

Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудн. ИТМ НАНУ и ГКАУ, Днепропетровск,

Г.М. САКСОНОВ, ст. препод., ВУЗ «НГУ», Днепропетровск,

Е.В. ТЕРНОВАЯ, инж., ИТМ НАНУ и ГКАУ, Днепропетровск

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты динамического моделирования замкнутого цикла тонкого измельчения полезных ископаемых. На базе системы программирования AnyLogic разработан комплекс двух моделей, описывающих технологию замкнутого цикла тонкого измельчения материалов, включающий дискретно-событийный подход для имитационного моделирования всего технологического процесса измельчения и динамическое моделирование кинетики фракционного состава материала в помольной камере мельницы.

Ключевые слова: замкнутый цикл, тонкое измельчение, динамическое моделирование, фракционный состав.

Постановка задачи. Современные технологии в различных отраслях промышленности характеризуются все более возрастающим использованием тонкоизмельченных материалов, наноматериалов. При этом спектр измельчаемых материалов и требований к тонкости измельчения непрерывно расширяется. Выявление особенностей измельчения того или иного материала путем прямых экспериментальных исследований процесса во всевозможном диапазоне изменений его параметров является продолжительным и дорогостоящим процессом.

Именно поэтому возрастает роль математического моделирования, позволяющего значительно снизить требуемый объем экспериментальных исследований, необходимый для достоверного прогнозирования характеристик получаемых продуктов, тем самым уменьшить их стоимость.

В [1] показана возможность применения дискретно-событийного подхода для имитационного моделирования процесса измельчения в технологических схемах замкнутого цикла. При этом подходе изменения переменных состояния в модели происходят только в явно определенные моменты времени или под влиянием явно определенных событий. Находясь в некотором состоянии, дискретная система сохраняет его, не изменяя своих характеристик, до наступления очередного события, под воздействием которого переменные

© Н.С. Прядко, Г.М. Саксонов, Е.В. Терновая, 2014

системы (и, следовательно, ее состояние) изменяются скачком [2].

Для моделирования процесса измельчения в [1] использовалась матричная модель измельчения, в которой предполагается [3], что частицы всех классов крупности разрушаются с определенной вероятностью, при этом продукты разрушения могут попадать либо в исходный, либо в любой другой меньший класс крупности. Такая матричная модель измельчения предназначена для изучения влияния различных параметров технологической схемы измельчения на показатели ее эффективности, но при этом не описывает динамику измельчения материала в самой мельнице. В этой модели время измельчения материала задается в качестве начального параметра, что значительно уменьшает ее адекватность реальной схеме измельчения.

Цель данной работы – разработать модель, описывающую динамику изменения фракционного состава измельчаемого материала в узлах технологической схемы измельчения.

Для создания динамической имитационной модели предлагается вместо матричной модели использовать ячеечную модель измельчения. В этом случае моделирование кинетики процесса измельчения рассматривается через последовательные малые промежутки времени Δt – т.н. время перехода. Тогда текущие моменты времени будут рассчитываться как $tk = (k - 1)\Delta t$, где целое число $k = 1, 2, \dots$ (номер перехода) становится целочисленным аналогом текущего времени. Созданная модель реализована при помощи языка моделирования AnyLogic.

Исследуется замкнутый цикл измельчения с периодической подачей материала. Поток материала представляется смесью разно-фракционного сыпучего материала, который через равные промежутки времени дискретными порциями поступает в накопитель 1 (рис.1).

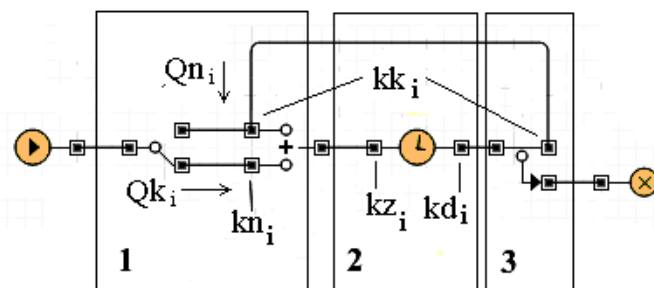


Рис. 1 – Структурная схема модели в представлении AnyLogic

Порция материала, находящаяся в смесителе, поступает в мельницу 2, измельчается в течение некоторого заданного времени, после чего измель-

ченный продукт попадает в классификатор 3. В классификаторе происходит отделение некоего объема готового материала, а недоизмельченный материал вновь поступает в смеситель. В смеситель поступает порция исходного материала, объем которого равен разнице между рабочим объемом мельницы и объемом недоизмельченного материала. Эти два объема смешиваются и вновь поступают в мельницу.

Последовательность выполнения основных операций в технологической схеме может быть представлена упрощенной временной диаграммой, в которой предполагается их последовательное выполнение (в реальности некоторые операции выполняются параллельно).

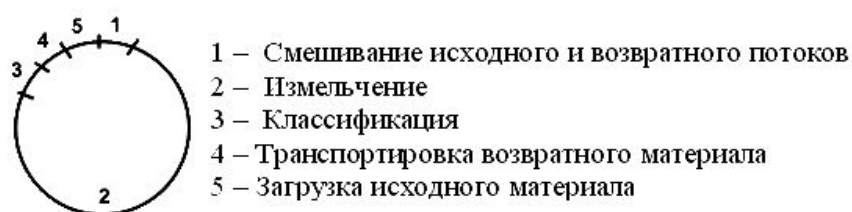


Рис. 2 – Временная схема технологического цикла

В данной модели предполагается, что суммарное время операций 1, 3, 4 и 5 по сравнению с операцией измельчения 2 мало и принимается равным нулю. В этом случае фракционный состав дискретно по времени подвергается изменению только в два момента времени – в момент входа в мельницу и в момент выхода из нее. При этом эти изменения происходят в четырех узлах технологической схемы:

- на входе и выходе из смесителя, в который поступают два потока с различным грансоставом, а выходит поток с усредненным грансоставом;
- в классификаторе, в котором отделяются фракции готовой продукции;
- в мельнице, в которой грансостав изменяется в течение некоторого промежутка времени

Таким образом, фракционный состав материала в модели переменен и определяется коэффициентами $k[x]i$, где $[x]$ индекс участка технологической схемы, где определяется этот коэффициент, i – номер фракции гранулометрического состава смеси. При этом $\sum k[x]i = 1$.

На рис. 1 показаны соответствующие коэффициенты в различных технологических узлах измельчительной установки.

Гранулометрический состав материала поступающего в мельницу определяется зависимостью: $kz_i = (Qn_i \cdot kn_i + Qk_i \cdot kk_i) / \sum (Qn_i + Qk_i)$, где Qn_i ,

Qk_i – расход i -й фракции с питателя и обратной ветви (циркуляционной нагрузки), соответственно; kn_i , kk_i – коэффициенты гранулометрического состава для i фракции, поступающей с питателя и обратной ветви. Гранулометрический состав материала вторичного потока материала, поступающего в мельницу после классификатора (циркулирующая нагрузка) определяется зависимостью: $kk_i = \sum (Qn_i + Qk_i)kd_i / \sum (Qn_i + Qk_i)$

Для построения матрицы измельчения в ячеечной модели используют селективную и распределительную функции измельчения.

Селективная функция измельчения S_i показывает долю i фракции, разрушаемую за единицу времени. Распределительная функция измельчения b_{ii} , показывает вероятность перехода измельченного материала из i_1 -й в i -ую фракцию и задается в виде

$$b(x_0, x) = \frac{1}{x_0}, \quad x > x_{\min}.$$

Матрица измельчения при периодическом измельчении, записанная через функцию измельчения, имеет вид

$$G = \begin{bmatrix} 1 - S_1 \Delta t & 0 & \dots & 0 \\ S_1 b_{21} \Delta t & 1 - S_2 \Delta t & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1 b_{m1} \Delta t & S_2 b_{m2} \Delta t & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

В начальный момент времени при гранулометрический состав сырья задается вектором F^0 .

Тогда гранулометрический состав по ячеечной модели в момент времени $k + 1$ рассчитывается следующим образом

$$F^{k+1} = G F^k. \quad (1)$$

Кинетическое уравнение периодического измельчения (1) позволяет прогнозировать и управлять гранулометрическим составом готового продукта, изменяя время измельчения.

Если фракционный состав материала, входящего в мельницу, задается вектором F_f , а находящийся в мельнице – вектором F , то кинетика процесса

измельчения, описывается рекуррентным матричным равенством

$$F^{k+1} = G (F^k + F_f) . \quad (2)$$

При определении вида селективных функций используется традиционная гипотеза о подводе энергии к фракциям пропорционально их массовому содержанию.

Для построения ячеечной модели измельчения используются методы системной динамики и система моделирования AnyLogic. В таких моделях основной интерес представляют накопители некоторого содержимого и анализ изменения их объемов во времени.

Математической основой методов системной динамики являются дифференциальные модели, в которых используются представления динамических процессов в пространстве состояний.

На рис. 3 показаны эквивалентные представления динамики накопителя.

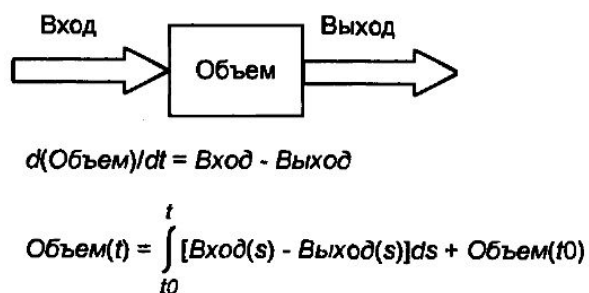


Рис. 3 – Три эквивалентных представления динамики накопителя

В общей структуре моделей системной динамики выделяются две компоненты:

1. Переменные состояния и переменные скорости изменения состояния (соответственно уровни и темпы в терминах системной динамики), определяющие состояние модели, задаются в сети потоков системами разностных уравнений и в описании присутствуют в неявном виде.

2. Переменные структурированного представления функции. С их помощью осуществляется структуризация функциональных зависимостей.

Это основные образы моделируемых процессов в системной динамике.

В качестве сети потоков в модели рассматриваются материальные ингредиенты. Каждая компонента этой сети соответствует какой-то одной совокупности однородных ингредиентов, динамика которых учитывается в модели. Сеть имеет узлы и дуги.

Узлы компонент сети потоков (за исключением нулевого узла) изобра-

жают наиболее существенные состояния выделенных ингредиентов, а дуги сети задают возможные переходы их элементов из одного состояния в другое.

С целью проверки предположения о возможности построения ячеечной модели измельчения методами системной динамики разработан пилотный проект для случая трехфракционной смеси материала подаваемого на струйную измельчительную установку замкнутого типа. Готовым продуктом измельчения принимается четвертая фракция, получаемая в результате измельчения исходной смеси материала. В данной модели принимается, что исходная смесь имеет постоянный фракционный состав и подается в мельницу с постоянной скоростью. Также принимается, что в мельнице происходит следующий процесс измельчения:

- в мельницу одновременно и синхронно поступают массы материалов трех крупных фракций;
- масса материала i -й ($i = 1..3$) фракции поступает в мельницу независимо от других фракций ;
- частицы этой фракции материала, подвергаются разрушению и переходят во фракцию с меньшим размером зерен и при этом не покидают зоны разрушения мельницы в течение некоего времени Δt ;
- через некое заданное время весь материал покидает мельницу;

В модели задается некая распределительная функция измельчения, показывающая вероятность перехода измельченного материала из i -й в j -ую фракцию и некая селективная функция измельчения, которая показывает долю i фракции, разрушаемую за единицу времени;

Цель моделирования: получить зависимость грансостава измельчаемого материала от времени пребывания в струйной мельнице.

Имитационная модель кинетики переходов между фракциями материала внутри мельницы построена по следующему принципу:

1. Имеется 4 накопителя $F1, F2, F3, F4$, имитирующих объем четырех фракций внутри мельницы. В начальный момент времени в накопителях $F1, F2, F3$ находится определенный объем исходного материала трех разных фракций; в накопителе $F4$ материал отсутствует.

2. Также имеется 3 накопителя $F11, F22, F33$ имитирующих объем первых трех фракций внутри мельницы через предельно малое приращение времени – dt .

3. Между накопителями $F1 \rightarrow F11, F2 \rightarrow F22, F3 \rightarrow F33$ определены по-

токи соответствующих фракций материала $F1_F1, F2_F2, F3_F3$. Эти потоки определяют скорость изменения объема соответствующих фракций в мельнице.

4. Между накопителями $F1 \rightarrow F11, F2 \rightarrow F22, F3 \rightarrow F33$ определены потоки соответствующих фракций материала $F1_obr, F2_F1_obr, F3_obr$. Эти потоки определяют циркуляцию соответствующих фракций внутри мельницы.

5. Между накопителями $F1, F2, F3, F4$ также определены потоки измельченного материала:

– поток $F1 \rightarrow F2$ определяет поток второй фракции материала, возникающий в результате измельчения первой фракции за время dt ;

– поток $F1 \rightarrow F3$ определяет поток третьей фракции материала, возникающий в результате измельчения первой фракции за время dt ;

– поток $F1 \rightarrow F4$ определяет поток четвертой фракции материала, возникающий в результате измельчения первой фракции за время dt ;

– поток $F2 \rightarrow F3$ определяет поток третьей фракции материала, возникающий в результате измельчения второй фракции за время dt ;

– поток $F2 \rightarrow F4$ определяет поток четвертой фракции материала, возникающий в результате измельчения второй фракции за время dt ;

– поток $F3 \rightarrow F4$ определяет поток четвертой фракции материала, возникающий в результате измельчения третьей фракции за время dt ;

Значение накопителей $F1, F2, F3$ и $F4$ в каждый момент времени вычисляется в соответствии с дифференциальными уравнениями, правые часть которого составлена следующим образом:

$$d(F1)/dt = -k11*F11 - k12*F1_F2 - k13*F1_F3 - k14*F1_F4$$

$$d(F2)/dt = k12*F1 - k22*F22 - k23*F2_F3 - k24*F2_F4$$

$$d(F3)/dt = k13*F1 - k23*F2_F3 - k33*F33 - k34*F3_F4$$

$$d(F4)/dt = F1_F4 + F2_F4 + F3_F4$$

Решение этих дифференциальных уравнений осуществляется численным методом Эйлера с начальным значением $dt = 1$ мсек.

Значение коэффициентов k , определяющих изменения грансостава, в общем случае зависят от многих параметров, в том числе времени измельчения, и могут быть определены только экспериментальным путем. В данной

модели они определены только как функция от соответствующих накопителей и вычисляются долей от соответствующих накопителей.

На рисунке 4 показано окно презентации модели, в котором отображена модель кинетики измельчения материала в терминах системной динамики и временной график, отображающий зависимости изменения грансостава и суммарной производительности по готовому продукту от времени.

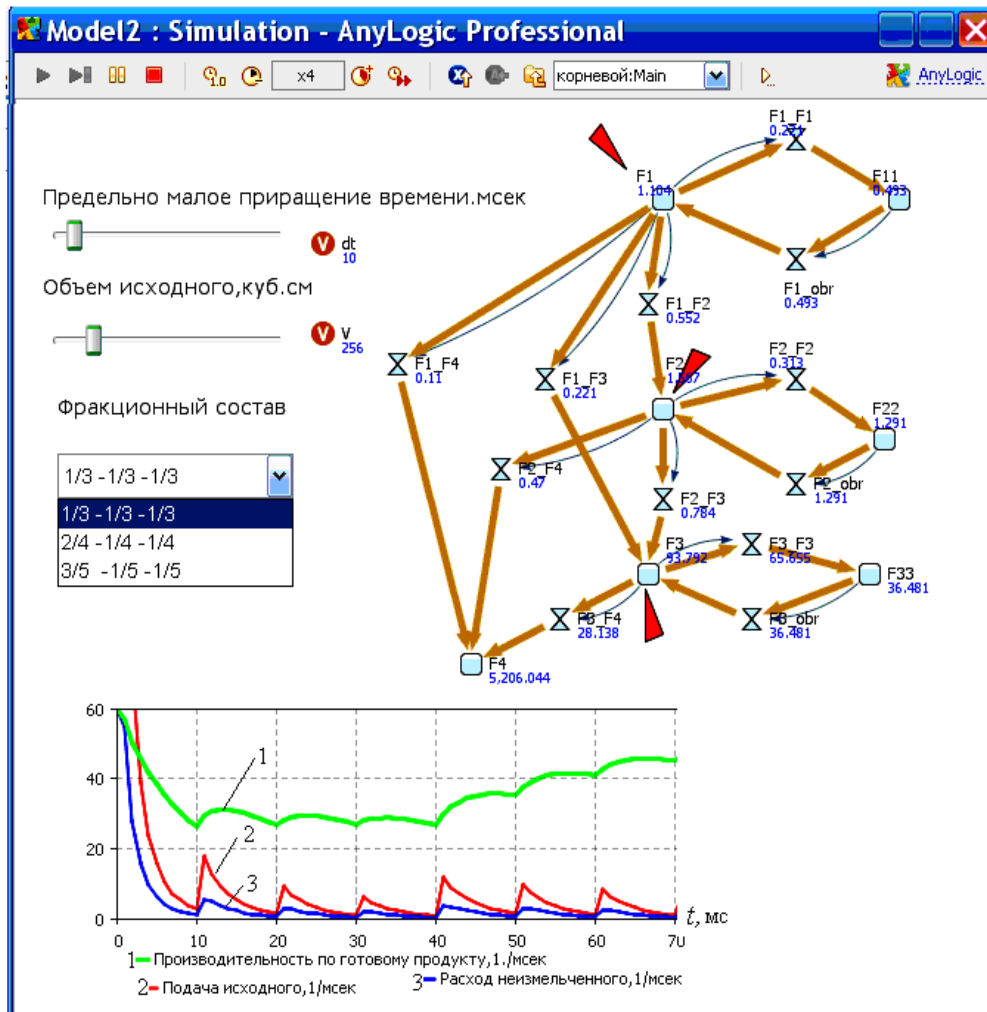


Рис. 4 – Окно презентации динамической модели

Модельные эксперименты показали, что производительность по готовому классу (кривая 1) зависит от грансостава исходного материала и режима подачи материала. При дискретной (порционной) оптимальной загрузке попольной камеры производительность измельчения растет (см. рис. 4 кривая 1 при $t = 40 - 70$ мс). Увеличение крупности исходного материала (поток первой фракции) вызывает увеличение времени измельчения. Повышение требуемой дисперсности измельченного продукта (4 фракция) влечет за собой также увеличение времени измельчения.

Выводы. Исследования показали возможность адекватного описания процесса измельчения в замкнутой системе на основе комплексного моделирования всей системы измельчения и динамического моделирования кинетики измельчения фракций материала в помольной камере. На основе динамического моделирования кинетики измельчения материала в помольной камере определяется время измельчения для заданного выхода контрольного класса. Полученное время измельчения является связующим параметром двух моделей измельчения.

Список литературы: 1. *Прядко Н.С.* Имитационная модель замкнутого цикла измельчения минерального сырья / *Н.С. Прядко, Г.М. Саксонов, Е.В. Терновая* // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 3. – С. 19 – 25. 2. *Карпов Ю.Г.* Имитационное моделирование систем. Введение и моделирование с AnyLogic 5 / *Ю.Г. Карпов.* – С-Пб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с. 3. *Пеньков В.Б.* Кинетика процесса измельчения дисперсных частиц / *В.Б. Пеньков, Н.В. Ведерников* // ДАН СССР. – 1989. – Т. 307, № 2. – С. 401 – 405. 4. *Смирнов С.Ф.* Разработка научных основ процессов формирования фракционных массопотоков в технологических системах измельчения: автореф. дисс. на соискание учен. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» / *С.Ф. Смирнов.* – Ярославль, 2009. – 35 с.

Referens: 1. *Prjadko N.S.* Imitacionnaja model' zamknutogo cikla izmel'chenija mineral'nogo syr'ja / *N.S. Prjadko, G.M. Saksonov, E.V. Ternovaja* // Sistemnye tehnologii. Regional'nyj mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov. – Dnepropetrovsk, 2014. – Vyp. 3. – S. 19 – 25. 2. *Karpov Ju.G.* Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie i modelirovanie s AnyLogic 5 / *Karpov Ju.G.* – St.-Peterburg: BHV-Peterburg, 2005. – 400 s. 3. *Pen'kov V.B.* Kinetika processa izmel'chenija dispersnyh chastic / *V.B. Pen'kov, N.V. Vedernikov* // DAN SSSR. – 1989. – Vol. 307, № 2. – S. 401 – 405. 4. *Smirnov S.F.* Razrabotka nauchnyh osnov processov formirovanija frakcionnyh massopotokov v tehnologicheskikh sistemah izmel'chenija: avtoref. diss. na soiskanie uchen. stepeni d-ra tehn. nauk: spec. 05.02.13 «Mashiny, agregaty i processy» / *S.F. Smirnov.* – Jaroslavl', 2009. – 35 s.

Поступила в редколлегию (Received by the editorial board) 30.09.14

УДК 622.73

Имитационная модель кинетики тонкого измельчения материалов / Н.С. ПРЯДКО, Г.М. САКСОНОВ, Е.В. ТЕРНОВАЯ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 53 (1095). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 89 – 98. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0821.

З огляду на високу енергоємність тонкого подрібнення, необхідно розробити умови досягнення оптимального рівня продуктивності млинів тонкого млива при дотриманні необхідного виходу продукту контрольного класу й зниженні енергоємності процесу. На базі системи програмування AnyLogic розроблено комплекс двох моделей, які описують технологію замкнутого циклу тонкого подрібнення матеріалів, що включає дискретно-подійний підхід до імітаційного моделювання всього технологічного процесу подрібнення та динамічне моделювання кінетики фракційного складу матеріалу в помольній камері млина

Ключеві слова: замкнутий цикл, тонке подрібнення, динамічне моделювання, фракційний склад

Imitating kinetics model of material fine grinding / N.S. PRYADKO, G.M. SAKSONOV, E.V. TERNOVAYA // Visnyk NTU «KhPI». – 2014. – № 53 (1095). – (Series: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ecolohiya). – P. 89 – 98. – Bibliogr.: 5 names. – ISSN 2079-0821.

Taking into account high power consumption of thin grinding, it is necessary to develop achievement conditions of mill optimum productivity level of a thin grinding at observance of a necessary output of a control class product and process power consumption decrease. On the basis of programming system AnyLogic the complex of two models describing technology of the closed cycle of fine grinding of materials, the approach including discretely – events for imitating modeling all technological grinding process and dynamic modeling of material fractional structure kinetics in the mill chamber is developed.

Key words: closed cycle, fine grinding, dynamic modeling, breakup

УДК 681.5:004.896

А.Н. РАССОХА, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»,
А.А. СЕНДЕРОВ, вед. научн. сот. ГосНИИ «УкрНДИЦемент», Харьков,
И.В. ДМИТРЕНКО, директор ГосНИИ «УкрНДИЦемент» Харьков

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЦЕМЕНТНО-СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Рассматриваются вопросы современной технологии обучения специалистов, по приготовлению цементно-сырьевых смесей заданного состава. Базой для этого является компьютерный тренажёр на основе имитационной модели технологического процесса приготовления цементно-сырьевых смесей. Это позволяет отрабатывать моторно-рефлекторные навыки и реакции обучаемых технологов на штатные и нештатные ситуации, тем самым, повышать квалификацию этих специалистов.

Ключевые слова: цементно-сырьевая смесь, технология, математическая модель, компьютерная имитационная модель, учебный процесс, компьютерный тренажёр, интерфейс, операторы-технологи.

Современные нефтехимические комплексы, энергетические предприятия (АЭС, ТЭЦ, ГЭС), цементные заводы, горнорудные и обогатительные предприятия представляют собой объекты повышенной опасности. Это связано со стохастической природой используемого сырья, промежуточных и конечных продуктов. Такая особенность накладывает на инженерно-технический персонал определенную ответственность, т.е. необходимость принимать решения в реальном времени (онлайн), зачастую в экстремальных