

УДК 622.232.72

Н. Г. БОЙКО, доктор техн. наук,
Д. Е. БОЙКО, магистр,
Е. Н. БОЙКО, канд. техн. наук
(ДонНТУ)



Н. Г. Бойко



Д. Е. Бойко



Е. Н. Бойко

Сортность угля и пути ее улучшения

Рассмотрено формирование сортового состава угля при добыче современными очистными комбайнами, разработана математическая модель этого процесса. Результаты расчета сортового состава угля проверены и подтверждены экспериментально при работе комбайнов в шахтных условиях.

Процесс формирования сортового (гранулометрического) состава угля при разрушении пласта режущим инструментом очистных комбайнов – сложная многомерная задача, все параметры которой практически случайны. Это связано с тем, что уголь – сложная анизотропная структура, испещренная трещинами, с породными прослойками и твердыми минеральными включениями, на сопротивляемость резанию которой влияет исходный материал угленакопления, степень метаморфизма и другие факторы [1].

Первые попытки определения сортового состава угля, добытого с помощью очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами, выполнены в ДонУГИ [2] в середине прошлого века. Суть исследований сводилась к установлению фактического сортового состава угля, добываемого с помощью очистных комбайнов в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях, с последующей аппроксимацией полученных данных аналитической зависимостью, коэффициенты которой выбирались из результатов рассева угля.

Формирование сортового (гранулометрического) состава угля с помощью очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами впервые аналитически описано в работах [3, 4] и рассматривается как многомерный случайный процесс с учетом характера и энергоемкости разрушения пласта.

При разрушении пласта рабочим (исполнительным) органом комбайна одновременно участвует несколько резцов (как правило, 25 – 26 для одного рабочего органа). Каждый из них, занимая «свое» место на рабочем органе по его длине, разрушает и «свой» участок по ширине захвата. Толщина h среза угля каждым рез-

цом, изменяясь по закону, близкому к синусоидальному, принимает значения от нуля при входе (выходе) резца в контакт (из контакта) с пластом, т. е. при угле поворота от нуля до π . Толщина среза в диаметральной плоскости (при угле поворота резца $\pi/2$)

$$h_{\max} = v_k / (n_{o,p} n_{p,l}),$$

где v_k – скорость перемещения комбайна;
 $n_{o,p}$ и $n_{p,l}$ – частота вращения органа и количество резцов в линии резания.

При последовательном резе параметры разрушения пласта

$$h(\varphi) = h_{\max} \sin \varphi \text{ при } t = t_y,$$

где t_y – шаг установки резцов на рабочем органе;
 φ – угол положения резца на дуге резания.

Характер «вырезаемой» части пласта и разрушения его резцами приведены на рис. 1.

Поскольку ширина среза резцами выбирается таким образом, чтобы остающаяся вне воздействия режущего инструмента часть пласта (межщелевой целик) саморазрушалась под действием естественного напряженного состояния угля, площадь среза в этом случае

$$S_n(\varphi) = h(\varphi)t_y \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (1)$$

Откуда следует, что площадь среза резцами рабочего органа изменяется от нуля до $S_{\max} = h_{\max}t_y$ при варьировании угла поворота резцов в пределах от нуля до π .

Гранулометрический состав угля, разрушенного рабочим органом, обуславливается площадью среза. Введем одномерный параметр – медианный диаметр, который адекватно отображает изменение основного параметра разрушения пласта – площадь среза. Определим медианный диаметр из условия равенства площади среза и условного круга диаметром, равным медианному:

$$d_m = 2\sqrt{\pi^{-1}h_{\max}t_y \sin \varphi} \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad (2)$$

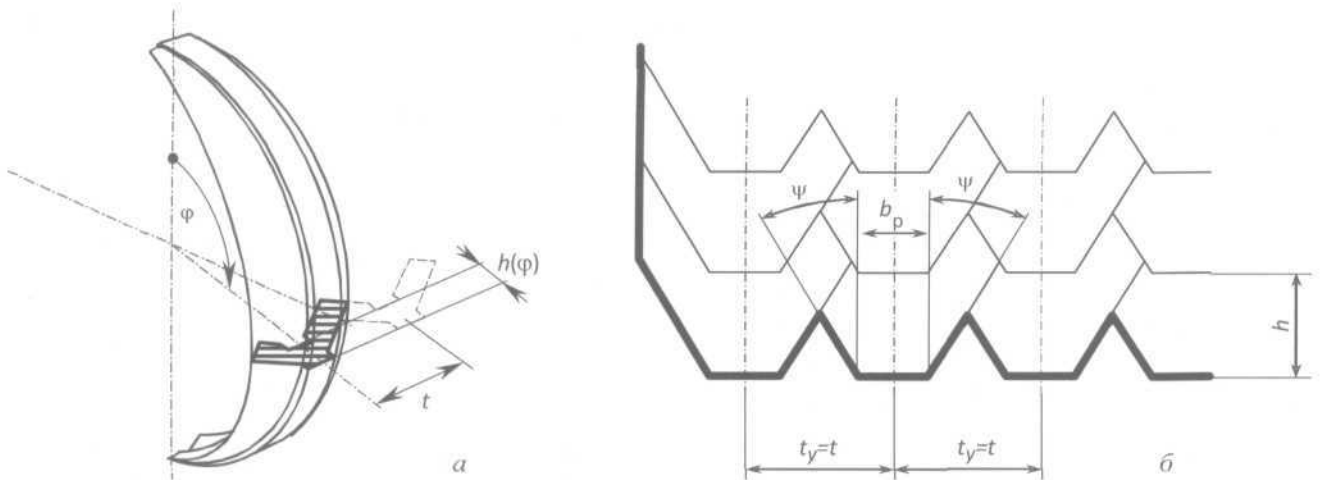


Рис. 1. Схемы «вырезанной» части пласта (а) и характер его разрушения (б) при последовательном резе: φ – угол поворота реза; t, t_y – шаг резания; $h(\varphi), h$ – толщина среза; b_p – ширина передней грани реза; ψ – угол развала борозды резания.

который изменяется от нуля до $d_m^{\max} = 2\sqrt{\pi^{-1}h_{\max}t_y}$ при изменении угла поворота от нуля до π .

Удельные энергозатраты на разрушение пласта рабочим органом [3]

$$W_{o.p.} = Z_{n.o.p.} / S_{o.p.} = Z_n n_p / [S_n(\varphi) n_p] = Z_n / S_n(\varphi),$$

где $Z_{n.o.p.}$ и Z_n – усилия резания на передней грани резцов рабочего органа одиночного реза;

$S_{o.p.}$ – площадь среза резами рабочего органа;

n_p – количество резцов, которые одновременно находятся в контакте с разрушаемым пластом.

Из приведенной зависимости следует, что удельные затраты энергии на разрушение пласта рабочим органом определяются исходя из удельных затрат энергии на разрушение одиночным резцом и численно им равны.

Представляя усилие резания на передней грани одиночного реза в виде, приведенном в работе [1], и опуская промежуточные выкладки, удельные энергозатраты на разрушение пласта рабочим органом могут быть представлены в виде [3]

$$W_{o.p.} = k_w \left[\left(F + \frac{4M}{\pi d_m^2} \right) A_p + \frac{4N}{\pi d_m^2} \right], \quad (3)$$

где k_w – коэффициент пропорциональности;

A_p – сопротивляемость угля резанию;

F, M, N – постоянные величины.

Решив выражение (3) относительно d_m , получим

$$d_m = 2\sqrt{k_w(M+N)A_p / [\pi(W_{o.p.} - k_w F A_p)]} = 2\sqrt{\bar{k}_w A_p / \bar{W}_{o.p.}}$$

Здесь $\bar{k}_w = k_w(M+N)/\pi$, $\bar{W}_{o.p.} = W_{o.p.} - k_w F A_p$.

Откуда следует, что медианный диаметр гранул разрушенного угля рабочим органом пропорционален кор-

ню квадратному из отношения сопротивляемости угля резанию и удельных энергозатрат на разрушение пласта.

Поскольку удельные энергозатраты на разрушение пласта – гиперболическая функция толщины среза (стружки), асимптотически стремящаяся к минимальной с ее увеличением [4], медианный диаметр гранул угля будет возрастать с ростом толщины среза. Следовательно, одним из путей улучшения гранулометрического (сортового) состава угля, добытого очистными комбайнами, является снижение удельных энергозатрат на разрушение пласта.

Закон распределения вероятностей значений медианного диаметра для гранул разрушенного угля [3]

$$g(d_m) = 2C_M^2 d_m / (\sigma_{C_M d_M}^2) \exp \left[- \left(C_M^2 (d_m^2 - \bar{d}_M^2)^2 / (2\sigma_{C_M d_M}^2) \right) \right], \quad (4)$$

где $d_M = C_{w.p.} A_p^{1/2}$, $C_{w.p.} = 2\sqrt{\bar{k}_w / \bar{W}_{o.p.}}$, $C_M = 1/C_{w.p.}$

Выражение (4) не является строго законом Гаусса из-за множителя $2C_M d_m$. При $2C_M d_m \rightarrow 1$ выражение (2) стремится к нормальному закону (закону Гаусса). Однако с достаточной для инженерных расчетов точностью и получения оценочных значений медианного диаметра гранул разрушенного угля можно считать, что размеры гранул изменяются в интервале от $\bar{d}_M - 3\sigma_{d_M}$ до $\bar{d}_M + 3\sigma_{d_M}$, где \bar{d}_M – математическое ожидание (среднее значение) медианного диаметра гранул; σ_{d_M} – среднеквадратичное отклонение медианного диаметра гранул.

Площадь среза (стружки), определенная по зависимости (1) вследствие переменности толщины стружки по мере поворота рабочего органа, будет переменной величиной, изменяющейся по закону толщины среза, т. е.

$$S(\varphi) = h_{\max} t_y \sin \varphi = S_{\max} \sin \varphi,$$

где $S_{\max} = h_{\max} t_y$.

В этом случае удобно перейти к среднему значению площади среза

$$S_{\text{ср}} = \pi^{-1} S_{\max} \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi = 2\pi^{-1} S_{\max}.$$

Тогда средний размер медианного диаметра гранул

$$\bar{d}_m = 2\sqrt{\pi^{-1} S_{\text{ср}}}.$$

При скорости перемещения комбайна К-101У или К-103М (например, 3,2 м/мин) и принятых параметрах рабочего органа (частота вращения органа 80 мин⁻¹, два резца в линии резания и шаг установки 4,5 см) площадь сечения среза изменяется от нуля до 9 см², если средняя составляет 5,7 см². В этом случае медианный диаметр гранул разрушенного угля изменяется от нуля до 3,4 см при среднем 2,7 см. Это означает, что вероятностный гранулометрический (сортовой) состав разрушенного угля оценочно не превысит 50 мм при наиболее вероятном размере его гранул 0 – 25 мм.

Полученный на основании теоретических положений результат подтверждается данными рассева угля, добытого с помощью комбайна К-103 в лаве № 841 по пласту с₈ Нижний на шахте «Западно-Донбасская» ГХК «Павлоградуголь» (в настоящее время ОАО «Павлоградуголь») (ДТЭК). По данным рассева угля 63,23 % – гранулы размерами 0 – 25 мм, 15,94 % – размерами 25 – 50 мм. Результаты рассева угля, добытого с помощью комбайна типа К-101 в центральной разгрузочной лаве пласта h₁₀ Верхний шахты «Холодная балка» ГХК «Макеевуголь» (ГП «Макеевуголь») близки к данным его рассева на шахте «Западно-Донбасская».

На основании разработанных теоретических положений и полученных результатов можно сделать следующее заключение. Гранулометрический (сортовой) состав угля, разрушенного исполнительным органом, который оснащен серийно изготавливаемым режущим инструментом радиального типа (резцы типа ЗР4-80), можно оценивать медианным диаметром гранул – случайной величиной, обусловленной удельными энергозатратами на разрушение пласта и площадью сечения стружки.

Разработанный авторами режущий инструмент с рабочей боковой гранью (рис. 2) отличается



Рис. 2. Вид резца с рабочей боковой гранью.

от режущего инструмента серийного изготовления (резцы типа ЗР4-80) принципиальной особенностью: пласт разрушается путем создания в его массиве сложного объемного комбинированного напряженного состояния, сочетающего напряжения сжатия и сдвига. Напряжение сжатия массива создается передней и задней гранями, напряжение сдвига – рабочей боковой гранью. Поскольку сопротивление горных пород, в том числе и угля разрушению сдвигом значительно ниже сопротивления разрушению сжатием, разрушение угля резцами с рабочей боковой гранью, как показали исследования, менее энергоемко.

Теоретически разрушение пласта исполнительным органом комбайна, оснащенного режущим инструментом (резцами) с рабочей боковой гранью, можно выполнять как по схеме последовательного, так и шахматного реза (рассмотрен в работах [3, 4]).

По схеме последовательного реза пласт разрушается, если в линии резания два или более резцов. При этом каждый резец исполнительного органа с боковой рабочей гранью разрушает часть пласта объемом

$$V_{p,\beta}(\varphi) = k_r l_\beta h_{\max} t_y \sec \beta \sin \varphi = V_{p,\max} \sin \varphi,$$

где $V_{p,\max} = k_r l_\beta h_{\max} t_y \sec \beta$;

k_r – коэффициент ширины среза;

l_β – длина боковой рабочей грани резца;

β – угол наклона рабочей боковой грани.

Объем угля при разрушении изменяется от нуля до $V_{p,\max}$ при угле поворота резца от нуля до $\pi/2$ и от $V_{p,\max}$ до нуля при угле поворота от $\pi/2$ до π . Предельная длина скола может составлять $l_{\max} = k_r l_\beta t_y \sec \beta$. Параметры фактического разрушения указанного объема обусловлены трещиноватостью пласта, сопротивляемостью угля резанию в месте установки резца и другими факторами, большинство из которых случайны.

Для характеристики гранулометрического (сортового) состава угля, разрушенного рабочим органом, оснащенного резцами с рабочими боковыми гранями, введем понятие «медианный диаметр условного шара» $d_{m,\beta}(\varphi)$, объем которого равен объему разрушенного каждым резцом угля,

$$d_{m,\beta}(\varphi) = 1,82 \sqrt[3]{\pi^{-1} V_{p,\beta}(\varphi)} \quad (5)$$

Значения $d_{m,\beta}(\varphi)$ изменяются от нуля до $d_{m,\beta,\max}$ и от $d_{m,\beta,\max}$ до нуля при изменении угла поворота резца соответственно от нуля до $\pi/2$ и от $\pi/2$ до π . Медианный диаметр обусловлен многими факторами, большинство из которых случайны. Несмотря на то что составляющие медианного диаметра подчиняются различным законам распределения вероятностей, при совместном их проявлении в пространстве и во времени, что характерно при разрушении пласта режущим инструментом, согласно центральной предельной теореме [5], меди-

анный диаметр будет подчиняться нормальному закону распределения вероятностей. Поэтому для характеристики гранулометрического (сортового) состава, разрушенного исполнительным органом, оснащенным резами с рабочими боковыми гранями, примем медианный диаметр гранул гауссовой величиной с плотностью распределения его вероятностей

$$f(d_{м.б}) = \frac{1}{\sigma_{d_{м.б}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(d_{м.б} - \bar{d}_{м.б})^2}{2\sigma_{d_{м.б}}^2} \right]$$

Сравнивая формулу (2) для медианного диаметра при последовательном резе серийно изготавливаемыми резами типа ЗР4-80 и резами с рабочими боковыми гранями (формула (5)) для максимальных их значений,

$$\mu_{d_{м.макс}} = \frac{0,9 \sqrt[3]{\pi^{-1} k_r l_b h_{max} t_y \sec \beta}}{\sqrt{\pi^{-1} h_{max} t_y}}$$

Таблица 1

Класс, мм	0 – 6	6 – 13	13 – 18	18 – 25	25 – 50	50 – 100
<i>При разрушении серийно изготавливаемыми резами</i>						
Вероятность, %	2	16	28	34	20	-
<i>При разрушении резами с рабочей боковой гранью</i>						
Вероятность, %	1	4	9	25	52	9

Таблица 2

Класс, мм	+150	150 – 100	100 – 50	50 – 25	25 – 13	13 – 6	6 – 0
Шахта «Южно-Донбасская» № 1							
<i>При оснащении рабочего органа резами типа ЗРБ2-80Л (с рабочей гранью)</i>							
Содержание, %	4,2	6,7	21,8	20,9	19,0	9,2	10,4
<i>При оснащении рабочего органа резами типа ЗР4-80</i>							
Содержание, %	3,9	3,3	13,3	15,0	16,1	11,8	18,9
Изменение содержания	+1,08	+2,03	+1,64	+1,40	+1,18	-0,78	-0,55
АП «Шахта им. А. Ф. Засядько»							
<i>При оснащении рабочего органа резами типа ЗРБ2-80Л (с рабочей гранью)</i>							
Содержание, %	16,2	5,5	14,5	18,1	7,7	12,0	26,5
<i>При оснащении рабочего органа резами типа ЗР4-80</i>							
Содержание, %	7,1	3,1	9,6	9,1	13,4	15,4	36,8
Изменение содержания	+2,28	+1,77	+1,51	+2,0	-0,57	-0,78	-0,72

Примечание. 1. Знаком «+» обозначено увеличение, знаком «-» – уменьшение. 2. Содержание фракций, не равное 100 %, по шахте «Южно-Донбасская» № 1 обусловлено учетом содержания породы.

Для принятых параметров схемы набора режущего инструмента очистных комбайнов типов 1К-101У, К-103М и режима их работы, при котором максимальная толщина среза составляет, например 3 см (скорость перемещения комбайна 4,8 м/мин), и параметрах режущего инструмента $l_б = 45$ мм, $\beta = 45^\circ$, получаем $\mu_{d_{м.макс}} \approx 1,7$. Для этих же параметров и такого же режима работы комбайна отношения математических ожиданий (средних значений) и среднеквадратичного отклонения медианных диаметров соответственно составляют 1,7 и 1,6 раза. Вероятностный гранулометрический состав угля оценочно представлен в табл. 1.

Таким образом, применение режущего инструмента с рабочими боковыми гранями значительно улучшает гранулометрический (сортовой) состав угля, добытого с помощью очистных комбайнов.

Данные, полученные на основании разработанной математической модели по сортовому составу угля, подтверждаются результатами экспериментальных исследований работы комбайнов в шахтных условиях – данными рассева угля (табл. 2).

Выводы. На основании полученных результатов шахтных исследований работы комбайнов, исполнительные органы которых оснащались резами серийного изготовления типа ЗР4-80 и специальными резами с рабочими боковыми гранями типа ЗРБ2-80Л, можно утверждать: впервые разработаны метод и специальный режущий инструмент, которые позволяют при использовании современных очистных комбайнов значительно (в среднем до двух раз) улучшить гранулометрический (сортовой) состав угля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Позин Е. З. Сопrotивляемость углей разрушению режущими инструментами / Е. З. Позин. – М.: Наука, 1972. – 240 с.
2. Яцких В. Г. Сортность угля при работе выемочных машин и пути ее улучшения / В. Г. Яцких, В. И. Кутовой, И. Г. Шапиро. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 163 с.
3. Бойко Н. Г. Формирование сортового состава угля при добыче его очистными комбайнами / Н. Г. Бойко. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 246 с.
4. Бойко Н. Г. Очистные комбайны для тонких пологих пластов / Н. Г. Бойко. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – 467 с.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.