

УДК 681.51.011

**Л.С. Казаринов, Дж.Р. Хасанов**

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

## **ОПТИМИЗАЦИИ СТЕПЕНИ ЗАГРУЗКИ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА**

В статье предлагается метод выбора решений для оптимизации степени загрузки мельницы материалом при производстве цемента с целью повышения его эффективности. Необходимость применения данного метода вызвана тем, что качество помола и потребление ресурсов зависят от многих факторов, которые представляют большие трудности их измерения и прогнозирования. Достоверное измерение влияющих факторов, существенных для определения оптимального сочетания объема шаровой нагрузки помола и количества твердых веществ, необходимо для уменьшения размера частиц шихты при минимальном удельном расходе энергии. В этой работе описывается приложение для оперативного управления цементной мельницей с замкнутым контуром обратной связи на основе использования технологии модельно-упреждающего прогнозирования. Контроллер, построенный на основе данного метода, должен работать в реальном времени и отражать текущее состояние процесса помола. При этом выбор решений задачи оперативного управления относится к классу многокритериальных задач. В работе предложен метод принятия решений, исходя из множества допустимых технических условий, накладываемых на процесс помола. Подобная постановка задачи в общем случае является противоречивой. В работе предложен подход к решению данной задачи на основе определения максимального числа совместных взвешенных технических условий, налагаемых на процесс помола. Подобный подход позволяет организовать интерактивную процедуру выбора допустимого решения при оперативном управлении процессом помола. Оптимизация управления для шаровых мельниц позволяет нам увеличить производительность мельницы на 3–5 % и снизить удельную потребляемую мощность на 2–4 %.

**Ключевые слова:** цемент, оптимизация, клинкер, гипс, шихта, процесс помола, оперативное управление, выбор решений в противоречивой постановке.

**L.S. Kazarinov, J.R. Khasanov**

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

## **OPTIMIZATION OF THE MILLLOAD DEGREE IN CEMENTPRODUCTION**

A method of the mill load degree optimization in cement production to increase its efficiency is considered. This problem has many obstacles to solve because the quality of grinding and the consumption of resources depend on many factors that present great difficulties in their measurement and forecasting. Reliable measurement of the influencing factors necessary to determine the optimal combination of the volume of the ball load of grinding and the amount of solids necessary to reduce the particle size of the charge with a minimum specific energy consumption. This paper describes an application for

the operational management of a closed-loop cement mill that uses prediction technology. A controller based on this method, should work in real time and reflect the current state of the grinding process. Decision making for this operational management belongs to the class of multi-criteria tasks. The paper proposes a decision-making method based on the set of permissible technical conditions imposed on the grinding process. Such a formulation of the problem is generally contradictory. The paper proposes an approach to solving this problem based on determining the maximum number of joint weighted technical conditions imposed on the process. This approach allows to organize an interactive procedure for selecting a feasible solution for the operational management of the grinding process. The control optimization for the ball mills allows to increase mill productivity up 3-5 % and reduce specific power consumption to 2-4 %.

**Keywords:** cement, optimization, clinker, gypsum, charge, grinding process, operational management, choice of solutions in a controversial setting.

**Введение.** Цементная промышленность является ведущей отраслью в производстве строительных материалов. Технологический процесс производства цемента отличается высокой степенью сложности и включает в себя следующие основные операции [1]:

- добыча сырья;
- приготовление сырьевой смеси;
- обжиг;
- помол цементного клинкера.

Следует отметить, что именно от организации процесса помола во многом зависит качество продукции, поэтому системы управления процессом помола должны поддерживать основной технологический параметр процесса – тонкость помола и обеспечивать максимальную производительность.

Управление контуром помола является сложной задачей из-за множества факторов, например, нелинейного и неопределенного характера процесса. Существующие математические модели этого процесса полны неточностей, представляют множество взаимодействующих переменных со значительно отличающейся динамикой, которые подвержены неизмеряемым помехам, длительным периодам задержек, а также характеризуются тяжелыми условиями работы и невозможностью использования точных и надежных датчиков [2–6].

Многие свойства цемента зависят не только от химического и фазового состава клинкера, но и от тонкости помола. Тонкость помола цемента характеризуется по остатку на сите № 008 и составляет 8–12 % для большинства цементов. С повышением тонкости помола затраты электроэнергии возрастают в большей мере, чем степень измельчения. Так, увеличение тонкости помола на каждый 1 % уменьшения остатка на сите № 008 повышает расход электроэнергии на 4–6 % и снижает производительность мельницы на 3–5 % [7–11].

Отсюда следует задача определения оптимальной степени загрузки мельницы материалом на основе рационального выбора параметров загрузки мельницы.

Основные требования, предъявляемые к автоматическому регулированию процессов помола цемента, заключаются в обеспечении стабильного качества цемента и максимальной производительности, возможных при данном составе клинкера и добавок.

До настоящего времени автоматический контроль тонкости помола цемента в промышленность еще не внедрен. Однако ведение процесса помола только по показателям выходного параметра не позволило бы стабилизировать тонкость помола, поскольку время прохождения материала через помольный агрегат довольно значительно [12–18].

Тонкость помола периодически проверяют по данным лабораторного анализа, и при необходимости соответственно машинист корректирует задания для регулятора.

Примеры данных лабораторного анализа приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Данные анализа лаборатории по % гипсов в цементе

Зо-на	Значение		8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	ср
	3,3	3,45												
3+	3,3	3,45												
2+	3,0	3,29												
1-	2,5	2,99	2,73		2,64		2,84		2,79		2,83		2,72	2,76
2-	2,2	2,49												
3-	1,95	2,19												
Ввод значения			2,73		2,64		2,84		2,79		2,83		2,72	2,76

Таблица 2

Данные анализа лаборатории по % шлака в цементе

Зо-на	Значение		8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	ср
	19,9	20												
3+	19,9	20												
2+	19,5	19,8											19,8	19,8
1-	18	19,4	19,3		19,3		19,3				19,3			19,3
2-	17,6	17,9							17,9					17,9
3-	17,4	17,5												
Ввод значения			19,3		19,3		19,3		17,9		19,3		19,8	19,2

Добавки дозируют с помощью объемных или весовых дозаторов, работающих синхронно с дозаторами клинкера, в связи с чем количество вводимых добавок зависит от количества подаваемого в мельницу клинкера. Весовое соотношение клинкера и добавок устанавливает

(задает) заводская лаборатория. При этом учитывают вид и марку цемента, которые должны быть получены на данной мельнице [19, 20]. Для стабильной подачи материала в мельнице необходимо оптимизировать этот процесс.

Однако при производстве цемента невозможно измерить все параметры помола, поэтому является перспективным применение современных интеллектуальных технологий на основе нейронных сетей. Применение нейронных сетей вызывает определенную сложность, так как требуется статистика за длительный период. Поскольку параметры исходных материалов могут достаточно быстро изменяться, то актуальной задачей здесь является оперативная настройка сети.

**1. Контроль процесса измельчения. Управление шаровой мельницы. Оптимизация управления.** Для работы шаровых мельниц обычно используется постоянное управление с обратной связью для повышения производительности и качества отверждения. Существуют два типа систем управления, обычно используемых для работы шаровой мельницы. Один использует уровень звука мельницы, а другой использует мощность ковшового элеватора в качестве контролируемой переменной, в то время как управляемая переменная является скоростью подачи мельницы для обеих систем.

Эти системы управления основаны на том принципе, что эффективность измельчения шаровых мельниц является самой высокой при определенном значении мощности ковшового элеватора или уровня звука мельницы, как показано на рис. 1.

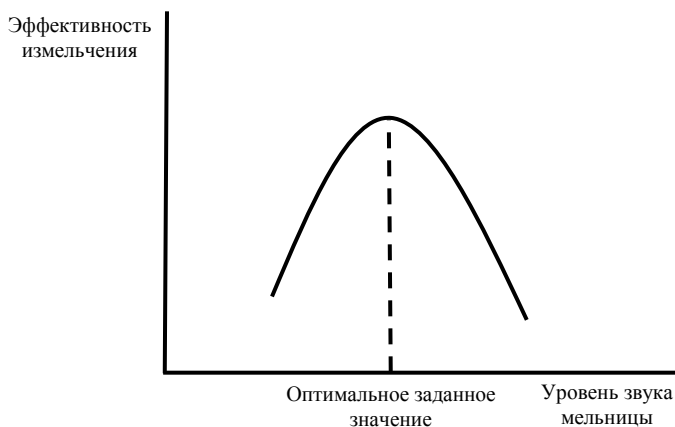


Рис. 1. Эффективность помола шаровых мельниц

Поэтому, если заданное значение отклоняется от оптимального, настройка, максимальная эффективность не гарантируются. Фактически в процессе измельчения, как правило, существует множество факторов, которые создают помехи для процесса, такие как колебания размалываемости, распределение частиц и влажность шихты, истирание мелющих тел и так далее. Эти нарушения приводят к смещению оптимальной установки. Вот почему желателен оптимизирующий процесс управления, который реализует оптимальную настройку с помощью некоторых средств.

Метод оптимизирующего управления условно делится на два типа. Одним из них является модельный метод, который заключается в получении оптимального состояния путем использования математической модели управляемой системы. Другой – прямой метод, который заключается в поиске и поддержании оптимального состояния без точных знаний об управляемой системе. С теоретической точки зрения мы можем получить лучшие результаты по модельному методу, чем по прямой. На самом деле очень трудно построить достаточно точную математическую модель для реального процесса. С другой стороны, хотя прямой метод кажется более примитивным, он более практичен и в большинстве случаев дает лучшие результаты. По этой причине наш оптимизирующий контроль использует прямой метод.

В работе предлагается метод принятия решений по выбору значений управляющих факторов с учетом заданных технико-экономических ограничений, который позволяет оператору выбрать оптимальные параметры для загрузки мельницы, чтобы получить качественный продукт при минимизации потребляемых ресурсов.

**2. Решение задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы.** Особенность задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы состоит в том, что число управляющих факторов невелико, а количество ограничений значительно превышает число управляющих факторов. Действительно, в качестве управляющих факторов мы будем рассматривать величину загрузки мельницы:  $x_1$  – клинкер,  $x_2$  – гипс и  $x_3$  – добавки. Выходными параметрами является множество показателей  $\{y_i\}$  согласно табл. 3.

Ограничения на показатели:

$$a_i \leq y_i \leq b_i. \quad (1)$$

На основе построения эмпирических зависимостей с использованием метода наименьших квадратов и нейронных сетей можно получить:

$$y_i = h_i(x_1, x_2, x_3). \quad (2)$$

С учетом (1) и (2) получаем:

$$a_i \leq h_i(x_1, x_2, x_3) \leq b_i, i = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

В итоге рациональный выбор параметров загрузки мельницы состоит в формальном решении системы неравенств (3).

Для решения система неравенств приводится к канонической форме:

$$h_i(x_1, x_2, x_3) - b_i \leq 0, \quad (4a)$$

$$a_i - h_i(x_1, x_2, x_3) \leq 0. \quad (4b)$$

Формально неравенство (4) можно записать в следующем виде:

$$f_i(x_1, x_2, x_3) \leq 0. \quad (5)$$

В общем случае система неравенств (5) является несовместной, поэтому решение задачи рационального выбора параметров загрузки мельницы математически сводится к решению системы несовместных неравенств:

$$f_i(x) \leq 0, \quad i \in I_{\text{нер}}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{нер}}$  – множество значений индексов неравенств соответственно;  $x$  – вектор искомых параметров;  $f_i(x)$  – монотонные, непрерывные и дифференцируемые функции.

Необходимо определить максимально совместную подсистему уравнений и неравенств (6) по критерию:

$$\max C(x), \quad C(x) = \Phi(\mu(x)), \quad (7)$$

где  $\mu$  – вектор, составленный из характеристических функций  $\mu_i$  неравенств ( $\mu_i = 1$ , если  $i$ -е неравенство выполняется, в противном случае  $\mu_i = 0$ );  $\Phi(\mu)$  – монотонная положительно определенная числовая функция булевых переменных  $\mu$ .

В частном случае критерий (7) имеет вид:

$$C(x) = \sum_{j=1}^m \alpha_j \mu_j(x), \quad (8)$$

где  $\alpha_j$  – весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям:

$$\forall_j \alpha_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^m \alpha_j = 1,$$

Решение системы неравенств (6) по критерию (8) позволяет выделить среди всех максимально совместных подсистем системы (6) такую подсистему, которая обладает максимальным суммарным весом. Другими словами, в данном случае выделяется максимально совместная подсистема, наиболее важная с точки зрения решаемой предметной задачи. При равенстве весов решение задачи (6), (8) выделяет максимально совместную подсистему с максимальным числом неравенств. В общем случае, когда рассматриваются задачи (6), (7), соответствующее решение позволяет выделить максимально совместную структуру неравенств, оптимальную по обобщенному критерию (6).

Содержательная интерпретация рассмотренного выше алгоритма поиска оптимальных решений в противоречивых условиях состоит в следующем.

На начальном этапе лицо, принимающее решения (ЛПР), формулирует набор условий, которым должно удовлетворять искомое решение. Понимая, что не все желательные условия могут быть выполнены, ЛПР формулирует предпочтения, определяющие желательность выполнения отдельных условий, а также общую целевую функцию, которая количественно выражает степень выполнения поставленных условий в целом.

С математической точки зрения целевая функция представляет собой отображение:

$$\mu \xrightarrow{\phi_1} C, \mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T,$$

где

$$\mu_j = \begin{cases} 1, & \text{если } \gamma_j \in D_j; \\ 0, & \text{если } \gamma_j \notin D_j; \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где каждое  $j$ -е условие описывается вектором своих параметров  $\gamma_j$ . Само условие представляется в виде области допустимых значений параметров  $D_j$ . Характеристическая функция условия  $\mu_j$  определяет факт принадлежности вектора параметров  $\gamma_j$  соответствующей области допустимых значений  $D_j$ .

Далее, основываясь на методе ветвей и границ, осуществляется глобальный поиск оптимального решения поставленной задачи. Однако полученное решение в общем случае может не оправдывать ожидания ЛПР. Часть поставленных условий при этом не будет выполнена,

и реальное значение целевой функции  $C^p(\ell_n)$  будет меньше ожидаемого  $C_{\max}^{\text{ож}}$ . Поэтому полученное решение  $x_1^{\text{opt}}$  будет являться частным.

Дальнейшее развитие процесса решения задачи может осуществляться на основе двух подходов.

Первый подход основывается на переводе недостигнутых ограничений в разряд частных целевых функций. В результате может быть поставлена задача оптимизации, в которой ограничениями выступают выполненные ограничения, а в качестве целевой функции используется обобщенная целевая функция, составленная из частных целевых функций недостигнутых ограничений. В результате решения подобной задачи оптимизации будут определены величины ограничений, необходимые для непротиворечивой постановки задачи выбора решений.

Необходимо отметить, что в общем случае каждое ограничение отражает определенный аспект рассмотрения реального объекта оптимизации, за которым стоят специальные теории и технические решения. Поэтому постановка задачи снятия частных ограничений приводит к соответствующим задачам специальных научно-практических исследований.

Второй подход основывается на следующем.

После получения частного решения ЛПР стремится достичь невыполненные ограничения в том виде, в каком они были поставлены, и сосредоточит на этой цели свое внимание. В результате изменится структура предпочтений ЛПР, соответственно изменится и целевая функция задачи:

$$\mu \xrightarrow{\phi_2} C.$$

Решение поставленной задачи с измененной структурой целевой функции позволит получить следующее оптимальное решение  $x_2^{\text{opt}}$ , для которого уже будут выполняться ранее не выполнившиеся условия. Однако и это решение в общем случае также будет частным, так как не все условия поставленной задачи будут выполняться.

Процесс изменения структуры целевой функции и повторные решения задачи могут итеративно повторяться до тех пор, пока на совокупности полученных частных решений  $\{x_1^{\text{opt}}, x_2^{\text{opt}}, \dots\}$  не будут выполнены все поставленные условия. Дальнейшее движение вперед основывается на неформальном содержательном изучении данной совокупности частных решений с целью исследования возможности их



логического объединения в целостную систему. В общем случае полученные частные решения противоречат друг другу, характеризуются несовместимыми свойствами. Поэтому объединить их можно лишь на абстрактном уровне путем отвлечения от несовместимых свойств и выдвижения на этой основе общей объединяющей идеи. Последующая разработка выдвинутой идеи должна опираться на всю совокупность знаний в рассматриваемой предметной области и представлять собой сложную интеллектуальную операцию синтеза конкретного решения. В результате подобной интерактивной процедуры можно прийти к синтетическому решению, логически объединяющему свойства, которые вначале были несовместимыми.

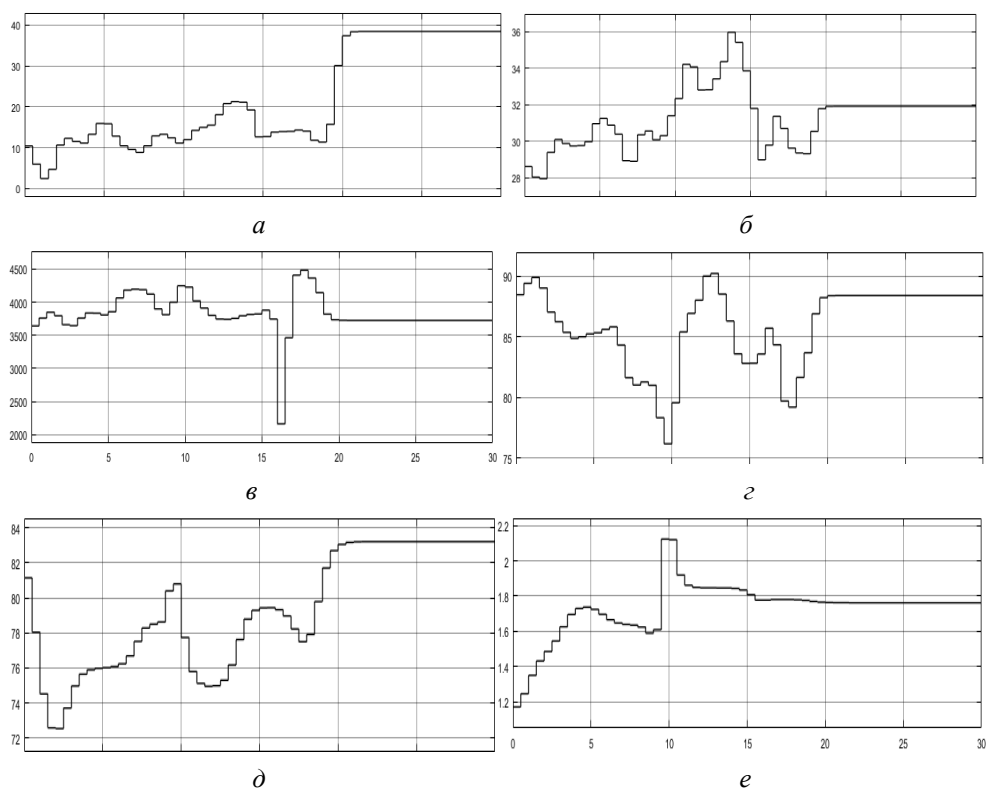


Рис. 2. Параметры процесса помола: изменение крупки на повторном помоле (а), удельный расход электроэнергии кВт·ч/т (б), тонкость помола по Блейну см<sup>2</sup>/г (в), звук мельницы, дБ(г), мощность двигателя мельницы кВт (%) (д), и циркулирующая нагрузка (е)

В табл. 3 представлена экранная форма оператора помола клинкера, на основании которой выбирается степень загрузки мельницы.

Таблица 3

Пример экранной формы оператора помола клинкера

Подача, т/час	Отклонено (крупка), т час		Удельный расход элек-энергии кВт·ч/т		Блейн, см <sup>2</sup> /т		Звук мельницы, дБ		Мощность двигателя мельницы, %		Циркулирующая нагрузка		С
	$\alpha_1 = 0,17$		$\alpha_2 = 0,18$		$\alpha_3 = 0,15$		$\alpha_4 = 0,20$		$\alpha_5 = 0,19$		$\alpha_6 = 0,11$		
	$\mu_1$		$\mu_2$		$\mu_3$		$\mu_4$		$\mu_5$		$\mu_6$		
	[8,5; 13,5]		[28; 32]		[3600; 4000]		[80; 86]		[73; 80]		[1,42; 1,69]		
25,5	10,4	1	28,6	1	3643	1	88,5	0	81,1	0	1,17	0	0,5
26	10,6	1	30,1	1	3660	1	87,0	0	72,5	0	1,49	1	0,6
25,5	12,3	1	29,9	1	3646	1	86,2	0	73,7	1	1,55	1	0,8
<b>26,5</b>	<b>11,5</b>	<b>1</b>	<b>29,8</b>	<b>1</b>	<b>3760</b>	<b>1</b>	<b>85,4</b>	<b>1</b>	<b>75,0</b>	<b>1</b>	<b>1,63</b>	<b>1</b>	<b>1,0</b>
32,6	11,1	1	29,8	1	3837	1	84,9	1	75,6	1	1,70	0	0,9
34	13,3	1	30,0	1	3835	1	85,0	1	75,9	1	1,73	0	0,9
33,6	16,0	0	31,0	1	3808	1	85,2	1	76,0	1	1,74	0	0,7
30	12,8	1	31,3	1	3855	1	85,3	1	76,0	1	1,73	0	0,9
31	12,8	1	30,9	1	4066	0	85,6	1	76,1	1	1,70	1	0,9
32,6	10,5	1	30,4	1	4182	0	85,8	1	76,2	1	1,67	1	0,9
34	9,6	1	29,0	1	4197	0	84,3	1	76,7	1	1,65	1	0,9
35,6	8,9	1	28,9	1	4190	0	81,6	1	77,5	1	1,64	1	0,9
38,1	10,5	1	30,4	1	4124	0	81,0	1	78,3	1	1,64	1	0,9

Приведенная табл. 3 получена на основе расчета текущего режима работы мельницы помола клинкера по данным завода ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент». В таблице приведены желаемые целевые диапазоны изменения рассмотренных показателей. Здесь  $\mu_i$  – характеристические функции целевых диапазонов изменения показателей,  $\alpha_j$  – весовые коэффициенты, отражающие важность выполнения соответствующих целевых диапазонов изменения показателей, С – целевая функция, показывающая взвешенное число выполненных целевых диапазонов изменения показателей.

В данном случае максимальное значение целевой функции равно 1, что позволяет оператору выбрать объём подачи материала в мельнице в размере 26,5 т/ч.

**Выводы.** Выбор решений для задачи оперативного управления относится к классу многокритериальных задач. В работе предложен метод принятия решений, исходя из множества допустимых технических условий, накладываемых на процесс помола. Подобная постановка задачи в общем случае является противоречивой. В работе предложен подход к решению данной задачи на основе определения максимального числа совместных взвешенных условий, налагаемых на процесс. Подобный подход позволяет организовать интерактивную процедуру выбора

допустимого решения при оперативном управлении процессом помола. Модельные расчеты были выполнены с использованием данных эксплуатации мельницы помола цементного завода ООО «Дюккерхофф Коркино Цемент». Расчеты показывают что увеличение производительности мельницы составляет 3–5 %, снижение удельной потребляемой мощности – 2–4 %.

### Библиографический список

1. Исмоилов М.И., Пиров Ф.С. Проблемы автоматизации предприятия по производству цемента // Методы и модели прикладной информатики: межвуз сб. науч. тр. МАДИ(ГТУ). – М., 2009. – С. 116–119.
2. Браун-Аквей В., Чохонелидзе А.Н., Лемпого Ф. Разработка программного обеспечения для управления контуром помола [Электронный ресурс] // Наукоедение: интернет-журнал. – 2014. – № 3(22). – URL: <http://naukovedenie.ru/sbornik22/66TVN314.pdf>
3. Chokhanelidze A.N., Lempogo F., Brown-Acquaye W. Analysis of cement production process and review of control strategies and methods [Электронный ресурс] // Наукоедение: интернет-журнал. – 2014. – № 2(24). – URL: <http://naukovedenie.ru/sbornik24/26TAVN514.pdf>
4. Романович А.А. Повышения эффективности процесса измельчения материалов с анизотропной текстурой // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Одесса: Куприенко, 2012. – Вып 4. – Т. 2. – С. 106–113.
5. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. – М.: Недра, 1981. – 243 с.
6. Boulvin, Renotte, Wouver V., Remy, Tarasiewicz and César. Modeling, simulation and evaluation of control loops for a cement grinding process // European Journal of Control. – 1999. – № 5. – P. 10–18.
7. Пироцкий В.З., Богданов В.С. Технологические системы измельчения (ТСИ) клинкера: характеристики и энергоэффективность // Цемент и его применение. – 1998. – № 6. – С. 12–16.
8. Голиков В.М., Репин С.В., Сапожников А.И. Снижение энергозатрат при производстве цемента с применением вибрационных машин // Вестник Тувин. гос. ун-та. Технические и физико-математические науки. – 2016. – № 3. – С. 105–112.

9. Голованова Л.В. Общая технология цемента: учебник для средних профтехучилищ. – М.: Стройиздат, 1984. – 118 с.

10. Чохонелидзе А.Н., Лемпого Ф., Аквей В.Б. Разработка системы автоматизированного управления для замкнутой цепью измельчения с использованием метода управления с прогнозирующими моделями // Наукоеведение: интернет-журнал. – 2014. – № 6(25). – С. 15.

11. Ключев А.С., Глазов Б.В., Миндин М.Б. Техника чтения схем автоматического управления и технического контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 376 с.

12. Кочетов В.С., Марченко А.А., Немировский Л.Р. Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов. – Л.: Стройиздательство, 1981.

13. Жуков В.П., Ушаков С.Г. Оптимальное распределение по крупности мелющих тел в барабанных мельницах // Интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов. – Иваново, 1987. – С. 40–43.

14. Збожинек П. Установки помола сырья, цементного клинкера и других материалов // Цемент и его применение. – 2008. – № 3. – С. 31–33.

15. Каманский А.Д., Кастрицкий С.Д. Влияние аспирации на производительность цементных мельниц // Цемент. – 1951. – № 2. – С. 14–18.

16. Богатиков В.Н., Лемпого Ф., Браун-Аквей В. Аппаратное и программное обеспечения для системы управления технологическим процессом измельчения [Электронный ресурс] // Наукоеведение: интернет-журнал. – 2015. – № 1. – Т. 7. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/100TVN115.pdf>

17. Романович А.А. Определение центра масс шаровой загрузки первой камеры мельницы, оснащенной лопастными энергообменными устройствами // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2013. – 2(51). – С. 166–171.

18. Rajamana R.H., Herbst J.A. Optimal control of a ball mill grinding circuit – II. Feedback and optimal control // Chemical Engineering Science. – 1991. – 46(3). – P. 871–879.

19. Bhattu J., Miller F., Kosmatka S. Innovations in Portland Cement Manufacturing, CD-ROM: SP400. – Portland Cement Association, Skokie, Ill, USA, 2004.

20. Mehta P. Concrete: structure, properties, and materials. – Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1986.

## References

1. Ismoilov M.I., Pirov F.S. Problemy avtomatizatsii predpriatiia po proizvodstvu tsementa [Problems automation plant for the production of cement]. *Metody i modeli prikladnoi informatiki. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov MADI(GTU)*. Moscow, 2009, pp. 116-119.
2. Braun-Akvei V., Chokhnelidze A.N., Lempogo F. Razrabotka programmogo obespecheniia dlia upravleniia konturom pomola [Development of software for grinding circuit control]. *Naukovedenie. Internet-zhurnal*, 2014, no. 3(22), available at: <http://naukovedenie.ru/sbornik22/66TVN314.pdf>
3. Chokhnelidze A.N., Lempogo F., Brown-Acquaye W. Analysis of cement production processan dreview of control strategie sand methods. *Naukovedenie. Internet-zhurnal*, 2014, no. 2(24), available at: <http://naukovedenie.ru/sbornik24/26TAVN514.pdf>
4. Romanovich A.A. Povyseniia effektivnosti protsessa izmel'cheniia materialov s anizotropnoi teksturoi [Improving the efficiency of grinding materials with anisotropic texture]. *Sovremennye problemy i puti ikh resheniia v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii 2012. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Odessa: Kuprienko, 2012, iss. 4, vol. 2, pp. 106-113.
5. Linch A.Dzh. Tsikly drobleniia i izmel'cheniia. Modelirovanie, optimizatsiia, proektirovanie i upravlenie [Crushing and grinding cycles. Modeling, optimization, design and management]. Moscow: Nedra, 1981. 243 p.
6. Boulvin, Renotte, Wouwer V., Remy, Tarasiewicz and César. Modeling, simulation and evaluation of control loops for a cement grinding process. *European Journal of Control*, 1999, no. 5, pp. 10-18.
7. Pirovskii V.Z., Bogdanov V.S. Tekhnologicheskie sistemy izmel'cheniia (TSI) klinkera: kharakteristiki i energoeffektivnost' [Technological grinding systems (TGS) clinker: characteristics and energy efficiency]. *Tsement i ego primenenie*, 1998, no. 6, pp. 12-16.
8. Golikov V.M., Repin S.V., Sapozhnikov A.I. Snizhenie energozatrat pri proizvodstve tsementa s primeneniem vibratsionnykh mashin [Reduction of energy consumption in the production of cement with the use of vibration machines]. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*, 2016, no. 3, pp. 105-112.
9. Golovanova L.V. Obshchaia tekhnologiia tsementa [General cement technology]. Moscow: Stroiizdat, 1984. 118 p.

10. Chokhonelidze A.N., Lempogo F., Akvei V.B. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo upravleniia dlia zamknutoi tsep'iu izmel'cheniia s ispol'zovaniem metoda upravleniia s prognoziruuiushchimi modeliami [Development of an automated control system for a closed grinding circuit using a control method with predictive models]. *Naukovedenie. Internet-zhurnal*, 2014, no. 6(25), p. 15.

11. Kliuev A.S., Glazov B.V., Mindin M.B. Tekhnika chteniia skhem avtomaticheskogo upravleniia i tekhnicheskogo kontroliia [Technique of Reading Automatic Control Schemes and Technical Controls]. Moscow Energoatomizdat, 1983. 376 p.

12. Kochetov V.S., Marchenko A.A., Nemirovskii L.R. Avtomatizatsiia proizvodstvennykh protsessov i ASUP promyshlennosti stroitel'nykh materialov [Automation of Production Processes and ASUP of the Building Materials Industry]. Leningrad: Stroiizdatel'stvo, 1981.

13. Zhukov V.P., Ushakov S.G. Optimal'noe raspredelenie po krupnosti meliushchikh tel v barabannykh mel'nitsakh [Optimal particle size distribution of grinding bodies in drum mills]. *Intensifikatsiia protsessov mekhanicheskoi pererabotki sypuchikh materialov*. Ivanovo, 1987, pp. 40-43.

14. Zbozhinek P. Ustanovki pomola syr'ia, tsementnogo klinkera i drugikh materialov [Installations for grinding of raw materials, cement clinker and other materials]. *Tsement i ego primenenie*, 2008, no. 3, pp. 31-33.

15. Kamanskii A.D., Kastritskii S.D. Vliianie aspiratsii na proizvoditel'nost' tsementnykh mel'nits [Influence of aspiration on the performance of cement mills]. *Tsement*, 1951, no. 2, pp. 14-18.

16. Bogatikov V.N., Lempogo F., Braun-Akvei V. Apparatoe i programmnoe obespecheniia dlia sistemy upravleniia tekhnologicheskim protsessom izmel'cheniia [Hardware and software for the grinding process control system]. *Naukovedenie. Internet-zhurnal*, 2015, no. 1, vol. 7, available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/100TVN115.pdf>

17. Romanovich A.A. Opredelenie tsentra mass sharovoi zagruzki pervoi kamery mel'nitsy, osnashchennoi lopastnymi energoobmennymi ustroystvami [Determination of the center mass of ball loading first chamber of the mill equipped with bladed energy-exchanging devices]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, 2(51), pp. 166-171.

18. Rajamana R.H., Herbst J.A. Optimal control of a ball mill grinding circuit - II. Feedback and optimal control. *Chemical Engineering Science*, 1991, 46(3), pp. 871-879.

19. Bhattu J., Miller F., Kosmatka S. Innovations in Portland Cement Manufacturing, CD-ROM: SP400. Portland Cement Association, Skokie, Ill, USA, 2004.

20. Mehta P. Concrete: structure, properties, and materials. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1986.

### **Сведения об авторах**

**Казаринов Лев Сергеевич** (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Автоматика и управление» Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: kazarinovls@susu.ru).

**Хасанов Джасурджон Рустамджонович** (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и управление» Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: jacur@mail.ru).

### **About the authors**

**Kazarinov Lev Sergeyeovich** (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Head of the Automation and Control Department of South Ural State University (NRU) (454080, Chelyabinsk, 76, Lenin ave., e-mail: kazarinovls@susu.ru).

**Khasanov Dzhasurdzhon Rustamdzhonovich** (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department Automation and Control of the South Ural State University (NRU) (454080, Chelyabinsk, 76, Lenin ave., e-mail: jacur@mail.ru).

Получено 15.04.2019