



АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Н. С. ПРЯДКО, канд. техн. наук (Ин-т технической механики НАН и ГКА Украины)

Проведен анализ особенностей применения акустико-эмиссионной диагностики к процессу струйного измельчения сыпучих материалов. Выявлены основные информативные параметры, взаимосвязь акустических и технологических параметров. Предложены пути контроля и оптимизации процесса измельчения на основе информационной технологии.

The analysis of specific application of acoustic mission diagnostics for jet crushing process of loose materials is carried out. The basic informative parameters, interrelation of acoustic and technological parameters are revealed. Ways of the crushing process control and optimization are offered on the basis of informational technology.

Разрушение частиц в процессе струйного измельчения сыпучего материала можно представить как преобразование случайных микроповреждений в некоторый регулярный процесс. Для этого необходимо рассматривать взаимосвязь моделей двух уровней: микроуровня (микроповреждение), на котором разрушение связей между элементами материала носит стохастический характер, и макроуровня (измельчение материала), определяющего процесс измельчения частиц в потоке энергоносителя.

Исследования процесса микроразрушения материала сжатием и другими видами нагружения [1–4] показали, что одним из наиболее чувствительных эффектов, характеризующих микроповреждение, является эффект акустической эмиссии (АЭ). Он связан с излучением упругих волн твердым телом вследствие внутренней динамической перестройки его структуры. Отмечено, что закономерности АЭ наблюдаются при различных видах повреждений: от образования микротрещин при одноосных нагружениях образцов, разрыве волокон композитных материалов до сдвига пласт земной коры и землетрясений [3, 5, 6].

Процесс измельчения в противоточных струях мельницы является особым видом разрушения материала. Главное отличие — в способе воздействия на частицы. Околосвуковыми струями энергоносителя (газа) частицы захватываются и выносятся через эжектируемое устройство в помольную камеру навстречу друг другу. Более подробно этот процесс рассмотрен в работе [7]. При столкновении частицы накачиваются энергией от энергоносителя, подвергаются удару, и, наконец, диспергируют. При этом аппаратура фиксирует акустические сигналы. Диспергирование является завершающим актом разрушения. В его эффектах проявляются все детали механизма разрушения, включая образование и развитие трещин.

Цель данной работы — исследовать особенности применения АЭ метода для контроля и оп-

тимизации процесса струйного измельчения сыпучих материалов.

Согласно модели деформируемого твердого тела [8] предразрушающее состояние включает три стадии: стационарную — квазипериодические релаксационные (разрывные) колебания, ускоренную — стохастические автоколебания и третью неустойчивую — авторезонансные колебания. Соотношения между длительностями стадий выглядят как $t_1:t_{11}:t_{111} = 1:10^{-3}:(10^{-3} \dots 10^{-6})$, продолжительность стационарной стадии примерно на три порядка превышает общую продолжительность двух других стадий [9].

Применительно к процессу струйного измельчения первая стационарная стадия (макродвижение) включает загрузку струй материалом, накачку энергией частиц в ходе продвижения двухфазного потока (газа и твердых частиц) в помольную камеру. В результате столкновения в зоне измельчения частицы переходят на вторую стадию разрушения, а затем наступает третья стадия, в результате которой происходит диспергирование частиц. По современным представлениям диспергирование — это процесс разделения деформируемого твердого тела на изолированные участки в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры по достижении критического (предельного) состояния вещества на неустойчивой авторезонансной стадии предразрушения под действием акустических волн, возникающих при автоколебательном движении атомов в этих зонах. Частицы разрушаются в зоне измельчения полностью до необходимых размеров, удаляются после классификации в циклон готового продукта или разрушаются частично, тогда они поступают после классификации на повторное измельчение. Из авторезонансной модели диспергирования следует, что информацию об энергетике процесса несет запредельная стадия деформирования и разрушения, в частности, стадия саморазрушения, протекающая со скоростью авторезонанса. В этой связи



стадия запредельного деформирования представляется в виде трех составляющих: 1) разрушение с микродиспергированием; 2) саморазрушение с быстрой разгрузкой напряжений и макродиспергированием; 3) разрушение с пластическим деформированием и дроблением.

Первую стадию струйного измельчения можно рассматривать на основе стохастического подхода, процесс перемещения частиц в помольной камере тогда представляется как случайное блуждание при диффузии и броуновском движении [10]. Вторая и третья стадии разрушения частиц при газоструйном измельчении являются микро-разрушениями, которые необходимо рассматривать с позиций кинетической теории разрушения твердых тел, основы которой сформулированы в работах С. Н. Журкова и др. [11].

Метод АЭ как средство АЭ мониторинга может служить основой исследования разрушения материалов при газоструйном измельчении. Но для этого необходимо определить взаимосвязь акустических параметров, АЭ-критериев и режимов, технологических параметров процесса.

Основные параметры АЭ (ГОСТ 27655–88) — это число импульсов за время наблюдения N_x и активность N_p , равная количеству импульсов за некоторый интервал наблюдения (обычно 0,1 с или 1 с). Фактически регистрируют не все импульсы АЭ, а лишь превышающие некоторый порог N_{min} . Тогда параметры эмиссии обозначают: суммарный счет N и скорость счета N . Для характеристики процесса важно не только количество импульсов, но и их амплитуда. В результате экспериментальных исследований [12–15] были выявлены информативные параметры АЭ мониторинга процесса измельчения:

- число импульсов АЭ за весь период наблюдения. Этот критерий отражает степень измельчения, однако он несет информацию только в случае одного вида разрушения, что не соответствует процессу струйного измельчения;

- число импульсов на отдельных участках процесса измельчения. Эта характеристика наиболее подходящая для описания процесса, однако для удобства обращения с массивами данных необходимо рассматривать небольшие участки. В этом случае есть вероятность пропустить какую-то особенность процесса в момент записи файла данных;

- распределение сигналов АЭ по амплитуде. Это наиболее изученная характеристика сигналов акустического мониторинга процесса измельчения [12–14]. Было установлено, что величина амплитуды АС изменяется в зависимости от крупности частиц, содержащихся в струе, и от технологической стадии измельчения (загрузка струй материалом, рабочий режим измельчения, разгрузка мельницы), причем на стадии загрузки сред-

няя и максимальная величина амплитуд отличается на порядок, тогда как в рабочем режиме и на стадии разгрузки это различие уменьшается до двух-трех раз;

- активность АЭ, т. е. отношение числа импульсов АЭ к интервалу времени наблюдения. Повышение уровня акустической активности зоны помола ($\lg N$ от 4 до 5,5) на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц и, следовательно, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы.

Испытания проводили на экспериментальных стендах «УСИ-20», «УСИ-02», включающих мельницы типоразмера 20 и 2 кг/ч, соответственно. Эти установки включали бункер загрузки, струйную мельницу, классификатор, циклон, систему подачи и очистки энергоносителя (воздуха), бункер для готового продукта. Для проведения акустико-эмиссионного мониторинга разработана аппаратная система с волноводами, пьезокерамическими широкополосными датчиками, установленными внутри мельницы и в трубопроводе на выходе из классификатора, аналого-цифровым преобразователем, связанным с компьютером (рис. 1, 2).

Исходя из физической сути процесса струйного измельчения были выделены и изучены четыре режима. Начало загрузки струй материалом характеризует режим 1, в котором ускорение частиц и их взаимные соударения происходят в условиях высокой концентрации частиц твердой фазы в струе и при относительно низких скоростях разрушения (механизм динамического истирания). По мере удаления частиц из газозвеси (через систему классификации в циклон и фильтр) уменьшается насыщенность струй твердой фазой, измель-

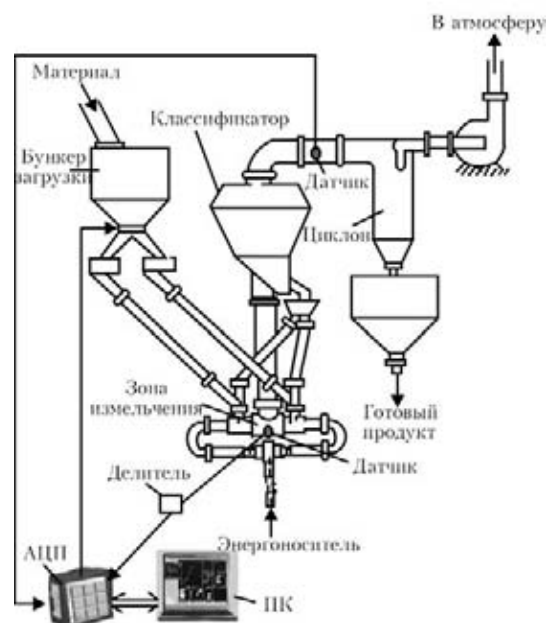


Рис. 1. Схема измельчительной установки



Рис. 2. Лабораторная установка УСИ-20 с АЭ мониторингом производительностью 20 кг/ч

чение становится устойчивым и более эффективным за счет перехода к оптимальным концентрациям и более высокой скорости разрушения частиц (механизм высокоскоростного удара). Это оптимальный рабочий режим 2. Далее, если не производится подача материала в струю, процесс переходит в режим разгрузки — режим 3 с сохраняющейся достаточно высокой скоростью разрушения частиц ударами, но недостаточной концентрацией твердой фазы. В этом режиме измельчение происходит уже недостаточно эффективно из-за пониженной вероятности встречных ударов частиц в зоне помола. В процессе измельчения возможен режим 4 — режим перегрузки струй материалом, за которым может наступить «завал» помольной камеры в результате уменьшения относительной скорости разгона и разрушения частиц. В этом режиме наблюдается резкое снижение эффективности измельчения и производительности мельницы.

Исследования позволили установить связь акустических параметров с режимами измельчения. Изменение режима струйного измельчения, включая подачу в струю материала, различные состояния струй по содержанию твердой фазы и динамичности разрушения частиц, обуславливают изменения амплитудных распределений и активность акустических сигналов в зоне помола. Этот факт может служить основой управления процессом измельчения и достижения оптимального ре-

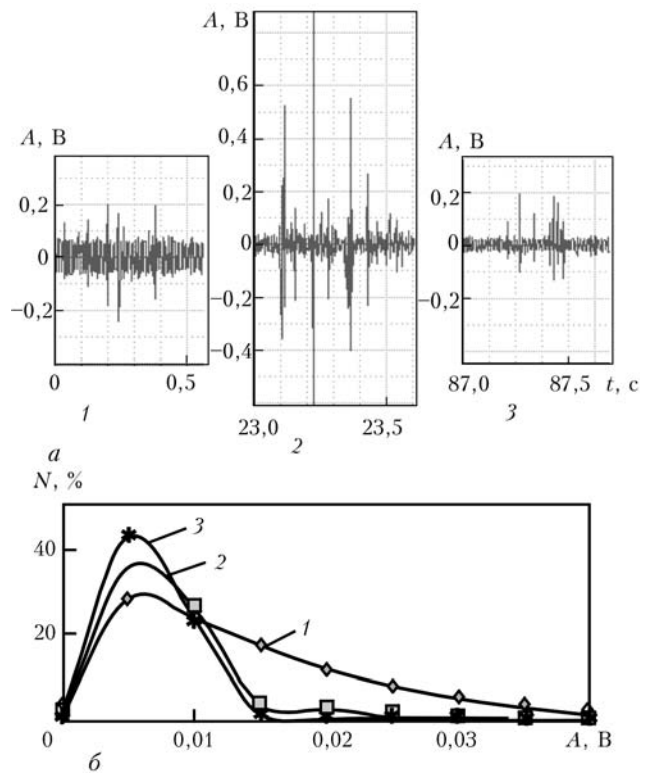


Рис. 3. Кинетика амплитуд (а) и активности (б) акустических сигналов в зоне измельчения на различных стадиях процесса (1 — загрузка; 2 — рабочий режим; 3 — разгрузка)

жима, т. е. оптимальной загрузки струй материалом. На рис. 3 показаны акустические сигналы и их активность, записанные на различных стадиях измельчения цирконового концентрата при давлении энергоносителя $P = 0,3$ МПа, режиме классификации (числе оборотов ротора классификатора) $n = 2000$ мин⁻¹.

Признаком возрастающего эффекта диспергирования при прочих равных условиях является увеличение доли малоамплитудных АС (менее 40 мВ) в измеряемом числе АС (рис. 4).

На рис. 4 прослеживается корреляционная полулогарифмическая связь дисперсности $S_{уд}$ продуктов струйного измельчения и активности N (A_{40}) появления акустических сигналов с амплитудой менее 40 мВ. Чем выше эффект диспергирования, тем весомее доля малоамплитудных АС. В частности, рост $S_{уд}$ примерно от 2000 до

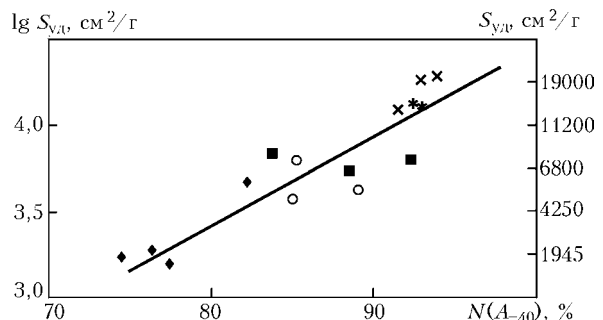


Рис. 4. Связь параметра дисперсности $S_{уд}$ продукта и доли N (A_{40}) малоамплитудных сигналов (менее 40 мВ)

19000 см²/г приводит к увеличению $\dot{N}(A_{40})$ от 75 до 94 %.

На рис. 5 показано изменение счета АС за одну секунду в зависимости от величины амплитуды сигналов при получении продуктов различной удельной поверхности в диапазоне от 2000 до 19000 см²/г (1, 2 — шамот с разной удельной поверхностью: $S_{уд}^1 = 1724$ см²/г, $S_{уд}^2 = 4850$ см²/г; 3 — газовый уголь, $S_{уд} = 18827$ см²/г)

Из рисунка видно преимущественное накопление амплитуд весьма малой величины — менее 0,04 В. При получении порошков более высокой дисперсности ($S_{уд} > 5000$ см²/г) наблюдается практически полное исчезновение сигналов с амплитудой выше 0,08...0,1 В. Эта закономерность может стать акустическим признаком достижения необходимой дисперсности продукта измельчения и критерием управления качеством измельченного продукта.

К перечисленным параметрам АЭ следует отнести относительные АЭ-критерии, которые связаны с процессом измельчения. Критерием оценки соответствия процесса оптимальным условиям измельчения может служить условный коэффициент эффективности $K_3 = Q/\lg N$ (г/имп), характеризующий отношение производительности G мельницы к соответствующей активности (в виде логарифма) N АЭ в зоне помола (рис. 6). В рабочих режимах струйной мельницы ($Q = 1,6...5,5$ г/с) величина K_3 изменяется в пределах 0,3...1,5. Изменение Q для одного и того же материала обусловлено отклонением насыщенности струй твердой фазой от оптимального уровня. Экспериментальными исследованиями установлено [16], что величина K_3 связана обратно пропорциональной зависимостью с показателем $\lg N$ степени активности АЭ для процесса измельчения.

Критерием, связывающим производительность и акустические параметры, является коэффициент циркуляции, определяемый как $K_{ц} \approx N/N_{загр}$. Экспериментальные исследования показали, что максимальная производительность мельницы

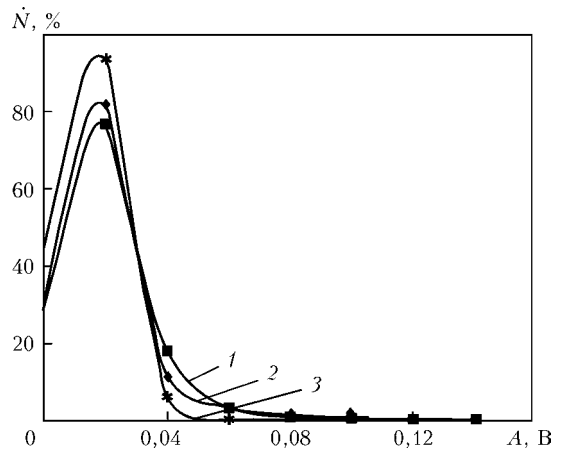


Рис. 5. Активность и амплитуда АС рабочей зоны струйной мельницы при получении порошков различной удельной поверхности (обозначения 1–3 см. в тексте)

обеспечивается в условиях приближения величины коэффициента циркуляции материала к единице. В двух других граничных состояниях загрузки струй этот коэффициент значительно меньше единицы (разгрузка) и при неоптимальных режимах (перегрузка, загрузка) величина коэффициента порядка 2 (см. рис. 7, д).

Таким образом, основу АЭ мониторинга струйной мельницы составляет закономерность изменения акустической активности и амплитуды АС в зависимости от технологических показателей количества и качества измельченного продукта, т. е. $F(A, N) = f(G, S_{уд}, K_3, K_{ц})$. Схематически поведение основных информативных параметров показано на рис. 7.

Процесс рассматривался при постоянных параметрах энергоносителя ($P = 0,3$ МПа) и режима классификации ($n = 600$ мин⁻¹). Режимы, характеризующие различные состояния загрузки струй материалом обозначены следующими интервалами: $t_1 t_2$ — загрузка материала массой m_1 и выход на рабочий режим измельчения; $t_2 t_3$ — оптимальный режим измельчения с наилучшей производительностью (в период $t_{эф}$); $t_3 t_4$ — загрузка материала массой $m_2 > m_1$ с некоторой перегрузкой

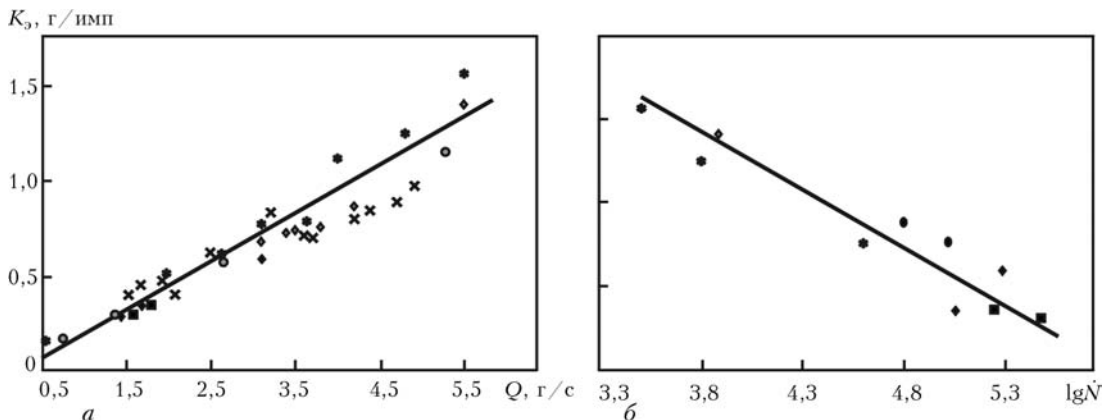


Рис. 6. Зависимость показателя акустической эффективности K_3 струйного измельчения от производительности Q (а) и активности АС (б)

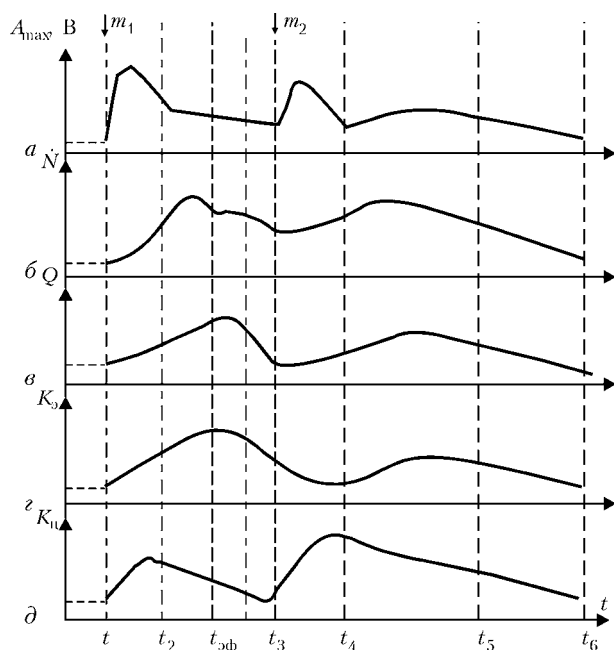


Рис. 7. Схематическое изображение информативных акустических и технологических параметров процесса струйного измельчения (описание *a–d* см. в тексте)

струй; t_4t_5 — рабочий режим; t_5t_6 — разгрузка струй.

Полученные коэффициенты K_3 и $K_{ц}$ (рис. 7, *z*, *d*) отражают разные аспекты (эффективность и кратность циркуляции) процесса измельчения. Эксперименты показали, что величина K_3 должна быть больше 0,4 для исключения неэффективной работы мельницы. В оптимальном режиме измельчения показатель K_3 достигает 0,8...0,9 (для шамота, см. рис. 7, *в*, *z*). Коэффициент циркуляции зависит от степени наполнения струй материалом. В условиях оптимальной работы мельницы этот коэффициент является величиной порядка единицы, тогда как в условиях переполнения струй составляет величину порядка 2-4, а при их чрезмерной разгрузке — меньше 1 (рис. 7, *d*).

В ходе экспериментальных исследований собрана база данных (БД) основных эталонных характеристик процесса струйного измельчения различных материалов. Далее материалы были обработаны, занесены в специальную БД в виде, пригодном для использования в технологии нейронных сетей. Состояние системы струйного измельчения описывается изменением не отдельных параметров, а вектором состояния, включающим информативные параметры процесса. Так, в БД внесены давление P и температура T энергоносителя, число оборотов n двигателя классификатора, плотность ρ материала, исходная крупность d_0 материала, усредненная крупность полученного материала d и акустические параметры мониторинга процесса — амплитуда A , частота ω , активность N акустических сигналов. При этом сле-

дует отметить, что некоторые параметры типа α , β задаются заранее для группы материалов, другие параметры (P , n , T) — технологические условия измельчения связаны с требуемыми техническими условиями измельчения. Таким образом, вектор состояния процесса струйного измельчения может быть представлен в виде $\vec{X} = \{P, T, n, \alpha, \beta, Q, A, N, \omega\}$.

Используя созданную БД параметров состояния проведено математическое моделирование процесса на базе нейронной сети вида множественной логистической регрессии [17]. Для обучения нейронной сети использовали метод обратного распространения погрешности. Система была обучена и протестирована на селективной выборке процесса струйного измельчения, оценку адекватности модели проводили с помощью ROC-анализа.

На основе результатов АЭ мониторинга и нейросетевого моделирования разработана информационная технология процесса струйного измельчения. Для ее создания использовался комплексный подход, включающий несколько этапов: формирование БД и баз знаний, планирование и подготовка акустического мониторинга, интеллектуальный анализ результатов, выбор стратегии измельчения. Общий вид информационной технологии струйного измельчения представлен на рис. 8.

Информационная технология струйного измельчения является интеллектуальной системой оценки состояния процесса со всеми необходимыми функциями [18]. В рамках непрерывного АЭ мониторинга реализуется измерение, обработка текущих акустических параметров процесса, сравнение с эталонными параметрами из БД, диагностика состояния процесса и возможных путей продолжения процесса, выбор оптимального варианта и принятие решения. На последнем этапе осуществляется анализ результатов, на основе которого выдаются рекомендации по дальнейшему ходу процесса измельчения — продолжать измельчение, добавлять материал в струи, корректировать параметры измельчения или полностью прекращать процесс. Эффективность применения нейросетевой технологии заключается не только в качественной первичной обработке данных АЭ мониторинга, выделении сигналов из шума [19], но и в способности распознать, классифицировать новые сигналы, принимаемые датчиком. Обученная нейронная сеть, сохраняя все сведения БД об информативных параметрах струйного измельчения и их взаимосвязи, может правильно идентифицировать состояние процесса на основе экспериментальных данных АЭ мониторинга и выбрать оптимальное решение.

Вывод

Проведенные исследования процесса струйного измельчения на основе АЭ мониторинга позволили

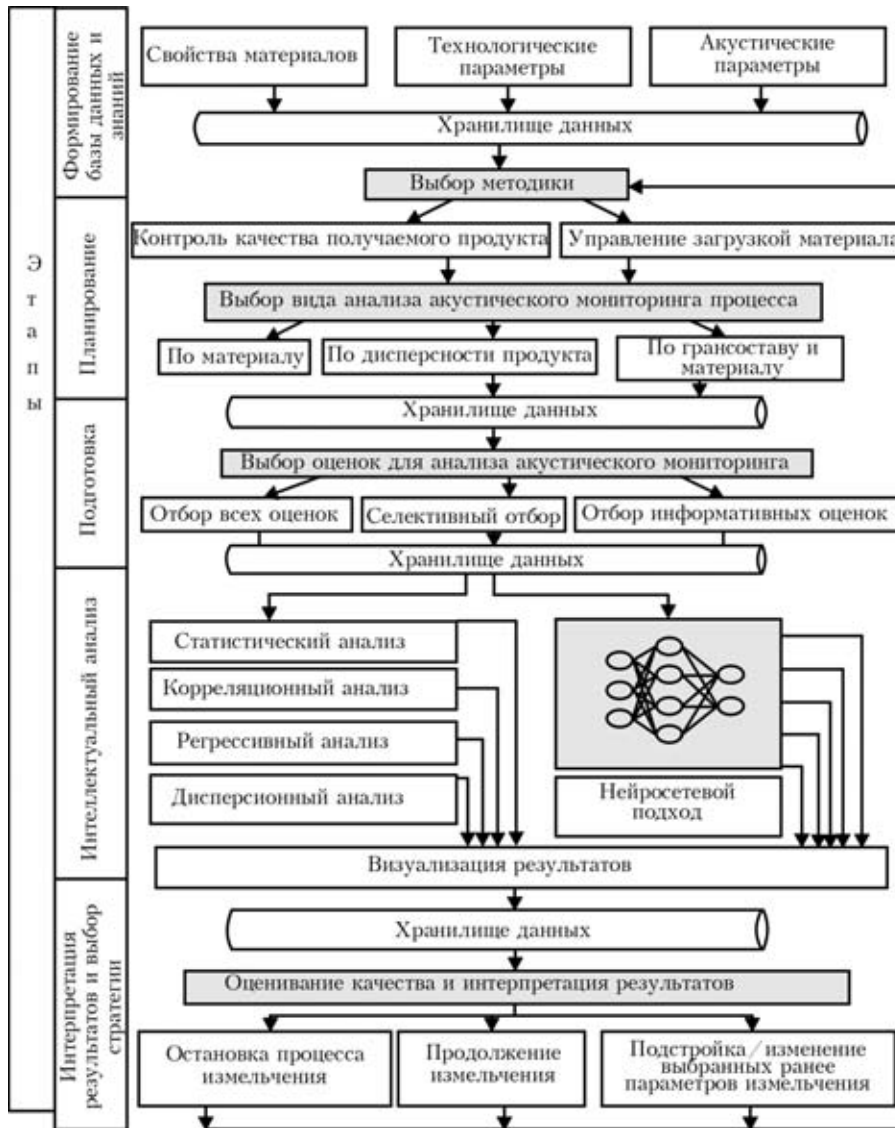


Рис. 8. Информационная технология струйного измельчения

установить связь технологических и акустических параметров процесса, прогнозировать процесс измельчения и управлять его режимами.

Разрабатываемая информационная технология сочетает в себе большой объем экспериментальных данных измельчения различных материалов, преимущества АЭ диагностики процесса, позитивные качества интеллектуального анализа результатов исследования на основе нейросетевого моделирования, а также позволяет совершенствовать методику АЭ мониторинга и принимать решения по повышению эффективности и качества струйного измельчения.

1. Горобец Л. Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / НГУД. — 2004. — 35 с.
2. Трипалин А. С., Буйнов С. И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты / Изд-во Ростовского ун-та, 1986. — 160 с.
3. Булат А. Ф., Хохолов В. К. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 168 с.

4. Пиллов П. И., Горобец Л. Ж. Дискретность разрушения при измельчении руд // ГИАБ. — 2006. — № 11. — С. 357–363.
5. Кинетика и иерархия процесса накопления трещин в гетерогенных материалах. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Под ред. А. В. Леонтьева. — Новосибирск: Ин-т горного дела, 2004. — С. 373–377.
6. Гейликман М. Б., Писаренко В. Ф. О самоподобии в геофизических явлениях. Дискретные свойства геофизической среды / Под ред. М. А. Садовского. — М.: Наука, 1989. — С. 109–131.
7. Об износе разгонных трубок при газоструйном измельчении / Н. Д. Коваленко, Г. А. Стрельников, В. А. Грушко и др. // Техн. механика. — 2009. — № 4. — С. 94–110.
8. Бовенко В. Н., Горобец Л. Ж., Прядко Н. С. О физических критериях разрушения и диспергирования // Вісн. нац. техн. ун-та «ХПІ». — Харьков, 2007. — Вип. № 26. — С. 148–153.
9. Бовенко В. Н., Старцев В. М. Полимерные стекла: новые методологический и методический подходы к описанию и прогнозированию прочностных свойств // Физика и химия стекла. — 1999. — 25, № 1. — С. 107–115.
10. Прядко Н. С. Стохастическая модель газодинамического измельчения // Техн. механика. — 2008. — № 1. — С. 121–131.
11. О прогнозировании разрушения горных пород / С. Н. Журков, В. С. Куксенко, В. А. Петров и др. // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1977. — № 6. — С. 11–18.



12. *Исследование* связи акустических и технологических параметров процесса струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, И. В. Верхоробина // Вест. НТУ «ХПИ». — 2006. — № 30. — С. 16–21.
13. *Интенсификация* процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров // Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом // ЗКК. — 2008. — № 34(75). — С. 67–74.
14. *Акустические* и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице // П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко // Изв. вузов. Горный журнал. — 2009. — № 4. — С. 15–121.
15. *Интенсификация* процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Н. И. Соболевская // Вибрации в технике и технологиях. — 2009. — № 2(54). — С. 15–19.
16. *О критериях* акустического мониторинга струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Б. Ф. Бевзенко // Техн. механика. — 2009. — № 3. — С. 116–121.
17. *Информационная* технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением / Н. С. Прядко, Т. М. Буланая, Л. Ж. Горобец и др. // Системные технологии: региональный межвузовский сб. науч. тр. — 2010. — Вып. 3(58). — С. 40–46.
18. *Опыт* ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в области акустико-эмиссионного контроля / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль — 2012. — № 1. — С. 7–22.
19. *Єременко В. С., Переїденко А. В., Монченко О. В.* Застосування нейромережевих технологій у системах неруйнівного контролю // Те саме. — 2012. — № 1. — С. 35–41.

Поступила в редакцию
03.04.2012

IC-MINDT-2013 Materials Integrated Non Destructive Testing - 2013

5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NDT OF HSNT
20–22 May, 2013
ATHENS – Greece
IC-MINDT-2013

NEW ABSTRACT SUBMISSION DEADLINES!!!

The 5th International Conference on NDT of HSNT (IC-MINDT-2013) will be held from May 20-22, 2013 in Athens, Greece. The conference will continue the excellent tradition of gathering world-class researchers, engineers and educators engaged in the fields of Non Destructive Testing to meet and present their latest activities. You are cordially invited to attend this interesting event.

In the last few weeks further progress was achieved in the organization of IC-MINDT-2013. Considering the increasing interest in the meeting and the requests to extend the deadline, we set the new deadline for abstract submission for October 20, 2012. You can find details about submission and generally about the conference on our website at www.hsnt.gr/IC-MINDT-2013/. If you need additional information, do not hesitate to contact us. We hope to see you in Athens.

СВАРКА КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

4–6 декабря 2012

4 декабря — **Научно-техническая конференция «Сварка и Диагностика»**

Екатеринбург, МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»