

7. **Shulman, Z. P.**, Kovalev, Ya. N., & Zal'tsgendler, E. A. (1978) *Rheophysics of Conglomerate Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika. 240 p. (in Russian).

8. **Gokhman, L. M.** (1987) On Role of Organic Bonding Materials for Better Performance of Asphalt Concrete. *Avtomobilnye Dorogi* [Automobile Highways], 7, 21–23 (in Russian).

9. **Kovalev, Ya. N.** (2002) *Activation Technologies of Highway Composite Materials*. Minsk, Belorusskaya Entsiklopedia. 336 p. (in Russian).

10. **Kovalev, Ya. N.** (1990) *Activation Technological Mechanics of Highway Asphalt Concrete*. Minsk, Vysheyshaya Shkola. 180 p. (in Russian).

11. **Gorelyshev, N. V.**, Akimova, T. N., & Pimenova, I. I. (1958) Mechanical Properties of Bitumen in Thin Layers. *Trudy MADI* [Proceedings of MADI (Moscow State Automobile & Road Technical University)], Issue 23, 42–54 (in Russian).

12. **Korolev, I. V.** (1986) *Direction of Bitumen Economics in Road Construction*. Moscow, Transport. 149 p. (in Russian).

13. **Zinchenko, V. N.** (1979) *Issledovanie Vlianiia Ul'trazvukovoi Obrabotki Bituma na Strukturoobrazovanie i Svoistva Asfal'tobetona*. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk [Investigation of Bitumen Ultrasonic Treatment Influence on Structure Formation and Asphalt Concrete Properties. Dr. tech. sci. diss.]. Kharkov, 28 p. (in Russian).

Поступила 12.12.2013

УДК 691-492

ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ РЕИНЖИНИРИНГА ТЕХПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА И СИЛИКАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Докт. геол.-минерал. наук, проф. БУСЕЛ И. А., инж. БУСЕЛ П. И.

УП «Инжгеострой»

E-mail: pavel.busel@gb.by

Процесс помола характеризуется высокой энергоемкостью и низкой производительностью. Эффективность шаровых мельниц, применяемых в настоящее время для помола, достаточно низкая. Только 3–6 % подаваемой электроэнергии идет на измельчение материала. Остальная часть в форме теплоты, вибрации и шума теряется. Проблема снижения энергозатрат на помол весьма актуальна.

Повышение эффективности и качества технологического процесса измельчения сырьевых компонентов при производстве строительных материалов с целью снижения энергоемкости помола является одной из приоритетных задач энерго- и ресурсосбережения в строительной отрасли. Для уже существующих производств повышение эффективности измельчения целесообразно проводить путем модернизации имеющегося на предприятии оборудования и существующих технологических, управленческих и других процессов, связанных с помолом минерального сырья. Чтобы снизить энергоемкость измельчения, необходимо выполнить комплексный реинжиниринг технологического процесса измельчения различных материалов, основанный на использовании новых модификаций мелющих тел, физических и химических интенсификаторов помола, современных информационных технологий и средств промышленной автоматизации. Применение современных информационных технологий и средств промышленной автоматизации позволяет вести процесс измельчения с производительностью, максимально достижимой для существующих мощностей за счет автоматического управления и учета непрерывных изменений технологических параметров. Кроме того, это дает возможность управлять процессом в реальном времени путем оперативной перестройки режимов технологического оборудования.

В статье рассмотрен подход к разработке методологии реинжиниринга технологического процесса измельчения сырьевых компонентов при производстве стройматериалов. Изложено современное состояние техпроцесса помола. Отмечена необходимость совершенствования технологического оборудования, используемого при измельчении сырьевых компонентов с целью повышения эффективности и качества, энерго- и ресурсосбережения. Показана возможность использования различных интенсификаторов помола, позволяющих повысить производительность измельчения. Рассмотрена концепция автоматизации системы управления процессом измельчения минерального сырья. Предложена концептуальная модель комплексирования различных методов и средств интенсификации процесса измельчения. Изложены методологические основы моделирования техпроцесса переработки минерального сырья при производстве цемента и силикатных изделий. Определены контролируемые параметры, необходимые для создания компьютерных моделей техпроцесса помола. Обосновано применение при создании компьютерных моделей имитационного моделирования. Рассмотрена методика имитационного моделирования техпроцесса. Указано на возможность использования аналитических и вероятностных методов. Разработаны и построены имитационные модели работы шаровой мельницы на основе

экспериментальных данных и вероятностных функций. Показана возможность управления технологическим процессом измельчения сырьевых компонентов на них.

За счет реализации предлагаемого комплекса организационно-технических решений можно повысить производительность помола до 30–50 % и существенно снизить энергозатраты на измельчение минерального сырья при производстве цемента и силикатных изделий. Объединенная методология реинжиниринга технологического процесса измельчения, включающая все перечисленные способы интенсификации, значительно повысит качество конечной продукции и снизит ее себестоимость, что будет способствовать повышению ее конкурентоспособности и привлекательности для потребителей.

Ключевые слова: техпроцесс, сырье, измельчение, моделирование, реинжиниринг, энергоемкость.

Ил. 3. Библиогр.: 12 назв.

PRINCIPLES OF RE-ENGINEERING METHODOLOGY FOR TECHNOLOGICAL PROCESS IN PROCESSING OF RAW MATERIAL COMPONENTS WHILE PRODUCING CEMENT AND SILICATE PRODUCTS

BUSEL I. A., BUSEL P. I.

UE “Inzhgeostroy”

Grinding process is characterized by high energy consumption and low productivity. Nowadays efficiency of the ball mills applied for grinding is rather low. Only 3–6 % of the supplied power energy is used for material grinding. The rest part of the energy disappears in the form of heat, vibration and noise. So matter concerning reduction of energy consumption is of great importance.

Improvement of efficiency and quality of technological process in grinding of raw material components while producing construction materials is considered as one of priority-oriented targets of power- and resource saving in construction industry with the purpose to reduce energy consumption for grinding. Grinding efficiency at operating enterprises is reasonable to improve by modernization of the equipment and existing technological, management and other processes which are related to grinding of mineral raw material. In order to reduce grinding power consumption it is necessary to carry out a complex re-engineering of technological process in grinding of various materials which is based on usage of new modifications of grinding bodies, physical and chemical grinding aids, modern information technologies and industrial automation equipment. Application of modern information technologies and industrial automation equipment makes it possible to execute the grinding process with maximum achievable productivity for existing capacity due to automatic control and consideration of continuous changes in technological parameters. In addition to this such approach gives an opportunity to control processes in real time by immediate adjustments of technological equipment operational modes.

The paper considers an approach to the development of re-engineering methodology for technological process in grinding of raw material components while producing construction materials. The present state of technological grinding process is presented in the paper. The paper points out the necessity to modernize technological equipment used for grinding raw material components with the purpose to improve efficiency and quality, power- and resource saving. The possibility of using various grinding aids that permit to increase grinding productivity is shown in the paper. The paper studies an automation concept of the control system which used for grinding process of mineral raw material. A conceptual model for complexation of various methods grinding aids has been proposed in the paper. The paper presents methodological principles for simulation of technological process used for processing of mineral raw material while producing cement and silicate products. The parameters which are to be controlled and which are necessary for development of computer simulations of technological grinding process have been determined in the paper. The paper justifies an application of imitation simulation for creation of computer models. Methodology for imitation simulation of the technological process has been studied in the paper. The paper confirms the possibility to use analytical and probability methods. Imitation simulations of a grinding mill operation have been developed on the basis of experimental data and probability functions. The possibility of controlling technological process of raw material grinding has been demonstrated in the paper.

While implementing the proposed complex of organizational and technical recommendations it is possible to increase grinding productivity up to 30–50 % and significantly reduce и существенно снизить energy consumption for mineral raw material grinding during production of cement and silicate products. The combined re-engineering methodology for grinding process including all the mentioned intensification methods substantially increases quality of final products and reduces its self-cost that will favour its compatibility and attractiveness for consumers.

Keywords: technological process, raw material, grinding, simulation, re-engineering, power consumption.

Fig. 3. Ref.: 12 titles.

Введение. Республика Беларусь располагает значительными производственными мощностями для выпуска цемента и стеновых силикатобетонных изделий. Для производства силикатных изделий используются природный кварцевый песок и комовая известь. Известь и песок размалываются в трубных мельницах с целью получения известково-песчаного вяжущего в процессе сухого помола, а при мокром помоле песок размалывается с водой для получения песчаного шлама. Процесс помола характеризуется высокой энергоемкостью и низкой производительностью. За один час работы мельница потребляет (450 ± 50) кВт электроэнергии. Фактическая производительность мельницы сухого помола – (10 ± 1) т/ч, мельницы мокрого помола – (11 ± 2) т/ч, при проектных 20–25 т/ч. Предприятия по производству силикатобетона подвергают сухому и мокрому помолу до 1 млн т песчаного шлама и известково-песчаного вяжущего. Энергозатраты на помол при этом достигают 40 млн кВт. Расход электроэнергии на помол 1 т цемента составляет от 30 до 50 кВт. При планируемом объеме производства цемента 10 млн т в год расход электроэнергии составит около 400 млн кВт.

Эффективность шаровых мельниц, применяемых в настоящее время для помола, достаточно низкая. Только 3–6 % подаваемой электроэнергии идет на измельчение материала [1]. Остальная часть в форме теплоты, вибрации и шума теряется. Проблема снижения энергозатрат на помол весьма актуальна.

Повышение эффективности и качества технологического процесса измельчения сырьевых компонентов при производстве строительных материалов с целью снижения энергоемкости помола является одной из приоритетных задач энерго- и ресурсосбережения в строительной отрасли. Для уже существующих производств повышение эффективности измельчения целесообразно проводить путем модернизации имеющегося на предприятии оборудования и существующих технологических, управленческих и других процессов, связанных с помолом минерального сырья [2].

Методология реинжиниринга техпроцесса. Для снижения энергоемкости измельчения необходим комплексный реинжиниринг технологического процесса измельчения раз-

личных материалов, основанный на использовании новых модификаций мелющих тел (МТ), физических и химических интенсификаторов помола, современных информационных технологий и средств промышленной автоматики. Наиболее общие принципы реинжиниринга различных методов и средств интенсификации процесса измельчения реализуются в следующей процедуре.

Предварительное измельчение минерального сырья. В технологической схеме переработки сырьевых компонентов целесообразно предусматривать предварительное дробление твердых материалов (известняка, песка, гипса, глины, клинкера и др.) в центробежно-ударных дробилках. Ударный способ разрушения материалов, реализуемый в подобных измельчающих агрегатах, позволит:

- измельчать материалы любой крепости и твердости;
- перераспределить соотношение операций дробления и измельчения в сторону увеличения первой и снизить общие затраты на получение конечного продукта;
- снизить крупность материала перед его измельчением на дальнейших стадиях процесса помола и тем самым повысить производительность измельчительного передела до 20–30 %.

Применение мелющих тел новых модификаций. Одним из путей решения проблемы снижения энергозатрат является применение в технологии измельчения сырьевых компонентов МТ новых модификаций с повышенной износостойкостью. В традиционных технологиях измельчения сырьевых компонентов применяются цилиндрические МТ, имеющие незначительный литейный уклон, который при прохождении ударного импульса (в акустическом плане) не создает усиления импульса от одного торца мелющего цилиндра к другому. Кроме того, пятно контакта у соприкасающихся цилиндров имеет кратковременный линейчатый контакт, разрываемый при малейшем перекосе положения МТ [3]. Наиболее эффективными модификациями являются МТ, имеющие форму параболоидов и эллипсоидов, конструкция которых максимально приближена к форме их естественного износа [4]. Такая форма позволяет сократить расход МТ за счет уменьшения их износа, а также увеличить эффективность по-

мола (повышение производительности и увеличение тонкости помола).

Разрабатываемые УП «Инжгеострой» перспективные тела помола благодаря нетрадиционной геометрии имеют практически непрерывный трехмерный эллипсоидный контакт и твердость 415–534 НВ. При этом в сочетании большего и меньшего диаметров МТ использован известный эффект увеличения ударного импульса в направлении продольной оси МТ при существенной разнице $D_{\max}$ и $d_{\min}$. Благодаря этой геометрии ударный импульс предлагаемых тел помола длительностью от 0,1 до 10,0 нс развивает ударный импульс, оцениваемый как импульсное давление до 10000 кг/см², что дает основание говорить об акустоактивности новых модификаций МТ и в этой связи об акустических характеристиках всей системы помола, включая мелющий барабан, минеральное сырье и МТ в комплексе [5].

Применение технологии измельчения на основе МТ новых модификаций, использующих энергию ударного резонанса, вибраций и трения для генерации высокочастотных колебаний непосредственно в рабочий объем камеры, позволит повысить производительность шаровых мельниц на 15–20 %.

Применение поверхностно-активных веществ. При деформации твердых тел на их поверхности образуются микротрещины, которые служат главной причиной резкого снижения прочности твердых тел по сравнению с теоретически возможной прочностью, рассчитанной на основании данных о структуре. Микротрещины образуются в слабых местах кристаллической решетки – в местах дефектов кристаллической структуры на границах зерен. После снятия нагрузки, если не произошло разрушение структуры, образовавшиеся микротрещины смыкаются и исчезают.

Развитие микротрещин под действием внешних деформирующих нагрузок может происходить значительно легче при адсорбции различных веществ из среды, в которой ведется измельчение. Адсорбироваться в этих условиях могут как ионы электролита, так и поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые образуют на адсорбировавшей их поверхности двумерный газ, и под действием давления двумерного газа они проникают в микротрещины,

расширяя их и экранируя силы сцепления между противоположными поверхностями щели (эффект Ребиндера) [6]. За счет применения ПАВ можно повысить производительность помола на 10–15 %, а также уменьшить износ (расход) МТ до 10 %.

Аспирация (удаление пыли) при помоле. При размалывании извести и песка в трубных мельницах с целью получения известково-песчаного вяжущего в процессе сухого помола при производстве ячеистого бетона, а также при помоле цемента образуется значительное количество пыли, которая оказывает существенное влияние на интенсивность измельчения и оценку качества выходного продукта, так как наличие пылевой фракции искажает истинное значение удельной поверхности получаемого в процессе помола материала, а также способствует налипанию пылевой фракции на МТ, снижая производительность помола. Удельная поверхность помола в таких условиях отражает, как правило, обобщенную характеристику качества измельченного материала. Наиболее точными характеристиками тонины помола являются фракционный (гранулометрический) состав полученного в процессе измельчения материала и степень его однородности, которые определяются специальными методами. Аспирация (удаление пыли) при помоле позволит повысить интенсивность и качество измельчения, увеличить производительность помола до 10 %.

Удаление статического электричества. Известно, что налипание измельчаемого материала к МТ вредно отражается на производительности мельниц. Сложившееся представление о том, что налипание является результатом низкого качества МТ, шероховатости их поверхности, некорректно. Причина налипания кроется совершенно в другом, а именно – в образующихся в результате трения и ударов МТ между собой и о бронеовые плиты электростатических напряжениях на поверхности шаров и цилиндров. Удалив возникающие в процессе измельчения электростатические напряжения, можно повысить производительность мельниц на 10–15 %.

Использование ультразвука. Метод основан на введении в рабочий объем камеры ультразвуковых колебаний для последующей кон-

тактной обработки присоединенных сред минерального происхождения. Преимущество и новизна предлагаемого метода состоят в простоте и дешевизне конструкций способа безэлектронного получения ультразвуковых эффектов с помощью энергии трения специально организованных поверхностей. Принцип действия устройства основан на генерации высокочастотных колебаний негладкой поверхностью сопрягаемых пар трения, дальнейшей канализации акустической энергии и использовании ее для интенсификации процесса измельчения сырьевых материалов [7].

Таким образом, часть электроэнергии, используемой для вращения мельницы, может быть направлена на получение механическим способом ультразвуковых эффектов, позволяющих существенно повысить эффективность и качество измельчения минерального сырья. Применение физико-механического способа генерации высокочастотных колебаний непосредственно в рабочий объем камеры измельчения позволит повысить производительность мельницы до 10–15 %.

Автоматизация системы управления измельчением минерального сырья. Применение современных информационных технологий и средств промышленной автоматики позволяет вести процесс измельчения с производительностью, максимально достижимой для существующих производственных мощностей за счет автоматического управления и учета непрерывных изменений технологических параметров. Кроме того, это дает возможность управлять процессом в реальном режиме времени путем оперативной перестройки режимов технологического оборудования. Только за счет внедрения информационных продуктов и средств промышленной автоматики производительность процесса помола может увеличиться на 7 % [8].

На сегодняшний день достаточно хорошо изучены методы решения задач автоматизации для детерминированных объектов, в которых составляющие их элементы взаимодействуют между собой точно известным образом. Однако существует класс промышленных объектов, для которых детерминированные модели и методы управления практически не пригодны. Объекты такого класса обладают следующими особенностями [9]:

- во-первых, непрерывный контроль прямых показателей на выходе этих объектов в реальном времени не всегда возможен (осуществляется лишь эпизодический лабораторный контроль);

- во-вторых, не удается получить постоянные во времени показатели качества конечного продукта из-за особенностей технологии;

- в-третьих, информационные запаздывания в каналах «управляющие воздействия – показатели качества продукта» настолько велики, что непосредственное использование этих показателей для определения управляющих воздействий проблематично.

В качестве примера недетерминированных стохастических объектов рассмотрим шаровые мельницы для помола цемента и сырьевых компонентов при производстве ячеистого бетона. Контролируемый параметр качества готового продукта – тонкость помола, определяемая по удельной поверхности ($\text{см}^2/\text{г}$) и проценту остатка на сите с калиброванными ячейками после просева пробы установленного веса. Зависимость тонкости помола от расхода материала не является детерминированной. Основная цель управления данным процессом – обеспечение максимальной производительности процесса и минимизация за счет этого расхода электроэнергии при условии соблюдения значений тонкости помола готового материала, заданных технологическими требованиями. Поскольку измерения тонкости производятся путем отбора проб с последующей лабораторной обработкой, непосредственное использование этого показателя в системе автоматизации невозможно.

В рамках общей концепции решения вопроса автоматизации помола в шаровой мельнице в системе управления техпроцессом измельчения можно использовать сигналы, косвенно связанные с тонкостью помола [10]. Контур управления настраивает процесс помола согласно изменениям значений этих косвенных показателей. Поэтому прежде чем создавать контур управления, необходимо убедиться в правильности предлагаемого подхода.

В методическом плане задача автоматизации может быть решена путем реализации следующего алгоритма действий:

- исследование и описание существующего процесса;

- разработка конструкторских и технологических решений по оптимизации и автоматизации исследуемого процесса;
- техническое и экономическое обоснования разработанных решений;
- экспериментальное подтверждение правильности предлагаемых решений;
- внедрение решений непосредственно на производстве.

В качестве первого шага для изучения подобных процессов и проведения экспериментов предлагается создание упрощенного аналога изучаемого явления. Современный подход в научных исследованиях состоит в том, что реальные объекты заменяются их упрощенными представлениями, абстракциями, выбираемыми таким образом, чтобы в них была отражена суть явления, те свойства исходных объектов, которые наиболее существенны для решения поставленной проблемы. При построении такого аналога, как заменитель реальной системы, необходимо выделить те аспекты, которые будут определяющими для решения задачи, и проигнорировать аспекты, усложняющие проблему, делающие анализ очень трудным или вообще не возможным. Созданный в результате такого упрощения объект представляет собой модель интересующего нас технологического процесса как сложной динамической системы. В дальнейшем, анализируя такую модель, можно получить характеристики, которые объясняют известные и предскажут новые свойства исследуемой реальной системы без экспериментов с самой системой.

Трудность понимания причинно-следственных связей в сложной системе может приводить к ее неэффективной организации, ошибкам в ее проектировании, большим затратам на их устранение. Сегодня моделирование становится единственным практическим эффективным средством нахождения путей оптимального решения проблем в сложных системах, средством поддержки принятия ответственных решений.

Одним из методов создания модели процесса помола в шаровой мельнице, как и любого другого процесса, может быть компьютерное моделирование. Например, для рассматриваемого объекта необходимо создать компьютерную модель процесса помола сырьевых компо-

нентов, где основными контрольными показателями будут величины, характеризующие:

- качество исходного сырья;
- тонкость помола готового материала;
- производительность процесса;
- расход электроэнергии.

Основное требование, которое можно предъявить на первоначальном этапе создания модели рассматриваемого объекта, – это возможность динамической имитации работы действующей установки во времени [11]. Использование абстракций при решении проблем с помощью моделей часто состоит в применении того или иного математического аппарата. Некоторые динамические системы можно описать в виде систем линейных дифференциальных и алгебраических уравнений и получить решение аналитически. Вместе с тем, использование чисто аналитических методов при моделировании сложных реальных систем сталкивается с серьезными трудностями: классические математические модели, допускающие аналитическое решение, в большинстве случаев к реальным задачам неприменимы. Так, если попытаться построить математический аппарат, позволяющий рассчитать величину удельной поверхности готового продукта на выходе шаровой мельницы в зависимости от входных параметров в произвольный момент времени, то исследователь окажется перед следующей проблемой:

- это задача с большим количеством входных параметров;
- связи между входными параметрами имеют сложный характер;
- корреляция между отдельными входными параметрами отсутствует;
- значения некоторых параметров не поддаются измерениям или расчетам.

При детерминированной постановке задачи в вычислениях необходимо будет определять численные значения целого ряда параметров измельчения, которые характеризуют этот процесс. Однако не все параметры могут иметь численное измерение в реальном режиме времени. Например, расход (износ) мелющих тел для произвольного момента времени измерить или рассчитать точно в настоящее время практически не представляется возможным, так как эта величина зависит не только от свойств измельчаемого материала, но и от многих других

параметров, которые в процессе помолы могут принимать то или иное значение с определенной долей вероятности. То есть применение чисто аналитического решения поставленной задачи, скорее всего, невозможно, и необходимо использовать теорию вероятности. В конечном результате можно получить либо сложную систему, наполненную множеством логико-семантических условий и вероятностных вычислений, из-за чего она будет уже не аналитической и вычисляющей конечный результат с определенной вероятностью, либо до предела упрощенную математическую, но неадекватную модель.

Кроме того, любая компьютерная программа работает согласно определенному набору команд и четко организованному алгоритму. Каким же образом реализовать компьютерную модель для объекта, в котором составляющие его элементы взаимодействуют между собой по законам, не поддающимся четкому математическому описанию? То есть как создать компьютерную модель для недетерминированного объекта?

Решение подобных задач возможно на основе использования имитационного моделирования [12]. Имитационное моделирование – это разработка программных моделей реальных или гипотетических систем, реализация этих программ на компьютере и анализ результатов компьютерных экспериментов по исследованию поведения моделей. Имитационное моделирование имеет существенное преимущество перед аналитическим в тех случаях, когда:

- отношения между переменными в моделях нелинейны и поэтому аналитическую модель трудно или невозможно построить;

- модель содержит вероятностные компоненты;
- для понимания поведения системы требуется визуализация динамики происходящих в ней процессов;
- модель содержит много параллельно функционирующих взаимодействующих компонентов.

Имитационная модель – это программная система, отражающая структуру и поведение моделируемого объекта или явления во времени. Технология имитационного моделирования позволяет использовать как аналитический, так и вероятностный способ моделирования. Кроме того, построение моделей может производиться на основе экспериментальных показателей, когда ни один из аппаратов моделирования не дает удовлетворительных результатов.

На рис. 1 представлен фрагмент имитационной модели работы шаровой мельницы ОАО «Гомельстройматериалы», построенной с использованием фактических параметров техпроцесса мокрого помола песка, полученных при испытаниях мелющих тел новых модификаций:

- износ (расход) мелющих тел, %;
- удельная поверхность помола, $\text{см}^2/\text{г}$;
- удельный расход электроэнергии, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$;
- производительность мельницы, $\text{т}/\text{ч}$;
- расход электроэнергии, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$.

Даже из приведенного фрагмента видно, что технологический процесс помола практически неуправляем. Организовать управление им в реальном режиме времени можно только на имитационных моделях модернизированного техпроцесса.

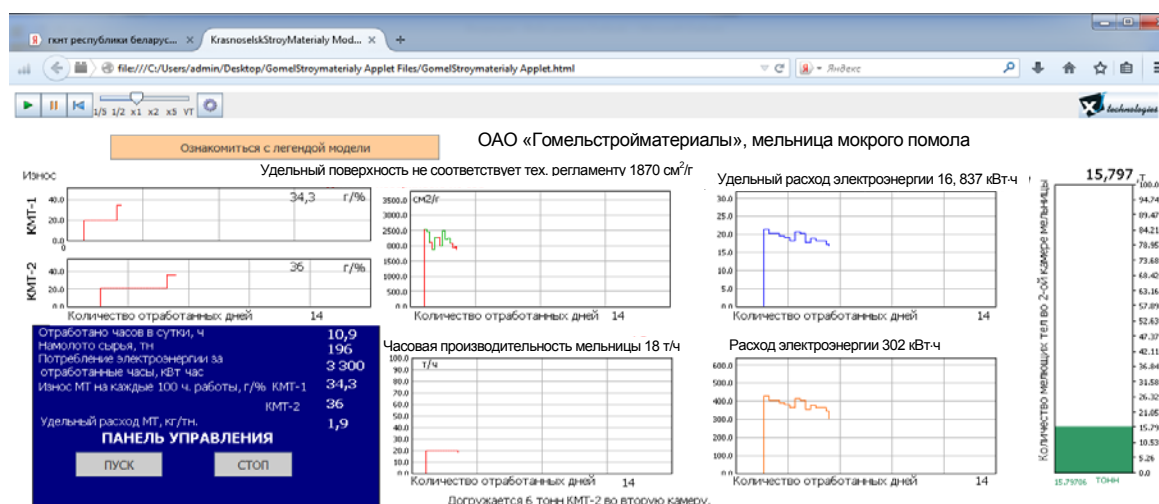


Рис. 1. Имитационная модель работы шаровой мельницы в виде графического отображения значений основных показателей процесса помола

Частный случай управления одним из параметров помола – удельной поверхностью измельчаемого материала – на основе использования датчиков косвенного сигнала, в зависимости от величины косвенного сигнала и местоположения датчика вдоль оси барабана шаровой мельницы показан на рис. 2. Модель построена с использованием вероятностных функций.

С помощью различного рода датчиков можно измерять и другие параметры техпроцесса (рис. 1) и управлять этими процессами в реальном режиме времени путем своевременного изменения технологических режимов работы мельницы.

Конечный продукт имитационного моделирования может представлять собой программу, которую можно запускать при помощи интернет-браузера. Специалист, создающий имитационную модель, должен иметь не только знания в той прикладной области, для которой строится модель, но также знания в программировании, теории вероятностей и статистике. Во многих случаях имитационное моделирование – это единственный способ получить представление о поведении сложной системы и провести ее анализ. Предлагаемые методы интенсификации измельчения сырьевых компонентов при производстве строительных материалов отображены на рис. 3.

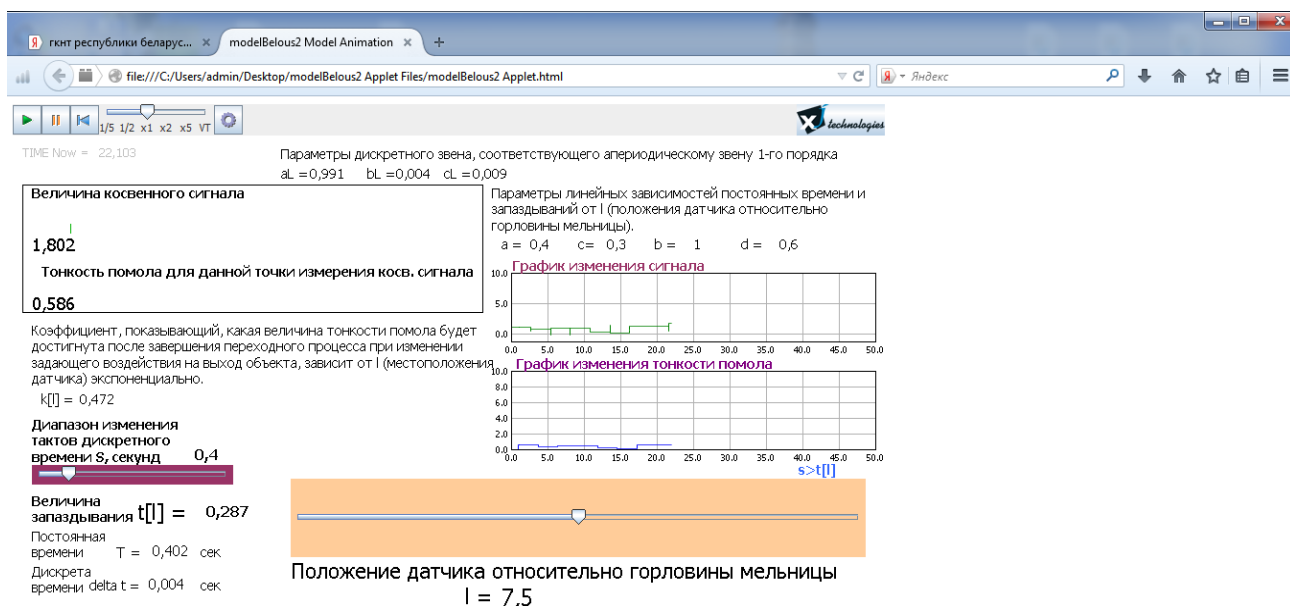


Рис. 2. Имитационная модель работы шаровой мельницы по определению значения тонкости помола сырьевых компонентов в зависимости от величины косвенного сигнала и местоположения датчика вдоль оси барабана шаровой мельницы

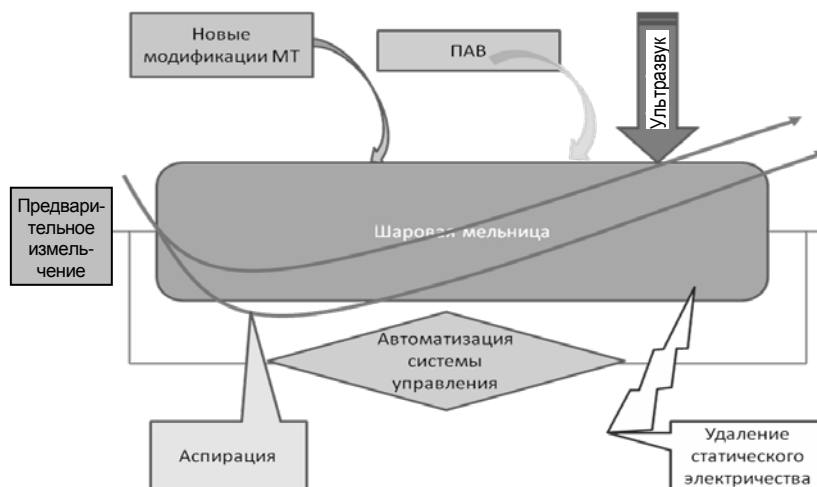


Рис. 3. Схема модернизации технологического процесса измельчения сырьевых компонентов

Эффективность каждого из методов интенсификации и их вклад в общий результат определяются вероятностно-статистическими способами на основе универсального аналитического синтеза реальных объектов измельчения как сложных организационно-технических систем.

ВЫВОДЫ

1. Для повышения эффективности и качества технологического процесса измельчения сырьевых компонентов при производстве цемента и силикатных изделий необходимы комплексный реинжиниринг рабочих процессов, их модернизация и автоматизация на основе современных научно-технологических достижений, информационных ресурсов и технологий.

2. За счет реализации предлагаемого комплекса организационно-технических решений можно повысить производительность помола до 30–50 % и существенно снизить энергозатраты на измельчение минерального сырья при производстве цемента и силикатных изделий.

3. Объединенная методология реинжиниринга технологического процесса измельчения, включающая все перечисленные способы интенсификации, значительно повысит качество конечной продукции и снизит ее себестоимость, что будет способствовать повышению ее конкурентоспособности и привлекательности для потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артамонов, А. В. Влияние способа помола на строительно-технические свойства цемента / А. В. Артамонов, М. С. Гаркави, Е. В. Каменщиков // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2008. – С. 55–57.
2. Бусел, И. А. Комплексная модернизация технологического процесса измельчения сырьевых компонентов при производстве строительных материалов / И. А. Бусел // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2012. – С. 5–8.
3. Капсаров, А. Г. Некоторые эксплуатационные характеристики перспективных тел помола / А. Г. Капсаров, И. А. Бусел, И. А. Белов // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 2-й Междунар. науч. конф. – Минск, 2005. – С. 50–52.
4. Бусел, И. А. Теоретические особенности и практические результаты применения новых модификаций мелющих тел / И. А. Бусел // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2010. – С. 81–82.
5. Капсаров, А. Г. Особенности контактирования выпуклых и цилиндрических мелющих тел / А. Г. Капсаров, И. А. Бусел, Т. Л. Вербицкая // Центробежная техника –

высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2008. – С. 107–109.

6. Кругляков, П. М. Физическая и коллоидная химия: учеб. пособие / П. М. Кругляков, Т. Н. Хаскова. – М.: Высш. шк., 2005. – 319 с.

7. Капсаров, А. Г. Способ ультразвукового упрочнения поверхности металлических изделий / А. Г. Капсаров, И. А. Бусел, Р. В. Ядловский // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-технич. конф. – Минск, 2008. – С. 110–112.

8. Бусел, И. А. Методологические основы моделирования технологического процесса измельчения сырьевых компонентов при производстве строительных материалов / И. А. Бусел, В. А. Лебедев // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 4-й Междунар. науч.-технол. конф. – Минск, 2012. – С. 8–11.

9. Белоус, И. Г. Модели и алгоритмы управления объектами со стохастическим механизмом формирования показателей качества готовой продукции: на примере шаровой мельницы сухого помола цемента: автореф. ... канд. техн. наук / И. Г. Белоус. – Волгоград, 2010. – 20 с.

10. Бусел, И. А. Адаптивное управление технологическим процессом помола горных пород / И. А. Бусел, А. Г. Капсаров // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 2-й Междунар. науч. конф. – Минск, 2005. – С. 19–22.

11. Моисеев, Н. Н. Математика ставит эксперимент / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1979. – 224 с.

12. Максимей, И. В. Математическое моделирование больших систем: учеб. пособие для спец. «Прикладная математика» / И. В. Максимей. – Минск: Высш. шк., 1985. – 119 с.

REFERENCES

1. Artamonov, A. V., Garkavi, M. S., & Kamenshikov, E. V. (2008) Influence of Grinding Method on Construction and Technical Cement Properties. *Tsentrobezhnaia Tekhnika – Vysokie Tekhnologii. Materialy 3-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Centrifugal Equipment – High Technologies. Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 55–57 (in Russian).
2. Busel, I. A. (2012) Complex Modernization of Technological Process for Grinding of Raw Material Components While Producing Construction Materials. *Pererabotka Mineral'nogo syr'ia. Innovatsionnye Tekhnologii i Oborudovanie. Materialy 4-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Processing of Mineral Raw Material. Innovative Technologies and Equipment. Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 5–8 (in Russian).
3. Kapsarov, A. G., Busel, I. A., & Belov, I. A. (2005) Some Operational Characteristics of Prospective Grinding Bodies. *Tsentrobezhnaia Tekhnika – Vysokie Tekhnologii. Materialy 2-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Centrifugal Equipment – High Technologies. Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 50–52 (in Russian).
4. Busel, I. A. (2010) Theoretical Peculiarities and Practical Application Results of New Modifications of Grinding Bodies. *Opyt Proizvodstva i Primeneniia Iacheistogo Betona Avtoklavnogo Tverdeniia. Materialy 6-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konferentsii* [Experience in Production and Application of Cellular Autoclaved Concrete. Proceedings of the 6th Inter-

national Scientific and Technical Conference]. Minsk, 81–82 (in Russian).

5. **Kapsarov, A. G.**, Busel, I. A., & Verbitskaya, T. L. (2008) Peculiar Features in Contacting of Convex and Cylindrical Grinding Bodies. *Tsentrobezhnaia Tekhnika – Vysokie Tekhnologii. Materialy 3-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Centrifugal Equipment – High Technologies. Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 107–109 (in Russian).

6. **Krugliakov, P. M.**, & Khaskova, T. N. (2005) *Physical and Colloid Chemistry*. Moscow, Vysshaya Shkola. 319 p. (in Russian).

7. **Kapsarov, A. G.**, Busel, I. A., & Yadlovisky, R. V. (2008) Method for Ultrasound Strengthening of Metal Product Surface. *Tsentrobezhnaia Tekhnika – Vysokie Tekhnologii. Materialy 3-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Centrifugal Equipment – High Technologies. Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 110–112 (in Russian).

8. **Busel, I. A.**, & Lebedev, V. A. (2012) Methodological Principles for Simulation of Technological Process Used for Grinding of Raw Material Components While Producing Construction Materials. *Pererabotka Mineral'nogo Syr'ia. Innovatsionnye Tekhnologii i Oborudovanie. Materialy 4-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Processing of Mineral

Raw Material. Innovative Technologies and Equipment. Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 8–11 (in Russian).

9. **Belous, I. G.** (2010) *Modeli i Algoritmy Upravleniia Ob'Ektami so Stokhasticheskim Mekhanizmom Formirovaniia Pokazatelei Kachestva Gotovoi Produktsii: na Primere Sharovoi Mel'nitsy Sukhogo Pomola Tsementa. Avtoref. Kand. Tekhn. Nauk* [Models and Algorithms for Controlling Objects with Stochastic Mechanism for Quality Indices of Final Products: Grinding Mill for Cement Dry Milling Taken as an Example. Dr. tech. sci. diss.]. Volgograd, 20 p. (in Russian).

10. **Busel, I. A.**, & Kapsarov, A. G. (2005) Adaptive Control of Technological Process for Mine Rock Grinding. *Tsentrobezhnaia Tekhnika – Vysokie Tekhnologii. Materialy 2-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konferentsii* [Centrifugal Equipment – High Technologies. Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 19–22 (in Russian).

11. **Moiseev, N. N.** (1979) *Mathematics is Setting up an Experiment*. Moscow, Nauka. 224 p. (in Russian).

12. **Maksimov, I. V.** (1985) *Mathematical Simulation of Large Systems*. Minsk, Vysshaya Shkola. 119 p. (in Russian).

Поступила 16.10.2013

УДК 691.32.008.6

ОБ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Докт. техн. наук, проф. ОСИПОВ С. Н.

ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»

E-mail: up-niptis@rambler.ru

Анализ нормативных документов за последние 40 лет показал много различий в методологии и результатах расчетов определения физических свойств и показателей надежности строительных материалов и элементов конструкций. Разнообразие рекомендуемых нормативных документов указывает на существенную неопределенность принципов выбора уровней надежностей определения прочностных свойств бетонов, которые зависят от вероятностных характеристик. Значительное разнообразие видов распределения значений физических свойств строительных материалов и изделий зачастую приводит к необходимости использования эмпирических характеристик статистических коэффициентов физических свойств.

В течение последних 60 лет почему-то забыта методика оценки доверительных пределов для дисперсии по критерию хи-квадрат при малой выборке, которая была описана К. А. Браунли под редакцией академика А. Н. Колмогорова. Поэтому используемая до настоящего времени методика статистической оценки надежности расчетных величин прочности бетона может оказаться неудовлетворительной, особенно при малом количестве (менее 50) определений. Учитывая возможные отклонения плотности вероятности реализации параметра от нормального закона, общий уровень учета статистической изменчивости следует принимать не менее 0,98.

В статье предлагается новая методика определения минимально необходимого количества измерений физического свойства строительного материала или изделия и надежности этой оценки в соответствии с рекомендацией К. А. Браунли, отредактированной А. Н. Колмогоровым.

Ключевые слова: строительные материалы, физические свойства, количество испытаний, надежность, критерий хи-квадрат, доверительный предел, дисперсия, объем выборки.

Ил. 12 назв.