

ческие нагрузки на крепь, а наличие единого потока исключает за-
сечение угля со стороны кровли.

Таким образом, механизиро-

ванная крепь с выпуском угля по-
зволяет осуществить полный, при-
нудительный управляемый выпуск
угля из подкровельной (межслое-

вой) толщи и при этом обеспечить
безопасную и эффективную рабо-
ту очистного забоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагинов А.С., Жетесов С.С. Совершенствование технологии выемки мощных пологих угольных пластов. – Алма-Ата; Казакстан, 1981. – 23 с.
2. Саламатин А.Г. Подземная разработка мощных пологих угольных пластов. – М.: Недра, 1997. – 407 с.
3. Шундулиди И.А., Марков А.С., Калинин С.И., Егоров П.В. Выбор параметров технологии отработки мощных

пологих пластов с выпуском межслоевых и подкровельных пачек угля. – Кемерово: Кемеровское отделение Академии наук, 1999. – 258 с.

4. Механика горных пород и механизированные крепи. Отв. Ред.: академик Е.И. Шемякин, член-корр. Ван Л. Капкой. Институт горного дела СО АН СССР. 1985

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Клишин Владимир Иванович – доктор технических наук, зам. директора по науке, Институт горного дела СО РАН.

Власов Владимир Никифорович – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, Институт горного дела СО РАН.

Кубанычбек уулу Бакыт – аспирант, Институт горного дела СО РАН.

© В.П. Кондрахин, А.И. Хиценко, 2003

УДК 622.232.7

В.П. Кондрахин, А.И. Хиценко

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Изучение закономерностей формирования усилий и гранулометрического состава продуктов при резании угля и горных пород необходимо для исследования и оптимизации рабочих процессов породоразрушающих машин. В настоящее время достаточно полно разработаны вопросы имитационного моделирования нагрузок на рабочих инструментах при выемке угля очистными комбайнами. Следует подчеркнуть, что вполне решенной можно считать только задачу моделирования средних нагрузок при резании углей и горных пород. Вопросы измельчения угля при резании также исследованы достаточно полно, в то время как для других полезных ископаемых и горных пород закономерности измельчения при резании исследованы недостаточно.

Для широкого распространения методов имитационного моделирования в практику исследования и проектирования породоразрушающих машин необходимо разработать достаточно общую и простую модель формирования динамических составляющих нагрузок на их рабочих инструментах при резании широкого класса горных пород и полезных ископаемых. Модель должна содержать минимальное количество параметров, требующих экспериментального определения или идентификации.

Предлагаемая математическая модель процесса резания позволяет определить мгновенные значения усилий резания и подачи, а также гранулометрический

состав продукта резания. При резании пород боковым усилием можно пренебречь, так как в большинстве случаев оно мало по сравнению с усилиями резания и подачи. При резании угля не моделируются для определения средних значений бокового усилия затруднительно ввиду отсутствия его корреляции с усилием резания. Разработанная модель процесса резания основана на представлении процесса в виде потока случайных событий – единичных актов разрушения (сколов). Данная модель имеет малое число параметров, что позволяет ее использовать для широкого класса пород, для которых определение параметров математической модели весьма затруднительно. Учет сопротивляемости пласта резанию, изменения геометрических параметров реза в процессе резания, а также других факторов, влияющих на формирование нагрузки на реза комбайна, производится косвенным путем через деление средних усилий резания и подачи в соответствии с ГОСТ 12.44.197–83.

При моделировании процесса резания по предлагаемой модели усилие резания на реза в каждый момент времени определяется как сумма усилий, формируемых в каждом i -том единичном акте разрушения:

$$Z(t) = \sum_{i=N_1}^{N_2} Z_i,$$

где N_1, N_2 – порядковые номера первого и последнего из начавшихся, но еще не закончившихся единичных актов разрушения; Z_i – усилие резания, формирующееся в каждом единичном акте разрушения:

$$Z_i = \begin{cases} C_n \Delta X_i(t), & \Delta X_i(t) \leq P_{ck}/C_n; \\ 0, & \Delta X_i(t) > P_{ck}/C_n, \end{cases}$$

где $\Delta X_i(t)$ – упругопластические деформации рассматриваемого объема породы в данном единичном акте нагружения (см. рис):

$$\Delta X_i(t) = l(t) - l_i,$$

где $l(t)$ – путь, пройденный резцом за время t ; $P_{ск}$ – усилие, при котором происходит хрупкое разрушение и отделение рассматриваемого объема породы:

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{2Z_{cp} C_n}{\lambda}},$$

где Z_{cp} – математическое ожидание усилия резания; C_n – линейаризованный коэффициент псевдожесткости породы; λ – интенсивность потока единичных актов разрушения, m^{-1} .

Положение реза в момент начала i -того скола определяется как

$$l_i = l_{i-1} + \Delta l_i,$$

где Δl_i – случайная величина интервала между началами сколов.

Полученная описанным выше способом реализация мгновенных значений усилия резания может быть использована для моделирования усилия подачи, так как эти процессы взаимно коррелированы. Так, полученный при обработке экспериментальных данных коэффициент взаимной корреляции между усилиями резания и подачи при резании песчанистого сланца находится в пределах 0,79–0,88.

Мгновенные значения усилия подачи определяются следующим образом:

$$Y_i = Y_{cp} + k_i (Z_i - Z_{cp}),$$

где Y_{cp} – математическое ожидание усилия подачи; k_i – мгновенное значение случайной функции, определяемой как отношение мгновенных значений усилия подачи и усилия резания, обусловленных цикличностью процесса хрупко-пластического разрушения породы.

Параметр k_i имеет достаточно ясный физический смысл. Он представляет собой тангенс угла наклона вектора случайной составляющей нагрузки на резец по отношению к плоскости резания. Функция k рассматривается как стационарная эргодическая случайная функция пути, пройденного резцом, которая характеризуется законом распределения и автокорреляционной функцией.

Моделирование коэффициента k производится по рекуррентным зависимостям [1]:

$$k_i = \sigma_{0Y} \sqrt{\psi_{1i}^2 + \psi_{2i}^2},$$

$$\psi_{1i} = e^{-\frac{\alpha \Delta t_m}{2}} \psi_{1(i-1)} + \sqrt{1 - e^{-\frac{\alpha \Delta t_m}{2}}} \xi_{1i},$$

$$\psi_{2i} = e^{-\frac{\alpha \Delta t_m}{2}} \psi_{2(i-1)} + \sqrt{1 - e^{-\frac{\alpha \Delta t_m}{2}}} \xi_{2i}.$$

где Δt_m – шаг моделирования, m ; α – показатель затухания автокорреляционной функции, m^{-1} ; ψ_{1i} и ψ_{2i} – независимые нормальные случайные процессы с математическим ожиданием, равным 0, дисперсией, равной 1, и нормированной корреляционной функцией $r_0 = e^{-\frac{\alpha t}{2}}$.

В основе модели формирования гранулометрического состава продукта резания лежит предположение

об идентичности закономерностей сокращения крупности породы при резании и дроблении одиночных кусков породы.

Характеристический размер куска угля или породы D_i можно определять несколькими способами, но представленная ниже формула дает результат, наиболее близкий к эксперименту:

$$D_i = \frac{t + h + \Delta l_i}{3}.$$

Объем продукта, имеющего размер меньше диаметра отверстия сита d , для каждого скола определяется по выражению:

$$V_{ni}(d) = \begin{cases} D_i^3 F(d/D_i) & \text{при } d < D_i, \\ D_i^3 & \text{при } d > D_i; \end{cases}$$

где $F(d/D_i)$ – непрерывная функция, характеризующая крупность продукта.

Функцию $F(d/D_i)$ предпочтительно принимать в виде уравнений Годена-Андреева (Г-А) или Розина-Рамллера (Р-Р), так как они являются однопараметрическими.

Уравнение Г-А имеет вид:

$$F(d/D_i) = (d/D_i)^g,$$

уравнение Р-Р в модифицированном виде:

$$F(d/D_i) = 1,582(1 - e^{-\frac{d}{D_i}^u}),$$

где g, u – параметры, характеризующие свойства разрушенной горной породы.

Выход продукта для каждого класса крупности определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^N V_{ni}(d)}{\sum_{i=1}^N D_i^3},$$

где N – число сколов.

Параметрами разработанной математической модели процесса резания являются: для определения мгновенных составляющих усилия резания – интенсивность потока сколов λ , коэффициент псевдожесткости породы C_n и параметр закона распределения интервалов между сколами; для определения мгновенных составляющих усилия подачи – параметры случайной функции k : σ_{0Y} и α ; для моделирования гранулометрического состава продукта резания – это параметр функции, характеризующей крупность продукта, то есть параметр g при применении уравнения Г-А и параметр u в случае использования уравнения Р-Р.

Для целей моделирования усилия резания углей параметр λ предлагается определять по формуле [2]:

$$\lambda = 584000 / (2920 + Z_{cp}), \text{ м}^{-1}.$$

Как показал анализ экспериментальных данных, приведенная зависимость применительно к резанию породы требует корректировки. Для пород получено эмпирическое выражение для определения интенсивности потока сколов по известному среднему значению усилия резания:

$$\lambda = 5050 Z_{cp}^{-0,352}.$$

Для угля в первом приближении можно рекомендовать $C_n = 250$ кН/м. Для пород параметр C_n определялся методом параметрической идентификации путем сравнения спектральных плотностей усилий резания с использованием метода наименьших квадратов, а также по гистограммам распределения усилия резания с применением критерия согласия Пирсона χ^2 . Полученная в результате идентификации зависимость коэффициента псевдожесткости от среднего значения усилия резания имеет вид:

$$C_{II} = 0,495 Z_{cp}^{0,810}.$$

Для сокращения количества параметров модели, требующих идентификации, рассмотрены потоки событий, для которых интервалы времени (или пути \square) распределены по однопараметрическим законам. Как показали проведенные исследования, заключающиеся в подборе закона распределения величины \square , для условий резания угля лучше использовать показательный закон, ограниченный сверху и снизу ($t_H < \square / < t_B$) [3].

Тогда интервал между сколами определяется как случайная величина:

$$\Delta t_i = -\lambda^{-1} \ln(1 - \nu),$$

где ν – случайная величина, равномерно распределенная в интервале [0, 1].

При этом из полученных значений Δt_i оставляются только те, которые удовлетворяют неравенству $t_H < \Delta t_i < t_B$. При резании породы рекомендуется использовать в качестве закона распределения величины Δt рэлеевское распределение, как однопараметрическое и более близкое к экспериментальным данным. Параметр распределения σ_{0Z} равен:

$$\sigma_{0Z} = \frac{0,798}{\lambda}.$$

Интервал между сколами определяется из выражения:

$$\Delta l_i = \sigma_{0Z} \sqrt{\xi_1^2 + \xi_2^2},$$

где ξ_1, ξ_2 – независимые нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием, равным 0, и дисперсией, равной 1.

Идентификация параметра σ_{0Y} производилась путем сравнения спектральных плотностей усилий подачи, полученных экспериментально и при моделировании. Критерием сравнения была выбрана величина, равная сумме квадратов отклонений. По результатам проведенной идентификации получена эмпирическая зависимость параметра σ_{0Y} от отношения средних значений усилий подачи и резания:

$$\sigma_{0Y} = 0,455 \frac{Y_{cp}}{Z_{cp}} + 0,118.$$

Как показал анализ результатов статистической обработки, нормированная автокорреляционная функция исследуемой случайной функции k может быть аппроксимирована экспонентой

$$r(\mu) = e^{-\alpha|\mu|}.$$

В результате идентификации параметра α установлено, что при его изменении в пределах 50–2000 м^{-1} результаты моделирования изменяются незначительно. Для имитационного моделирования усилия подачи рекомендуется принимать коэффициент затухания автокорреляционной функции $\alpha = 200$ м^{-1} . При этом достигается наибольшее сходство результатов натуральных и вычислительных экспериментов.

Идентификация параметров g и u производилась при помощи метода наименьших квадратов. В результате проведенной идентификации получены их значения: $g = 0,35$ и $u = 0,5$ для моделирования гранулометрического состава песчаника и $u = 0,92$ применительно к углецементному блоку. При этом для моделирования гранулометрического состава продукта резания угля предпочтительней использовать уравнение Р-Р.

В результате анализа адекватности разработанной интегральной математической модели реальным процессам [3–5] установлено, что разработанная модель в основном адекватно описывает процесс резания горных пород. Таким образом, разработанная модель может использоваться для исследования и оптимизации породоразрушающих машин и их рабочих процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Быков В.В.* Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М.: Советское радио, 1971. – 326 с.

2 *Позин Е.Э., Туяхов Л.С.* Анализ структурных особенностей процесса резания углей применительно к моделированию динамических нагрузок на ЭЦВМ // Научн.сообщ. ин-та горн. дела им. А. А. Скочинского. – М.: Ин-т горн. дела им. А. А. Скочинского, 1973. – Вып.113. – С. 91–100.

3 *Кондрахин В.П., Осипенко А.И.* Имитационное моделирование процесса формирования нагрузок на резаках при резании горных пород. – Донецк: Сб. "Наукові праці Донецького державного технічного університету". – Вып. 16, 2000. – с. 161 - 168.

4 *Кондрахин В.П., Хиценко А.И.* Имитационное моделирование усилия подачи при резании горных пород. – Донецк: Сб. "Наукові праці Донецько-

го державного технічного університету". – Вып. 42, 2002. – с. 124 - 129.

5 *Кондрахин В.П., Хиценко А.И.* Имитационное моделирование гранулометрического состава продукта резания горных пород. Донецк: Сб. "Наукові праці Донецького державного технічного університету". – Вып. 27, 2001. – с. 115 - 119.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кондрахин В.П. – профессор, доктор технических наук, Донецкий национальный технический университет.

Хиценко А.И. – аспирант, Донецкий национальный технический университет.