегулирования (σ = 3,28%; 2,79%), превысив в обоих случаях допустимые границы. Интенсивные колебания, характерные для их продолжительных переходных процессов (t_{transp} = 0,4 ч; 1,3 ч), не позволяют обеспечить требуемое качество протекания процесса измельчения.

Следовательно, предложенный метод, основанный на получении текущих значений параметров циркулирующей нагрузки и использовании этой информации для улучшения качества регулирования, может быть рекомендован для внедрения в существующую систему управления процессом измельчения на Усольском калийном комбинате компании «ЕвроХим».

Заключение

Рассмотрен способ, позволяющий улучшить существующую систему управления процессом измельчения на Усольском калийном комбинате компании «ЕвроХим». Имитационная модель в среде Simulink показала значительные преимущества предложенной системы регулирования с компенсацией возмущения перед той, что применяется сегодня на производстве.

Более совершенный метод регулирования повышает качество выпускаемой предприятием продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горлова О. Е.*, *Орехова Н. Н.*, *Колодежная Е. В.*, *Колкова М. С.*, *Глаголева И. В.* Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2023. — Т. 21. — № 3. — С. 15—26.

2. *Жуковский Ю. Л.*, *Малькова Я. М.* Классификация способов повышения эффективности процесса измельчения и реализация энергоэффективных алгоритмов управления двухдвигательным электроприводом мельницы // Горное оборудование и электромеханика. — 2022. — № 4 (162). — С. 20—35. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35.

3. *Богданов В. С.*, *Анциферов С. И.*, *Богданов Д. В.*, *Сычев Е. А.* Состояние и направления развития техники и технологии измельчения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2022. — № 7. — С. 110—116. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116.

4. *Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S.* Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics — an overview // Energies. 2020, vol. 13, no. 24, article 6735. DOI: 10.3390/en13246735.

5. *Bouchard J., Desbiens A., Poulin É.* Reducing the energy footprint of grinding circuits: the process control paradigm // IFAC-PapersOnLine. 2017, vol. 50, no. 1, pp. 1163—1168. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.402.

6. *Wei D.*, *Craig I. K.* Grinding mill circuits — A survey of control and economic concerns // IFAC Proceedings. 2008, vol. 41, no. 2, pp. 1000—1005. DOI: 10.3182/20080706-5-kr-1001.00171.

7. *Bazin C., Obiang P.* Should the slurry density in a grinding mill be adjusted as a function of grinding media size? // Minerals Engineering. 2007, vol. 20, no. 8, pp. 810—815. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.01.017.

8. *Albertos P., Garcia P., Gao Z., Liu T.* Disturbance rejection in process control / Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2014, pp. 4134—4145. DOI: 10.1109/WCICA.2014.7053408.

9. *Вараксин А. Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // Теплофизика высоких температур. — 2020. — Т. 58. — № 4. — С. 646—669. DOI: 10.31857/S004036442004016X.

10. *Осипова Н. В.*, *Певзнер Л. Д.* Особенности регулирования измельчительного комплекса при направленном управлении прочностными свойствами рудного материала // Научный вестник Московского государственного горного университета. — 2012. — № 10. — С. 69—74.

11. *Hennart S. L.* A., *Wildeboer W. J.*, *van Hee P.*, *Meesters G. M. H.* Identification of the grinding mechanisms and their origin in a stirred ball mill using population balances // Chemical Engineering Science. 2009, vol. 64, no. 19, pp. 4123—4130. DOI: 10.1016/j.ces.2009.06.031.

12. *Затонский А. В.* Моделирование технологического участка обогатительной фабрики в пакете Matlab // Обогащение руд. — 2014. — № 4. — С. 49—54.

13. *Ерыпалова М. Н.* Влияние нестационарности объекта управления на параметры установившихся автоколебаний // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2008. — № 4. — С. 50—57.

14. *Cleary P. W.*, *Morrison R. D.* Prediction of 3D slurry flow within the grinding chamber and discharge from a pilot scale SAG mill // Minerals Engineering. 2012, no. 39, pp. 184—195. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.05.019.

15. *Кузяков А. В.*, *Жидовецкий В. Д.*, *Кульчицкий А. А.*, *Русинов Л. А.* Функциональные структуры систем управления различными технологическими комплексами цветной металлургии (примеры реализации) // Цветные металлы. — 2023. — № 4. — С. 38—44.

16. *Затонский А. В.*, *Уфимцева В. Н.* Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2018. — № 4. — С. 56—62. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-56-62.

17. *Кафаров В. В.*, *Дорохов И. Н.*, *Арутюнов С. Ю.* Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение. — М.: Юрайт, 2021. — 440 с.

18. *Matsanga N., Nheta W., Chimwani N.* A review of the grinding media in ball mills for mineral processing // Minerals. 2023, vol. 13, no. 11, article 1373. DOI: 10.3390/MIN13111373.

19. *Бильфельд Н. В.* Идентификация нестационарных объектов управления средствами пассивного эксперимента // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — № 3. — С. 85—90.

20. *Беккер В. Ф.* Управление технологическими процессами как подсистема управления качеством продукции // Проблемы теории и практики управления. — 2010. — № 10. — С. 78—84. ИАБ

REFERENCES

1. Gorlova O. E., Orehova N. N., Kolodezhnaja E. V., Kolkova M. S., Glagoleva I. V. Justification of the integrative criterion for predicting the possibility of selective disintegration of technogenic complex-structured raw materials. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 15—26. [In Russ].

2. Zhukovskiy Y. L., Malkova Y. M. Classification of ways to improve the efficiency of the comminution and implementation of energy-efficient algorithms for controlling the twin-motor electric mill drive. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022, no. 4 (162), pp. 20—35. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-4-20-35.

3. Bogdanov V. S., Antsiferov S. I., Bogdanov D. V., Sychev E. A. State and directions of development of grinding technic and technology. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022, no. 7, pp. 110—116. [In Russ]. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-7-110-116.

4. Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S. Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics — an overview. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 24, article 6735. DOI: 10.3390/en13246735.

5. Bouchard J., Desbiens A., Poulin É. Reducing the energy footprint of grinding circuits: the process control paradigm. *IFAC-PapersOnLine*. 2017, vol. 50, no. 1, pp. 1163—1168. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.402.

6. Wei D., Craig I. K. Grinding mill circuits — A survey of control and economic concerns. *IFAC Proceedings*. 2008, vol. 41, no. 2, pp. 1000—1005. DOI: 10.3182/20080706-5-kr-1001.00171.

7. Bazin C., Obiang P. Should the slurry density in a grinding mill be adjusted as a function of grinding media size? *Minerals Engineering*. 2007, vol. 20, no. 8, pp. 810—815. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.01.017.

8. Albertos P., Garcia P., Gao Z., Liu T. Disturbance rejection in process control. *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2014, pp. 4134—4145. DOI: 10.1109/WCICA.2014.7053408.

9. Varaksin A. Y. Two-phase flows with solid particles, droplets and bubbles: problems and research results (review). *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2020, vol. 58, no. 4, pp. 646—669. [In Russ]. DOI: 10.31857/S004036442004016X.

10. Osipova N. V., Pevzner L. D. Features of the grinding complex control by directed control of strength properties of ore material. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2012, no. 10, pp. 69—74. [In Russ].

11. Hennart S. L. A., Wildeboer W. J., van Hee P., Meesters G. M. H. Identification of the grinding mechanisms and their origin in a stirred ball mill using population balances. *Chemical Engineering Science*. 2009, vol. 64, no. 19, pp. 4123—4130. DOI: 10.1016/j.ces.2009.06.031.

12. Zatonsky A. V. Modeling of the process section of the concentrator in Matlab package. *Obogashchenie Rud*. 2014, no. 4, pp. 49—54. [In Russ].

13. Erypalova M. N. Influence of non-stationarity of the control object on the parameters of the steady-state auto oscillations. *University proceedings Volga region. Engineering sciences*. 2008, no. 4, pp. 50—57. [In Russ].

14. Cleary P. W., Morrison R. D. Prediction of 3D slurry flow within the grinding chamber and discharge from a pilot scale SAG mill. *Minerals Engineering*. 2012, no. 39, pp. 184—195. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.05.019.

15. Kuzyakov A. V., Zhidoveckiy V. D., Kul'chickiy A. A., Rusinov L. A. Functional structures of control systems for various technological complexes of non-ferrous metallurgy (implemen-tation examples). *Tsvetnye Metally*. 2023, no. 4, pp. 38—44. [In Russ].

16. Zatonsky A. V., Ufimtseva V. N. Development of object means of simulation and multi-agent modeling of production processes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2018, no. 4, pp. 56—62. [In Russ]. DOI: 10.24143/2072-9502-2018-4-56-62.

17. Kafarov V. V., Dorokhov I. N., Arutyunov S. Yu. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii: izmel'chenie i smeshenie* [System analysis of chemical technology processes grinding and mixing], Moscow, Yurayt, 2021, 440 p.

18. Matsanga N., Nheta W., Chimwani N. A review of the grinding media in ball mills for mineral processing. *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 11, article 1373. DOI: 10.3390/MIN13111373.

19. Bil'fel'd N. V. Identification of non-stationary control objects by passive experiment. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2013, no. 3, pp. 85—90. [In Russ].

20. Bekker V. F. Technological process control as a subsystem of product quality management. *Problemy teorii i praktiki upravleniya*. 2010, no. 10, pp. 78—84. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Затонский Андрей Владимирович[1] — д-р. техн. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: zxenon@narod.ru,
Беккер Вячеслав Филиппович[1] — канд. техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: bekker@bf.pstu.ru,
Сарамага Юрий Олегович[1] — студент, e-mail: ysaramaga@mail.ru,
[1] Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Березниковский филиал.
Для контактов: Затонский А.В., e-mail: zxenon@narod.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Zatonskiy[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: zxenon@narod.ru,
V.F. Bekker[1], Cand. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: bekker@bf.pstu.ru,
Yu.O. Saramaga[1], Student, e-mail: ysaramaga@mail.ru,
[1] Perm National Research Polytechnic University,
Berezniki Branch, Berezniki, Russia.
Corresponding author: A.V. Zatonskiy, e-mail: zxenon@narod.ru.

Получена редакцией 14.03.2024; получена после рецензии 15.04.2024; принята к печати 10.07.2024.
Received by the editors 14.03.2024; received after the review 15.04.2024; accepted for printing 10.07.2024.