

## **ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЯ ПРИ ДОБЫЧЕ ЕГО ОЧИСТНЫМИ КОМБАЙНАМИ**

Бойко Н.Г., докт. тех. наук., проф.,  
Донецкий государственный технический университет;  
Марков Н.А., канд. техн. наук, ЗАО «Донбассуголь»,  
Бойко Е.Н., канд. техн. наук, Федоров О.В., аспирант,  
Донецкий государственный технический университет

*Рассмотрены вопросы теории формирования гранулометрического состава угля при добыче его современными очистными комбайнами и оснащении их исполнительных органов режущими существующей конструкции и режущими с рабочей боковой гранью.*

*The questions of theory of coal grain-size distribution generation during it's mining by modern stoping combines with effectors equipped by ordinary cutters and cutters with working lateral faces is considered.*

Угольный пласт — это сложная полосчатая витрено-фюзено-дюрено-кларено-структура, содержащая породные и углистые прослойки и твердые минеральные включения и находящаяся в напряженном состоянии под давлением вмещающих его пород, массив пласта испещрен трещинами экзо - и эндогенного характера. Последние обуславливают появление в массиве пласта так называемых кливажных трещин и «струение» лавы при его отработке. Кроме того, в пласте находятся под большим давлением газы, основным из которых по объему является метан. В случае выбросоопасных пластов одним из способов борьбы из выбросами угля и газа является нагнетание воды в пласт или предварительное сотрясательное его взрывание.

К характерным особенностям состояния угольного пласта, как массива, первоначальное состояние которого было ограничено со всех сторон вмещающими его породами, разрушаемого исполнительным органом комбайна, относится то, что две из ограничивающих поверхностей высотой, равной мощности пласта, отсутствуют. Это поверхности: 1 – поверхность вдоль лавы и 2 – поверхность груди забоя, рис 1.

При этом опускающиеся породы кровли раздавливают угольный пласт. Это явление носит название отжима угля и учитывается при определении силы на режущем инструменте путем уменьшения со-

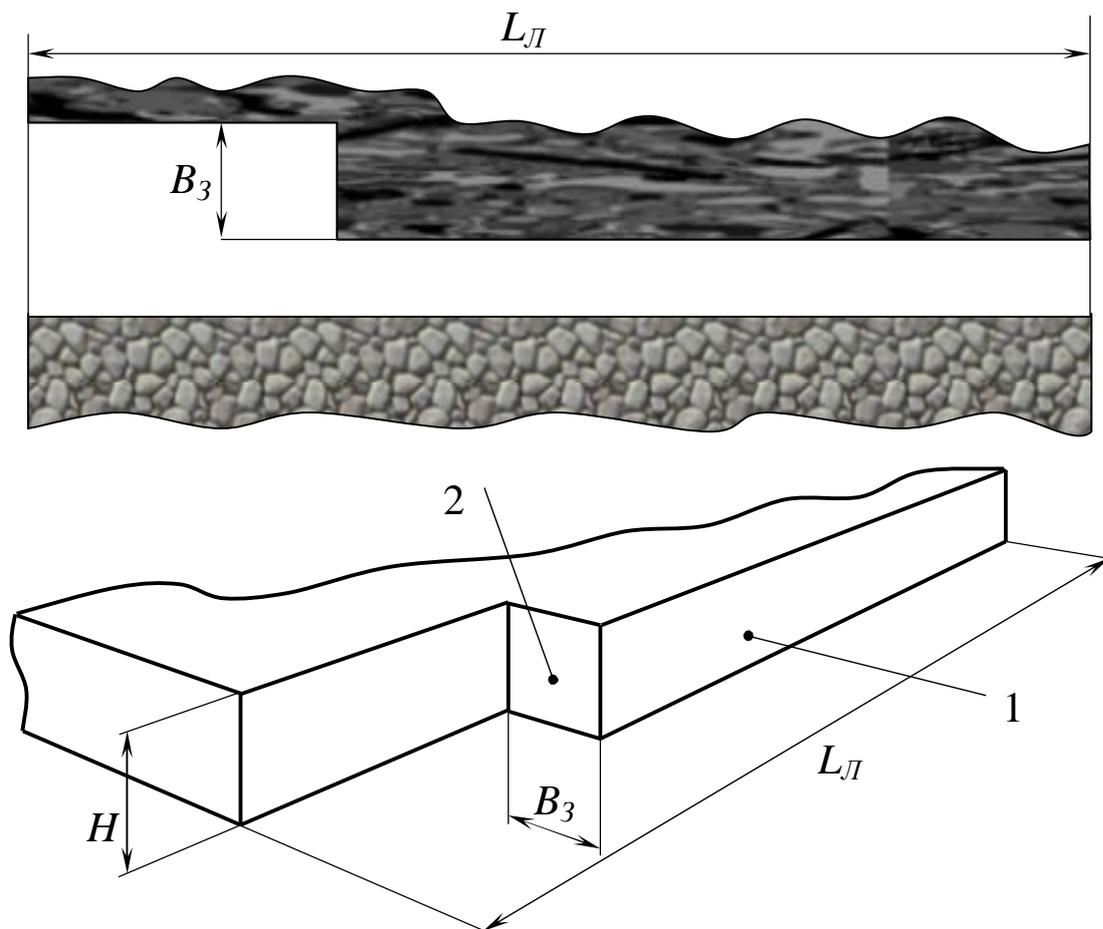


Рисунок 1. — Схема обработки пласта очистным комбайном

противляемости угля резанию. Численное значение уменьшения сопротивляемости угля резанию определяется коэффициентом отжима [ 1 ], аналитическое выражение которого имеет вид

$$k_{от} = k_0 + (B_3 / H - c_y) / (B_3 / H + d_y), \quad (1)$$

где  $k_0$  – значение коэффициента отжима на кромке забоя,  $B_3$  – ширина захвата исполнительного органа,  $H$  – мощность пласта,  $c_y$ ,  $d_y$  – величины, зависящие от хрупко-пластических свойств угля и горно-технологических условий его добычи.

Из приведенной зависимости следует, что коэффициент отжима, а следовательно, и сопротивляемость угля резанию увеличиваются по мере заглубления в пласт (по мере увеличения ширины захвата) и уменьшения мощности пласта, поскольку отношение  $d_y/c_y \cong 10$ .

Фактически же, по визуальным наблюдениям, уменьшение сопротивляемости угля резанию, которое, вероятно, можно оценивать и с помощью коэффициента отжима, как интегрального показателя, при определении усилий на резцах, уголь, расположенный ближе к по-

верхности 1, рис. 1, раздавлен и представляет собой отдельные, кусковатость которых значительно больше ширины среза, а уголь, находящийся на расстоянии, составляющего примерно 20-25 % ширины захвата от поверхности 1, в зависимости от мощности пласта, хрупко-пластических свойств и крепости угля, типа и жесткости крепи, скорости подвигания лавы, типа вмещающих пород и др. факторов - практически монолит, хотя, может быть, и ослаблен и с увеличенной трещиноватостью.

Сказанное подтверждается и результатами отсева угля, проведенного в соответствии с требованиями ГОСТ 2093-77. По данным отсева угля, добытого комбайном типа К-103 в лаве № 942 пласта С<sub>8</sub> шахты «Западно-Донбасская» ГХК «Павлоградуголь», 20,82 % его состава - уголь, размер гранул которого относится к классу 50-100 мм, в то время, как ширина среза для этого комбайна 45 мм, а максимальная толщина среза при отборе угля составляла в среднем 2 см (скорость перемещения комбайна – около 3 м/мин), т.е. максимальная площадь сечения среза (стружки) – порядка 9 см<sup>2</sup>. Это свидетельствует о том, что указанные размеры гранул угля не могут быть получены путем разрушения пласта рабочим органом комбайна, а являются следствием отжима и раздавливания его в зоне, прилегающей к поверхности 1, рис. 1.

Следует также отметить, что продолжительности обнажения указанных на рис. 1 поверхностей 1 и 2 значительно отличаются между собой. Если продолжительность обнажения поверхности 1 измеряется обычно часами и иногда достигает продолжительности смены (обновление этой поверхности происходит по мере снятия полосы угля, равной ширине захвата), то продолжительность обнажения поверхности 2 – продолжительностью оборота шнека (как правило, менее 1 с). Поверхность 2, так называемая грудь забоя, - это постоянно со скоростью, равной скорости перемещения комбайна и частоте вращения рабочего органа, обновляющаяся поверхность на толщину, равную толщине среза в диаметральной плоскости рабочего органа (шнека).

Отметим еще несколько особенностей процесса и характера разрушения пласта рабочим органом очистного комбайна. Во-первых, не нарушая общности задачи и дальше вопросы будем рассматривать для опережающего рабочего органа (шнека), когда разрушение части пласта производится по высоте, раной диаметру органа, и когда в разрушении пласта одновременно участвует половина от всех резцов,

установленных на рабочем органе и укажем только на отличительные особенности разрушения части пласта отстающим рабочим органом (шнеком). Во-вторых, резцы, установленные на рабочем органе, разделяются на две группы – группу кутковых и группу забойных резцов. При этом параметры разрушения (толщина и ширина среза) пласта резцами кутковой группы значительно отличаются от параметров разрушения пласта резцами забойной группы. В кутковой группе число резцов в линии резания в 2-4 раза больше числа резцов в линии резания забойной группы резцов. Это обуславливает в то же число раз уменьшение толщины среза резцами кутковой группы. Ширина среза резцами кутковой группы всегда переменная и обычно изменяется от 15 мм у первой линии резания до 35 мм у последней кутковой линии резания. Обычно ширина захвата кутковой группы резцов для современных рабочих органов (шнеков) составляет, как правило, 135 мм или 16 % от общей ширины захвата по схеме набора режущего инструмента при номинальной ширине захвата 0,8 м и 20 % - при номинальной ширине захвата 0,63 м.

В забойной группе резцы устанавливаются на лопастях органа (шнека), как правило, с постоянной шириной среза, величина которой изменяется от 45 до 55 мм. Число резцов в линии резания может быть 1 – при шахматном и 2 – при последовательном резах.

Тогда, если средняя толщина среза резцами забойной группы составляет, например, 1,5 см, что соответствует скорости перемещения комбайна около 3,6 м/мин при 2-х резцах в линии резания и частоте вращения органа  $80 \text{ мин}^{-1}$  (принятая частота вращения шнеков у комбайнов типа 1К-101 и К-103), а средняя величина сечения среза для этой группы резцов –  $6,75 \text{ см}^2$ , то для резцов кутковой группы величина этого параметра изменяется от 1,1 у первой до  $5,2 \text{ см}^2$  у последней линии резания. Поэтому процесс формирования гранулометрического состава угля, разрушаемого рабочим органом комбайна целесообразно рассматривать для группы забойных резцов, так как гранулометрический состав всего объема разрушенного угля резцами кутковой группы, как показывает практика использования современных очистных комбайнов и собственные наблюдения авторов работы, составляет штыб (размер частиц разрушенного угля не превышает 6 мм), который затем необходимо учитывать в общем объеме угля, разрушенного рабочим органом. И, в-третьих, разрушаемая часть пласта, представляющая, как отмечалось выше, уступ толщиной равной толщине среза и шириной равной номинальной ширине захвата

рабочего органа и находящегося в естественном напряженном состоянии сжатия, одновременно подвергается точечному, если не учитывать ширину режущей части резца, которая для резцов существующей конструкции составляет 20 мм или около 2 % от ширины захвата по схеме набора режущего инструмента, воздействию в различных местах как по мощности пласта, так и по ширине захвата. При этом по мощности (высоте) пласта резцы отстоят друг от друга на величину  $h_p = t \cdot \operatorname{tg} \alpha_n$ , где  $t$  – ширина среза,  $\alpha_n$  – угол подъема лопасти по резцам, а по ширине захвата – на ширину среза  $t$ . Установленные таким образом резцы, вращаясь с частотой равной частоте вращения органа и перемещаясь в сторону груди забоя со скоростью равной скорости перемещения комбайна, производят разрушение указанного уступа пласта и практически ежесекундно ее обновляют. Эта поверхность пласта, как нетрудно видеть, является как постоянно обновляемой, так и постоянно находящейся в движении со скоростью равной скорости перемещения комбайна.

Хотя разрушение пласта рабочим органом очистного комбайна производится одновременно группой резцов, число которых достигает 25, тем не менее, каждый резец производит разрушение только «своего» участка пласта. Поэтому разрушение пласта одиночным резцом представляет интерес как в теоретическом, так и практическом плане.

Фактическое разрушение массива одиночным резцом, как установлено экспериментально, происходит сколами его, а распределение вероятностей длины скола не противоречит закону Вейбулла [ 2 ].

**Разрушение пласта резцом существующей конструкции.** Вероятность появления сколов размера от  $l_{1i}$  до  $l_{2i}$  определится из выражения

$$P(l_i) = \int_{l_{1i}}^{l_{2i}} f(\chi_i) d\chi_i. \quad (2)$$

Оценим возможные значения сколов  $l_{1i}$  и  $l_{2i}$ . Предельная минимальная величина скола -  $l_{1i}$ , - исходя из физики процесса разрушения, меньше нуля быть не может. Следовательно, предельное минимальное значение  $l_{1i} = 0$ . Предельная максимальная величина скола -  $l_{2i}$  – обуславливается рядом факторов, и в первую очередь, трещиноватостью, крепостью (сопротивляемостью резанию) массива, наличием трещин, их величиной и направлением, характером разрушения –

по напластованию или вкрест простирания пласта. Отметим сразу, что разрушение пласта рассматриваемыми исполнительными (рабочими) органами – шнеками – производится вкрест простирания или напластования. При имеющем место фактически случайном расположении, направлении и величине трещин в массиве пласта, случайной величине сопротивляемости угля резанию предельная максимальная величина скола будет величиной случайной. Множество факторов, влияющих на предельную величину сколов, причем факторов случайных по своей природе не противоречит, на основании предельной центральной теоремы [ 3 ], тому, что это нормально распределенная случайная величина, т.е. распределение вероятностей значений  $l_{2i}$  не противоречит закону Гаусса,

$$f(l_{2i}) = \frac{1}{\sigma_{l_{2i}} \sqrt{2\pi}} e^{-0,5(l_{2i} - \bar{l}_{2i})^2 / \sigma_{l_{2i}}^2}, \quad (3)$$

где  $\bar{l}_{2i}, \sigma_{l_{2i}}$  – соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение предельного максимального значения длины скола.

По данным экспериментальных исследований разрушения массива одиночным резцом существующей конструкции (резец типа ЗР4-80) предельное максимальное значение длины скола с вероятностью порядка 0,65 - 0,75 составило величину  $0 < l_{2i} \leq h(\varphi_i)$  и с вероятностью 0,35 — 0,25 – величину  $h(\varphi_i) < l_{2i} \leq k_1 h(\varphi_i), k_1 \leq 3$ .

Тогда основные статистики – математическое ожидание  $M$  и дисперсия  $D$  – длины скола определяются из следующих выражений:

$$Ml_i = \int_0^{l_{2i}} \chi_i f(\chi_i) d\chi_i, \quad (4)$$

$$Dl_i = \int_0^{l_{2i}} (\chi_i - Ml_i)^2 f(\chi_i) d\chi_i.$$

Учитывая особенности закона Вейбулла (более интенсивное нарастание вероятности при увеличении аргумента от нуля до математического ожидания и значительно медленное ее нарастание при увеличении аргумента после математического ожидания), можно на качественном уровне говорить о более вероятном появлении разрушенного угля, размеры гранул которого ближе к размерам штыба, т.е.

угля с размерами гранул 13, 18 мм, чем угля, размеры гранул которого 25 и более мм.

С целью проверки полученного на основании исследования приведенных выше зависимостей вывода рассмотрим более детально физическую картину процесса разрушения массива одиночным резцом. Исходя из современного представления разрушения угля резцом в последнем образуется борозда резания с развалом ее боковых сторон, угол развала и площадь среза которых определяется по зависимостям [1]

$$\begin{aligned} \psi &= \psi_0 + C/(h + h_0) - dA_p, \\ S(\varphi_i) &= h(\varphi_i)[b_p + h(\varphi_i)tg\psi_i], \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\psi_0$ ,  $C$ ,  $h_0$ ,  $d$  — постоянные величины для углей данных хрупко-пластических свойств,  $A_p$  — сопротивляемость угля резанию.

При этом на площадку  $b_p \cdot h(\varphi_i)$  давит передняя грань резца, создавая в массиве напряжение сжатия, и в размерах этой площадки наиболее вероятно появление сколов (гранул), размеры которых близки к толщине среза.

Представим

$$\delta_{S_i} = b_p h(\varphi_i) / S(\varphi_i) = \frac{1}{1 + h(\varphi_i) / b_p tg\psi_i}. \quad (6)$$

Далее, записав угол развала борозды резания в виде [1], будем иметь

$$\delta_{S_i} = \frac{1}{1 + h(\varphi_i) / b_p tg[\psi_0 + C / (h_0 + h(\varphi_i)) - dA_{pi}]}. \quad (7)$$

Откуда следует:

1. Отношение  $\delta_{S_i}$  — величина, максимальное значение которой равно 1. Физически это означает, что площадь, ограниченная параметрами ширины режущей части резца и толщины среза (стружки), и полная площадь борозды развала угля равны между собой.

2. При  $h(\varphi_i) \rightarrow 0$   $\delta_{S_i} \rightarrow 1$ , т.е. с уменьшением толщины среза (стружки) происходит выравнивание указанных площадей с уменьшением их величины, а следовательно, и уменьшение площадки, в параметрах которой наиболее вероятно появление сколов (гранул) с размерами, близких к толщине среза (стружки). А поскольку последняя стремится к нулю, то и размеры сколов (гранул) разрушенного угля стремятся к нулю.

3. С увеличением ширины режущей части резца отношение  $\delta_{Si}$  увеличивается. Физически это означает увеличение площадки, в параметрах которой наиболее вероятно появление сколов (гранул) разрушенного угля с размерами, близких к толщине среза (стружки).

4. С увеличением сопротивляемости угля резанию  $\delta_{Si}$  увеличивается. Физически это означает уменьшение площадки, обусловленной развалом борозды резания, и относительное увеличение площадки, в параметрах которой наиболее вероятно появление сколов (гранул) разрушенного угля с размерами, близких к толщине стружки (среза).

При  $h(\varphi_i) = b_p$ , характеризующей интенсивную работу комбайна (при двух резцах в линии резания и принятых частотах вращения шнеков комбайнов типа 1К-101 и К-103 скорость их перемещения составляет 3,2 м/мин)

$$\delta_{S_i} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}[\psi'_0 - dA_{pi}]}, \quad \psi'_0 = \psi_0 + C/(b_p + h_0). \quad (8)$$

Откуда следует: в интенсивных режимах работы комбайна гранулометрический состав угля, разрушенного одиночным резцом, обуславливается сопротивляемостью угля резанию — с увеличением сопротивляемости угля резанию отношение  $\delta_{Si}$  увеличивается. Следовательно, уменьшается площадь борозды, обусловленная ее развалом, и относительно увеличивается площадь, обусловленная шириной режущей части резца и толщиной среза (стружки), т.е. площадки, в параметрах которой наиболее вероятно появление гранул (сколов) с размерами, близких к толщине среза.

При сопротивляемости угля резанию 200-250 даН/см, наиболее характерной для пластов Донбасса, и указанной толщине среза  $\delta_{Si} \cong 0,5—0,6$  для вязких углей. Физически это означает, что при разрушении угля одиночным резцом с указанной толщиной среза ( $h(\varphi_i) = 2 \text{ см}$ ) с вероятностью примерно 0,5-0,6 возможно появление размера сколов (гранул) от 0 до 2 см, что весьма близко к данным, полученным экспериментально.

Удельные энергозатраты разрушения пласта одиночным резцом

$$W_{pi} = 1/[\pi S(\varphi_i)] \int_0^{\pi} Z_{ni}(\varphi_i) d\varphi_i. \quad (9)$$

Представляя площадь среза одиночным резцом  $S(\varphi_i)$  в виде (5), полную силу резания  $Z_{ni}(\varphi_i)$  и ее составляющие — соответствующим

образом, после интегрирования и приведения к удобному для анализа виду, получим

$$W_{pi} = k_w \left\{ \left[ F + \frac{M}{h(\varphi_i)[b_p + h(\varphi_i)tg(\psi_0 + C/(h(\varphi_i) + h_0) - dA_{pi})]} \right] A_{pi} + \frac{N}{h(\varphi_i)[b_p + h(\varphi_i)tg(\psi_0 + C/(h(\varphi_i) + h_0) - dA_{pi})]} \right\}, \quad (10)$$

где  $k_w$  – размерный коэффициент,  $F$ ,  $M$ ,  $N$  – постоянные величины.

Откуда следует, что удельные энергозатраты разрушения пласта одиночным резцом являются в общем случае нелинейной параболического типа функций сопротивляемости угля резанию и гиперболического типа функцией толщины среза асимптотически стремящейся к  $W_{pimin} = k_w F A_{pi}$ .

Нелинейность зависимости (10) обусловлена переменностью углового коэффициента, которым является сомножитель при  $A_{pi}$ , состоящий из двух частей - постоянной и переменной. Хотя переменная часть углового коэффициента и изменяется при изменении сопротивляемости угля резанию, однако, общая его величина с учетом того, что практически сопротивляемость угля резанию от нуля не изменяется (ее изменение находится в более узких пределах), является медленно меняющейся величиной в незначительных пределах (не более 10 %) и с достаточной для инженерных расчетов точностью, не нарушая физики процесса, может быть принята постоянной для данной толщины среза.

С учетом сказанного выражение (10) запишем в виде

$$W_{pi} = k_w \left\{ \left[ F + \frac{M}{S(\varphi_i)} \right] A_{pi} + \frac{N}{S(\varphi_i)} \right\}, \quad (11)$$

которое является практически линейной функцией сопротивляемости угля резанию, аргумент которой – величина случайная с распределением вероятностей по нормальному закону. Тогда, согласно [ 3 ], и удельные энергозатраты разрушения угля одиночным резцом являются величиной случайной с распределением вероятностей по нормальному закону

$$f(W_{pi}) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-0,5(W_{pi} - \bar{W}_{pi})^2 / \sigma_w^2} \quad (12)$$

с параметрами:

математическое ожидание 
$$\bar{W}_{pi} = k_w \left\{ \left[ F + \frac{M}{S(\varphi_i)} \right] \bar{A}_{pi} + \frac{N}{S(\varphi_i)} \right\},$$

среднеквадратичное отклонение 
$$\sigma_{w_{pi}} = \left| k_w \left[ F + \frac{M}{S(\varphi_i)} \right] \right| \sigma_{A_{pi}}.$$

**Разрушение пласта резцом с рабочей боковой гранью.** При разрушении пласта этим резцом рабочими являются уже три грани – передняя, задняя и одна из боковых граней. При этом разрушение пласта производится двумя гранями – передней и рабочей боковой. С этой целью последняя располагается под углом наклона  $\beta$ , рис. 2.

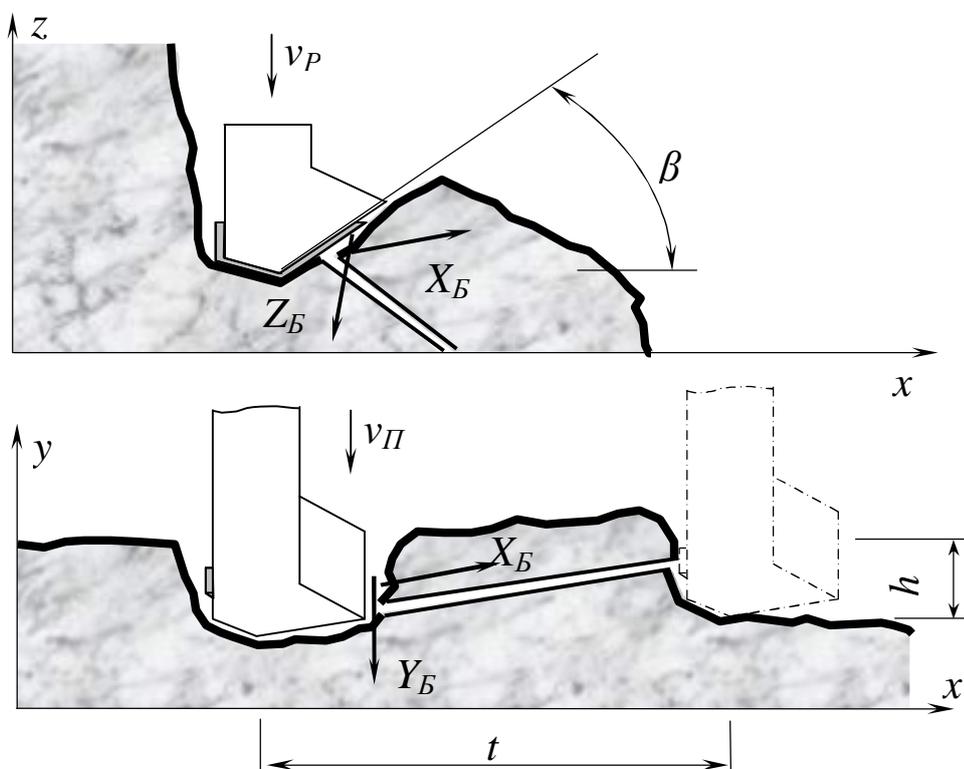


Рисунок 2 - Схема разрушения пласта резцом с рабочей боковой гранью

Разрушение пласта передней гранью рассматриваемого резца происходит аналогично его разрушению передней гранью резцом существующей конструкции. В этой связи, параметры разрушения массива передней гранью и для этого резца аналогичны приведенным выше параметрам для передней грани резца существующей конструкции. Остающийся не разрушенный межщелевой целик (при выборе соответствующим образом параметров разрушения) будет разрушаться рабочей боковой гранью. Разрушение межщелевого целика происходит путем сдвига его и, как показали специальные тензомет-

рические исследования, также сколами. Распределение вероятностей длины скола рабочей боковой гранью не противоречит закону Вейбулла. Тогда вероятность появления сколов с размерами от  $l_{1ci}$  (по тем же, что и выше, соображениям  $l_{1ci} = 0$ ) до  $l_{2ci}$  определится из выражения

$$P(l_{ci}) = \int_0^{l_{2ci}} f(\chi_{ci}) d\chi_{ci}. \quad (13)$$

Предельная максимальная величина  $l_{2ci}$  обуславливается теми же, что и предельная максимальная величина  $l_{2i}$ , и поэтому распределение ее вероятностей не противоречит нормальному закону

$$f(l_{2ci}) = \frac{1}{\sigma l_{2ci} \sqrt{2\pi}} e^{-0,5(l_{2ci} - \bar{l}_{2ci})^2 / \sigma l_{2ci}^2}. \quad (14)$$

Основные статистики для этой величины определяются из выражений

$$Ml_{ci} = \int_0^{l_{2ci}} \chi_{ci} f(\chi_{ci}) d\chi_{ci}, \quad (15)$$

$$Dl_{ci} = \int_0^{l_{2ci}} (\chi_{ci} - Ml_{ci})^2 f(\chi_{ci}) d\chi_{ci}.$$

Отметим, по крайней мере, две особенности разрушения массива рабочей боковой гранью резца и в этой связи процесс формирования длины скола. Во-первых, разрушение массива боковой гранью происходит при напряжении сдвига, разрушающая величина которого примерно на порядок ниже разрушающей величины напряжения сжатия. Поэтому сколы массива, вероятней всего, будут происходить по трещинам больших размеров. Это обуславливает повышенную вероятность появления сколов более крупных размеров. Во-вторых, эффективное разрушение массива происходит при наличии дополнительной обнаженной поверхности со стороны рабочей боковой грани. Поэтому предельная величина скола массива  $l_{2ci} = t/\cos\beta$ . По данным специальных тензометрических исследований установлено, разрушение массива резцом с рабочей боковой гранью происходит при расстоянии до свободной поверхности, равному удвоенному значению

ширины среза, принимаемой для резцов существующей конструкции. Тогда в общем случае можно записать, что  $l_{2ci} = k_t t / \cos \beta$ ,  $k_t \leq 2$ . Переходя к толщине среза и обозначая отношение  $t/h$  через  $k_{t/h}$ ,  $k_{t/h} \leq 3$ , предельную величину скола  $l_{2ci}$  запишем в виде  $l_{2ci} = k_t k_{t/h} h / \cos \beta$ . По данным тех же экспериментальных исследований установлено, что с вероятностью 0,5-0,6 длина скола находилась в пределах от 0 до  $k_{t/h} h$  и с вероятностью 0,4-0,5 – от  $k_{t/h} h$  до  $k_t k_{t/h} h / \cos \beta$ .

Учитывая те же особенности закона Вейбулла, можно на качественном уровне говорить о более вероятном появлении разрушенного угля, размеры гранул которого ближе к размерам  $0 - k_{t/h} h$ , чем угля, размеры гранул которого находятся в пределах  $k_{t/h} h - k_t k_{t/h} h / \cos \beta$ .

Отсюда также следует, что гранулометрический состав угля, разрушенного резцом с рабочей боковой гранью, выше по сравнению с его гранулометрическим составом, разрушенного резцом существующей конструкции.

Удельные энергозатраты разрушения угля резцом с рабочей боковой гранью

$$W_{\bar{\sigma}pi} = 1 / [\pi S_{\bar{\sigma}}(\varphi_i)] \int_0^{\pi} Z_{\bar{\sigma}ni}(\varphi_i) d\varphi_i. \quad (16)$$

Площадь среза рассматриваемым резцом с допускаемой погрешностью (без учета площади развала борозды резания с нерабочей боковой грани резца)

$$S_{\bar{\sigma}}(\varphi_i) = h(\varphi_i)(b_p + k_t k_{t/h} / \cos \beta). \quad (17)$$

При разрушении пласта одиночным резцом с рабочей боковой гранью отношение площади, на которой разрушение угля происходит путем раздавливания (сжатия) к площади среза,

$$\delta_{S_{\bar{\sigma}i}} = \frac{1}{1 + k_t k_{t/h} / (b_p \cos \beta)}. \quad (18)$$

Откуда следует, что при изменении  $k_{t/h}$ , при изменении, собственно, толщины среза (стружки) величина  $\delta_{S_{\bar{\sigma}i}}$  изменяется от 0 при  $h(\varphi_i) = 0$  ( $k_{t/h} = \infty$ ) до 1 при  $h(\varphi_i) = \infty$  ( $k_{t/h} = 0$ ). Физически это означает, что с увеличением толщины среза (стружки) указанные площади выравниваются.

Представляя полное усилие  $Z_{\bar{\sigma}ni}(\varphi_i)$  в виде  $Z_{\bar{\sigma}ni} = Z_{\bar{\sigma}i} + f(Y_{\bar{\sigma}i} + X_{\bar{\sigma}i} \cos \beta)$ , после интегрирования и приведения подобных, получим

$$W_{\bar{\sigma}pi} = k_w \left\{ \left[ F_{\bar{\sigma}} + \frac{M_{\bar{\sigma}}}{S_{\bar{\sigma}}(\varphi_i)} \right] A_{pi} + \frac{N_{\bar{\sigma}}}{S_{\bar{\sigma}}(\varphi_i)} \right\}, \quad (19)$$

где  $F_{\bar{\sigma}}$ ,  $M_{\bar{\sigma}}$ ,  $N_{\bar{\sigma}}$  - постоянные величины.

Выражение (19) является линейной функцией сопротивляемости угля резанию и гиперболической функцией площади (толщины) среза (стружки). Поэтому и для него справедливо полученный выше (см. выражения (12)) закон распределения вероятной для удельных энергозатрат разрушения массива резцом существующей конструкции - закон Гаусса параметрами:

$$\text{математическое ожидание } \bar{W}_{\bar{\sigma}pi} = k_w \left\{ \left[ F_{\bar{\sigma}} + \frac{M_{\bar{\sigma}}}{S_{\bar{\sigma}}(\varphi_i)} \right] \bar{A}_{pi} + \frac{N_{\bar{\sigma}}}{S_{\bar{\sigma}}(\varphi_i)} \right\},$$

$$\text{среднеквадратичное отклонение } \sigma_{W_{\bar{\sigma}pi}} = \left| k_w \left[ F_{\bar{\sigma}} + \frac{M_{\bar{\sigma}}}{S_{\bar{\sigma}}(\varphi_i)} \right] \right| \sigma_{A_{pi}}.$$

Из сравнения выражений (11) и (19) получаем: удельные энергозатраты разрушения массива резцами с рабочей боковой гранью значительно ниже удельных энергозатрат его разрушения, поскольку при незначительном увеличении полной силы резания (порядка 20 %) площадь среза (стружки) увеличивается довольно значительно (в среднем порядка 5-7 раз).

Таким образом, из выполненных исследований и полученных результатов, подтвержденных данными специальных тензометрических исследований, следует:

Разрушение пласта одиночным резцом как существующей конструкции, так и с рабочей боковой гранью по всем рабочим граням производится сколами, величина которых обуславливается, в первую очередь, для резцов существующей конструкции - толщиной среза (стружки), для резцов с рабочей боковой гранью – и расстоянием от рабочей боковой грани до свободной поверхности.

Длина скола с большей вероятностью принимает значения ближе к размерам мелких фракций угля (13, 18 мм) для резцов существующей конструкции и к размерам больших фракций для резцов с рабочей боковой гранью. При этом абсолютные значения этой вероятности для резца с рабочей боковой гранью больше.

Удельные энергозатраты разрушения угля для рассматриваемых типов резцов – величина случайная, распределение вероятностей которой не противоречит нормальному закону. При этом удельные энергозатраты разрушения угля резцом существующей конструкции

выше удельных энергозатрат его разрушения резцом с рабочей боковой гранью.

При разрушении пласта рабочим (исполнительным) органом очистного комбайна в процессе его разрушения одновременно участвует несколько резцов (как правило, до 25 для одного рабочего органа). Каждый из участвующих в процессе разрушения пласта резцов, занимая «свое» место на органе по его длине, разрушает и «свой» участок по ширине захвата. При этом толщина среза каждым резцом, изменяясь по близкому к синусоидальному закону, принимает значения от 0 при входе (выходе) резца в контакт (из контакта) с пластом, т.е. при угле его поворота 0 и  $\pi$  и  $h_{max} = V_k / (n_{op} n_{pl})$  в так называемой диаметральной плоскости, т.е. при угле поворота  $\pi/2$ . Здесь  $n_{op}$  и  $n_{pl}$  — соответственно частота вращения органа и число резцов в линии резания схемы набора режущего инструмента.

В зависимости от числа резцов в линии резания схемы набора режущего инструмента различают последовательный — при двух и более резцах в линии резания и шахматный рез — при одном резце в линии резания.

Здесь, как и ранее и по тем же причинам, будем рассматривать формирование гранулометрического состава угля для резцов забойной группы.

При последовательном резе резцы идут «след в след». Поэтому разрушение пласта производится с параметрами

$$h(\varphi) = h_{max} \sin \varphi, \quad t = t_y, \quad (20)$$

где  $t_y$  — шаг установки резцов на рабочем органе по его длине (ширине захвата).

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

$$S_n(\varphi) = h(\varphi)t_y, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi. \quad (21)$$

Откуда следует, что площадь среза резцами рабочего органа изменяются от 0 до  $S_{max} = h_{max}t_y$  при изменении угла поворота резцов в указанных пределах.

Гранулометрический состав угля, разрушенного рабочим органом, будет обуславливаться площадью определенного таким образом среза. Поэтому для дальнейшего анализа удобно ввести одномерный параметр гранулометрического состава угля — медианный диаметр,

— который адекватно отображал бы изменение основного параметра разрушения пласта рабочим органом — площадь среза. С этой целью определим медианный диаметр из условия равенства площади среза площади условного круга диаметром, равным медианному,

$$d_m = 2\sqrt{1/\pi h_{\max} t_y \sin \varphi}, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi, \quad (22)$$

величина которого изменяется от 0 до  $d_m^{\max} = 2\sqrt{1/\pi h_{\max} t_y}$  при изменении угла поворота в указанных пределах.

Удельные энергозатраты разрушения пласта рабочим органом

$$W_{p.op} = Z_{n.op} / S_{op} = Z_n n_p / [S(\varphi) n_p] = Z_n / S(\varphi), \quad (23)$$

где индексом «*op*» обозначена соответствующая величина, относящаяся к рабочему органу. Из приведенной зависимости следует, что удельные энергозатраты разрушения пласта органом определяются через удельные энергозатраты его разрушения одиночным резцом и численно им равны. Тогда удельные энергозатраты разрушения пласта рабочим органом с учетом выражения (11) запишем в виде

$$W_{p.op} = k_w \left[ \left( F + \frac{4M}{\pi d_m^2} \right) A_p + \frac{4N}{\pi d_m^2} \right], \quad (24)$$

решив которое относительно  $d_m$ , будем иметь

$$d_m = 2\sqrt{\frac{k_w(M+N)A_p}{\pi(W_p - k_w F A_p)}} = 2\sqrt{\frac{\bar{k}_w A_p}{\hat{W}_p}}. \quad (25)$$

Здесь  $\bar{k}_w = k_w(M+N)/\pi$ ,  $\hat{W}_p = W_p - k_w F A_p$ .

Откуда следует, что медианный диаметр гранул разрушенного угля рабочим органом пропорционален корню квадратному из сопротивляемости угля резанию и обратно пропорционален корню квадратному из удельных энергозатрат разрушения пласта, т.е. медианный диаметр гранул угля, разрушенного рабочим органом, увеличивается с увеличением сопротивляемости угля резанию и с уменьшением удельных энергозатрат его разрушения, что, в общем-то, не противоречит экспериментальным данным.

Поскольку удельные энергозатраты разрушения пласта являются гиперболической функцией толщины среза (стружки) асимптотически стремящейся к минимальной величине с ее увеличением, медианный диаметр гранул угля будет увеличиваться. Следовательно, одним из путей улучшения гранулометрического (сортового) состава угля, добытого очистным комбайном, рабочие органы которого ос-

нащены режущим инструментом существующей конструкции, является снижение удельных энергозатрат разрушения пласта.

Установим закон распределения вероятностей медианного диаметра гранул разрушенного угля. С этой целью зависимость (25) представим в виде

$$d_m = C_{wp} A_p^{1/2}, \quad C_{wp} = 2\sqrt{\bar{k}_w / \bar{W}_p}. \quad (26)$$

Согласно [ 3 ], для монотонной функции, в том числе и нелинейной, аргумент которой является случайной величиной, плотность распределения вероятностей медианного диаметра

$$g(d_m) = \frac{2C_m^2 d_m}{\sigma_{C_m^2 d_m^2} \sqrt{2\pi}} e^{-0,5C_m^2 (d_m^2 - \bar{d}_m^2)^2 / \sigma_{C_m^2 d_m^2}^2}, \quad C_m = 1/C_{wp}, \quad (27)$$

где  $\bar{d}_m$  - математическое ожидание медианного диаметра.

Или, обозначив  $C_m / \sigma_{C_m^2 d_m^2} = 1/\sigma_{d_m}$ , получим

$$g(d_m) = \frac{2C_m d_m}{\sigma_{d_m} \sqrt{2\pi}} e^{-0,5(d_m^2 - \bar{d}_m^2)^2 / \sigma_{d_m}^2}. \quad (28)$$

Полученное выражение не является строго нормально распределенной величиной из-за множителя  $2C_m d_m$ . При  $2C_m d_m \rightarrow 1$  выражение  $g(d_m)$  стремится к нормальному распределению вероятностей. Однако, с достаточной для инженерных расчетов точностью и получения оценочных значений медианного диаметра гранул разрушенного угля можно считать, что его размеры укладываются в интервал  $\bar{d}_m - 3\sigma_{d_m} \leq d_m \leq \bar{d}_m + 3\sigma_{d_m}$ .

Площадь сечения среза (стружки), определенная как произведение толщины среза на шаг установки резцов, вследствие переменности толщины стружки по мере поворота рабочего органа будет переменной и изменяющейся по закону изменения толщины среза, т.е.

$$S(\varphi) = h_{\max} t_y \sin \varphi = S_{\max} \sin \varphi, \quad S_{\max} = h_{\max} t_y. \quad (29)$$

В этом случае удобно перейти к средней величине площади сечения среза (стружки)

$$S_{cp} = 1/\pi S_{\max} \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi = 2/\pi S_{\max}. \quad (30)$$

Тогда средняя величина медианного диаметра гранул

$$d_{m.cp} = 2\sqrt{1/\pi S_{cp}}. \quad (31)$$

При скорости перемещения комбайна, например, 3,2 м/мин и принятых параметрах рабочего органа у комбайнов типа 1К-101 или

К-103 (частота вращения органа  $80 \text{ мин}^{-1}$ , 2 резца в линии резания и шаг установки резцов 4,5 см) сечение среза изменяется от 0 до  $9 \text{ см}^2$  при средней его величине  $5,7 \text{ см}^2$ . При этом величина медианного диаметра гранул разрушенного угля изменяется от 0 до 3,4 см при средней его величине 2,7 см. Физически это означает, что при указанном режиме работы комбайнов вероятностный гранулометрический состав разрушенного угля оценочно не превысит класса 25-50 мм при наиболее вероятном его составе 0 -25 мм.

Полученный на основании теоретических положений результат подтверждается данными рессева угля, добытого комбайном типа К-103 в лаве № 841 по пласту С<sub>8</sub> «нижний» на шахте «Западно-Донбасская» ГКХ «Павлоградуголь», проведенный в соответствии с требованиями ГОСТ2093-77. По данным рессева 63,23 % — уголь, размеры гранул которого находится в пределах от 0 до 25 мм, и 15,94 % — с размерами гранул 25-50 мм.

Снижение удельных энергозатрат разрушения пласта рабочим органом при увеличении площади сечения среза (см. (24)) или, что то же, при увеличении толщины среза (стружки) при постоянном шаге установки резцов по зависимости, близкой к гиперболе, и асимптотическое стремление их к минимальному для данной сопротивляемости угля резанию величине, а также зависимость медианного диаметра гранул разрушенного угля от удельных энергозатрат разрушения обуславливают тот факт, что если достигнут (выбран) такой режим работы комбайна (такая толщина среза), при котором удельные энергозатраты разрушения близки к минимальным, дальнейшая интенсификация режима работы комбайна (дальнейшее увеличение толщины среза) не дает желаемых результатов по улучшению гранулометрического (сортового) состава угля. Действительно, на основании (25) запишем

$$d_{m2} / d_{m1} = \sqrt{W_{p1} / W_{p2}}. \quad (32)$$

Положив  $W_{p1} = k_p W_{p.min}$ ,  $k_p \leq 1,2$  и  $W_{p2} = W_{p.min}$ , что достигается в этой зоне изменения толщины среза почти полутора кратным ее увеличением, получим

$$d_{m2} \leq d_{m1} \sqrt{k_p} = d_{m1} \sqrt{1,2} = 1,1d_{m1}, \quad (33)$$

т.е. почти полутора кратное увеличение толщины среза обуславливает увеличение медианного диаметра гранул угля до 10 % .

Отсюда следует, что при работе комбайна в рациональном или близком к нему режиме (удельные энергозатраты разрушения пласта

близки к минимальным) дальнейшая его интенсификация не желаемая, так как при значительном увеличении нагрузки комбайна не достигается желаемого результата по улучшению гранулометрического (сортового) состава добытого этим комбайном угля.

Увеличение толщины среза обуславливает пропорциональное увеличение площади сечения среза. Тогда используя зависимость (22) или (31), будем иметь

$$d_{m2} \leq d_{m1} \sqrt{k_h} = d_{m1} \sqrt{1,5} = 1,22d_{m1}, \quad (34)$$

где  $k_h$  – увеличение толщины среза (стружки).

Отсюда следует, что хотя увеличение медианного диаметра гранул и не пропорционально увеличению толщины среза, тем не менее значительно больше, чем за счет уменьшения удельных энергозатрат разрушения пласта.

Полученный на основании разработанных теоретических положений результат подтверждается наблюдаемыми данными натурных испытаний работы комбайна типа К-103 с пространственно динамически уравновешенными шнеками, обеспечивающими повышение примерно в 1,5 раза скорости его перемещения, проведенными на шахте «Западно-Донбасская» в лаве № 841 пласту С<sub>8</sub> «нижний». При повышении скорости перемещения в 1,5 раза (с 3,0 до 4,5 м/мин) наблюдалось улучшение гранулометрического (сортового) состава угля с одновременным снижением запыленности рудничной атмосферы.

На основании выполненных исследований и полученных результатов можно сделать следующее заключение: гранулометрический (сортовой) состав угля, разрушенного рабочим органом, оснащенным режущим инструментом существующей конструкции, можно оценивать медианным диаметром гранул, являющийся случайной величиной, зависящей как от удельных энергозатрат разрушения, так и площади сечения среза (стружки). При работе комбайна в рациональном или близком к нему режиму дальнейшая интенсификация режима его работы не ведет к пропорциональному увеличению интенсификации режима работы комбайна улучшению гранулометрического (сортового) состава угля.

Для обеспечения шахматного реза режущий инструмент располагается на лопастях шнека с шагом, равным удвоенному значению ширины среза по схеме его набора, т.е.  $t_y = 2t$ , где  $t$  – ширина среза. При этом резцы, установленные на разных лопастях, смещены друг относительно друга по длине шнека (ширине захвата) на ширину среза. Таким образом, фактическое разрушение пласта происходит с ши-

риной среза, равной удвоенному значению ширины среза по схеме набора режущего инструмента. Кроме того, при таком резе разрушение пласта происходит с различной его обнаженностью. Часть пласта, равная половине толщины среза, разрушается при обнажении его с трех сторон, вторая его часть, равная тоже половине толщины среза, разрушается при обнажении только с одной стороны, как и при последовательном резе.

Поэтому формирование гранулометрического состава угля при шахматном резе, вероятно, надо рассматривать как две фазы процесса, одна из которых происходит при трехстороннем обнажении части пласта, вторая – аналогично процессу его разрушения при последовательном резе, причем фактические параметры реза и для первой и для второй фаз процесса будут: половинная толщина среза от получаемой расчетом по скорости перемещения комбайна и частоте вращения шнека и удвоенная ширина среза по схеме набора режущего инструмента, т.е.

$$h_{uu}(\varphi) = \frac{V_k}{2n_{op}n_{pl}} \sin \varphi, \quad t_{uu} = t_y = 2t. \quad (35)$$

Площади сечения среза (стружки) для различных фаз процесса разрушения пласта, вероятно, будут различными и равными:

для первой фазы

$$S'_{uu}(\varphi) = h_{uu}(\varphi)t_{uu} = \frac{V_k t}{n_{op}n_{pl}} \sin \varphi, \quad (36)$$

для второй фазы

$$S''_{uu}(\varphi) = h_{uu}(\varphi)[b_p + h_{uu}(\varphi)tg\psi]. \quad (37)$$

Последнее обусловлено тем, что рез фактически происходит при удвоенному значению ширины среза и, вероятно, будет близок к полу- или даже заблокированному.

Тогда медианные диаметры гранул

$$d'_{m_{uu}} = 2\sqrt{1/\pi S'_{uu}(\varphi)}, \quad d''_{m_{uu}} = 2\sqrt{1/\pi S''_{uu}(\varphi)}. \quad (38)$$

**Разрушение пласта в первой фазе процесса** происходит при трехстороннем обнажении разрушаемой части пласта – с боков и со стороны рабочего органа. При этом резцом доразрушается та часть межщелевого целика, которая не само разрушилась под действием естественного напряженного состояния угля, и имеющая в не разрушенном состоянии трапецеидальное сечение (с учетом развала борозды резания). Взаимодействие резца с этой частью пласта происходит

по середине уступа, в котором создается напряжение сжатия и под действием которого он разрушается. Поскольку на размеры гранул разрушающегося таким образом угля межщелевого целика оказывает влияние, как отмечалось выше, много факторов, большинство из которых являются случайными, очевидно, распределение вероятностей их размера, согласно центральной предельной теоремы [ 3 ], не противоречит нормальному закону. На основании этого запишем

$$f(d'_{mu}) = \frac{1}{\sigma_{d'_{mu}} \sqrt{2\pi}} e^{-0,5(d'_{mu} - \bar{d}'_{mu})^2 / \sigma_{d'_{mu}}^2}, \quad (39)$$

с параметрами:

математическое ожидание  $\bar{d}'_{mu} = \sqrt{1/\pi S'_{max}(\varphi)} = \sqrt{1/\pi h_{max} t}$  ,

среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{d'_{mu}} = 1/3 \sqrt{1/\pi h_{max} t}$  .

Приняв, например, режим работы комбайна такой, при котором максимальное сечение среза равно рекомендуемому ОСТ 12.44.258-84 [ 4 ] и составляет  $15 \text{ см}^2$ , получим: математическое ожидание  $\bar{d}'_{mu} = 2,18 \text{ см}$  , среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{d'_{mu}} = 0,73 \text{ см}$  .

Тогда распределение вероятностей размера гранул разрушенного при трехстороннем обнажении угля оценочно составит:

|                   |     |      |       |       |       |
|-------------------|-----|------|-------|-------|-------|
| Размер гранул, мм | 0-6 | 6-13 | 13-18 | 18-25 | 25-50 |
| Вероятность, %    | 2   | 14   | 26    | 24    | 34    |

В общем случае вероятность гранул любого размера в этом случае определится из выражения [ 3 ]

$$P\{d'_{mu1} \leq d'_{mu} \leq d'_{mu2}\} = \Phi\left(\frac{d'_{mu2} - \bar{d}'_{mu}}{\sigma_{d'_{mu}}}\right) - \Phi\left(\frac{d'_{mu1} - \bar{d}'_{mu}}{\sigma_{d'_{mu}}}\right), \quad (40)$$

где  $\Phi(*)$  – функция Лапласа.

**Разрушение пласта во второй фазе процесса** происходит при обнажении массива пласта с одной стороны – со стороны рабочего органа и рез осуществляется с удвоенной шириной среза по схеме набора режущего инструмента и, вероятно, будет близок к заблокированному. Поэтому площадь среза в этом случае равна площади развала борозды резания и определяться по зависимости (37), а медианный диаметр гранул – по зависимости (38) для  $d''_{mu}$  . Из этого следует, что разрушение пласта во второй фазе – это разрушение массива одиночным резом существующей конструкции. Поэтому для этой фазы процесса разрушения пласта рабочим органом имеют место приве-

денные выше соотношения, в том числе и для гранулометрического состава разрушенного угля.

При сопротивляемости угля резанию, например, 200 даН/см и указанном для первой фазы разрушения режиме работы комбайна максимальная площадь развала борозды резания составляет  $5,6 \text{ см}^2$ , максимальное значение медианного диаметра гранул – 2,7 см. Тогда вероятный гранулометрический состав разрушенного угля во второй фазе оценочно составит: около 60 % с размерами гранул от 0 до 13 мм и 40 % с размерами гранул свыше 13 мм.

Вероятный гранулометрический состав угля, разрушенного шахматным резом для указанного режима работы комбайна и принятой сопротивляемости угля резанию оценочно составит: 28 % с размерами гранул до 13 мм, 47 % с размерами гранул 13-25 мм и 25 % с размерами гранул свыше 25 мм.

Результаты выполненных специальных, в том числе и тензометрических исследований процесса разрушения как углецементного блока (лабораторные исследования), так и пласта (шахтные исследования) подтверждают данные, полученные расчетом по разработанной математической модели, описывающей формирование гранулометрического состава угля при разрушении его рабочим органом очистного комбайна, оснащенного режущим инструментом существующей конструкции (максимальная величина расхождения числовых показателей не превышает 12 %). При этом как расчетом по математической модели, так и экспериментально получено, что гранулометрический (сортовой) состав угля, разрушенного шахматным резом, всегда выше гранулометрического его состава, разрушенного при последовательном резе.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса разрушения пласта рабочим органом очистного комбайна и формирования гранулометрического состава угля при возможных и применяемых в настоящее время резах – последовательном или шахматном, - представляет собой многомерный случайный процесс, случайный характер которого обуславливается случайным характером его составляющих и учитывающий: характер реза (последовательный или шахматный), сопротивляемость угля резанию (нормальный закон распределения вероятностей) и его хрупко-пластические свойства (вязкий, хрупкий или весьма хрупкий), горнотехнические условия отработки пласта (коэффициент отжима пласта), трещиноватость пласта (случайная величина), режим работы комбайна (толщина среза), па-

раметры схемы набора режущего инструмента (ширина среза) и ряд других факторов. Результаты, получаемые по математической модели, и данные экспериментальных исследований с достаточной для инженерных расчетов точностью (максимальная величина ошибки числовых данных не превышает 12 %) совпадают. Следовательно, есть основания считать, что разработанная модель процесса разрушения пласта рабочим органом очистного комбайна и формирования гранулометрического состава разрушенного угля адекватна или, по крайней мере, не противоречит реальным процессам.

Разработанный режущий инструмент с рабочей боковой гранью отличается от режущего инструмента существующей конструкции одной принципиальной особенностью, а именно: разрушение пласта производится путем создания в его массиве сложного объемного комбинированного напряженного состояния, сочетающего напряжения сжатия и сдвига. При этом напряжения сжатия в массиве создаются теми же передней и задней гранями, напряжение сдвига – рабочей боковой гранью. Поскольку сопротивление горных пород, в том числе и угля разрушению сдвигом значительно (примерно на порядок) ниже сопротивления разрушению сжатием, процесс разрушения угля резцом с рабочей боковой гранью, как показали исследования, менее энергоемок.

Расположение режущего инструмента с рабочей боковой гранью на рабочем органе должен быть таким, чтобы его рабочая боковая грань всегда находилась со стороны вновь обнаженной поверхности резцом, расположенным впереди.

При этом кутковая группа резцов может состоять как из резцов существующей конструкции, так и резцов с рабочей боковой гранью. Необходимым условием для эффективного разрушения пласта является такое расположение резцов, при котором всегда создавался бы опережающий вруб, т.е. начальная дополнительная обнаженная поверхность. В качестве режущего инструмента для создания опережающего вруба должен использоваться режущий инструмент или существующей конструкции, или аналогичный ему по конструкции и параметрам.

Теоретически разрушение пласта рабочим органом, оснащенным режущим инструментом с рабочей боковой гранью, может производиться как по схеме последовательного, так и шахматного реза.

**Разрушение пласта по схеме последовательно реза** происходит при двух и более резах в линии резания. При этом каждым резцом рабочего органа разрушается часть пласта объемом

$$V_{p\bar{\sigma}}(\varphi) = k_t l_{\bar{\sigma}} h_{\max} t_y \sec \beta \sin \varphi = V_{p\bar{\sigma} \max} \sin \varphi, \quad V_{p\bar{\sigma} \max} = k_t l_{\bar{\sigma}} h_{\max} t_y \sec \beta. \quad (41)$$

Величина разрушаемого каждым резцом рабочего органа объема, как следует из (41), изменяется от 0 до  $V_{p\bar{\sigma} \max}$  при изменении угла его поворота от 0 до  $\pi/2$  и от  $V_{p\bar{\sigma} \max}$  до 0 при изменении угла поворота от  $\pi/2$  до  $\pi$ . При этом разрушение – сдвиг – этого объема происходит по площади  $S_{\bar{\sigma} \delta} = k_t l_{\bar{\sigma}} t_y \sec \beta$ , максимально возможная, т.е. предельная длина скола, обусловленная разрушением пласта режущим инструментом, может составлять  $l_{\bar{\sigma} \max} = k_t t_y \sec \beta$ . Фактическое разрушение указанного объема угля будет происходить с параметрами, которые обусловлены трещиноватостью массива пласта, сопротивляемостью угля резанию в месте установки резца и других указанных выше факторов, большинство из которых являются случайными.

Для характеристики гранулометрического состава разрушенного рабочим органом угля введем медианный диаметр условного шара, объем которого равен объему разрушаемого каждым резцом угля,

$$d_{m\bar{\sigma}}(\varphi) = 1,823 \sqrt[3]{1/\pi V_{p\bar{\sigma} \max} \sin \varphi}. \quad (42)$$

Величина этого параметра изменяется от 0 до  $d_{m\bar{\sigma} \max}$  и от  $d_{m\bar{\sigma} \max}$  до 0 при изменении угла поворота органа (резца) от 0 до  $\pi$ . Характер медианного диаметра, который обусловлен многими факторами и большинство из которых являются случайными, будет случайным. Несмотря на то, что составляющие медианного диаметра подчиняются различным законам распределения вероятностей, при совместном их проявлении в пространстве и во времени, что и имеет место при разрушении пласта режущим инструментом, согласно центральной предельной теореме [ 3 ], будет подчиняться нормальному закону распределения вероятностей. Поэтому в дальнейшем, как и раньше, для характеристики гранулометрического состава угля, разрушенного рабочим органом, оснащенного режущим инструментом с рабочей боковой гранью, будем считать медианный диаметр гранул нормально распределенной случайной величиной с плотностью распределения вероятностей

$$f(d_{m\bar{\sigma}}) = \frac{1}{\sigma_{d_{m\bar{\sigma}}} \sqrt{2\pi}} \exp[-0,5(d_{m\bar{\sigma}} - \bar{d}_{m\bar{\sigma}})^2 / \sigma_{d_{m\bar{\sigma}}}^2] \quad (43)$$

с параметрами:

математическое ожидание  $\bar{d}_{m\bar{\sigma}} = 1/2d_{m\bar{\sigma}\max} = 0,9\sqrt[3]{k_t l_{\bar{\sigma}} h_{\max} t_y \sec \beta}$ ,

среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{d_{m\bar{\sigma}}} = 0,3\sqrt[3]{k_t l_{\bar{\sigma}} h_{\max} t_y \sec \beta}$ .

Сравнивая полученную выше зависимость для медианного диаметра при последовательном резе резцами существующей конструкции с медианным диаметром для такого же реза резцами с рабочей боковой гранью для максимальных их значений, будем иметь

$$\mu_{d_{m\max}} = \frac{0,9\sqrt[3]{1/\pi k_t l_{\bar{\sigma}} h_{\max} t_y \sec \beta}}{\sqrt{1/\pi h_{\max} t_y}}. \quad (44)$$

Для принятых параметров схемы набора режущего инструмента существующей конструкции и других параметров современных очистных комбайнов, например, типа 1К-101, К-103 и режиме их работы, при котором максимальная толщина среза составляет, например, 3 см (скорость перемещения комбайна 4,8 м/мин) и параметрах режущего инструмента с рабочей боковой гранью:  $l_{\bar{\sigma}} = 45$  мм,  $\beta = 45^\circ$  получаем  $\mu_{d_{m\max}} \cong 1,7$ . Для этих же параметров и режима работы комбайна отношения математических ожиданий и среднеквадратичного отклонения медианных диаметров, соответственно, составляют 1,7 и 1,6 раза. Тогда вероятный гранулометрический состав угля оценочно будет:

при разрушении существующим режущим инструментом

|                          |       |        |         |         |         |         |
|--------------------------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| <i>размер гранул, мм</i> | 0 – 7 | 7 – 14 | 14 – 21 | 21 – 28 | 28 – 35 | 35 – 42 |
| <i>вероятность, %</i>    | 2     | 14     | 34      | 34      | 14      | 2       |

при разрушении резцами с рабочей боковой гранью

|                          |        |         |         |         |         |         |
|--------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <i>размер гранул, мм</i> | 0 – 11 | 11 – 22 | 22 – 33 | 33 – 44 | 44 – 55 | 55 – 66 |
| <i>вероятность, %</i>    | 2      | 14      | 34      | 34      | 14      | 2       |

Перейдя к принятой градации гранулометрического состава угля, получим:

|                          |       |        |         |         |         |          |
|--------------------------|-------|--------|---------|---------|---------|----------|
| <i>размер гранул, мм</i> | 0 – 6 | 6 – 13 | 13 – 18 | 18 – 25 | 25 – 50 | 50 – 100 |
|--------------------------|-------|--------|---------|---------|---------|----------|

при разрушении существующим режущим инструментом

|                       |   |    |    |    |    |   |
|-----------------------|---|----|----|----|----|---|
| <i>вероятность, %</i> | 2 | 16 | 28 | 34 | 20 | — |
|-----------------------|---|----|----|----|----|---|

при разрушении резцами с рабочей боковой гранью

|                       |   |   |   |    |    |   |
|-----------------------|---|---|---|----|----|---|
| <i>вероятность, %</i> | 1 | 4 | 9 | 25 | 52 | 9 |
|-----------------------|---|---|---|----|----|---|

Откуда следует, что применение режущего инструмента с рабочей боковой гранью значительно улучшает гранулометрический (сортовой) состав добытого угля современными очистными комбайнами.

С учетом гранулометрического состава (штыба, размер гранул 0 – 6 мм) угля, разрушаемого резцами кутковой группы, вероятный гранулометрический состав угля оценочно будет:

| размер гранул, мм                                | 0–6 | 6–13 | 13–18 | 18–25 | 25–50 | 50–100 | св.100 |
|--|-----|------|-------|-------|-------|--------|--------|
| при разрушении существующим режущим инструментом |     |      |       |       |       |        |        |
| вероятность, %                                   | 22  | 13   | 22    | 27    | 16    | —      | —      |
| при разрушении резцами с рабочей боковой гранью  |     |      |       |       |       |        |        |
| вероятность, %                                   | 21  | 3    | 7     | 20    | 42    | 7      | —      |

**Разрушение пласта по схеме шахматного реза** резцами с рабочей боковой гранью, очевидно, является нерациональным. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Во-первых, определяемые расчетом и многократно проверенные и подтвержденные на практике значения ширины среза, составляющие от 40 до 55 мм у современных очистных комбайнов, исполнительные органы которых оснащаются режущим инструментом существующей конструкции (резцы типа ЗР4-80), для резцов с рабочей боковой гранью (типа ЗРБ2-80) даже при сохранении тех же основных положений, которые использованы при определении ширины среза для резцов существующей конструкции, практически удваиваются и составляют 80 – 110 мм. При шахматном резе фактическая ширина среза резцами удваивается и будет составлять 160-220 мм. Это, вероятно, приведет к режиму так называемого заблокированного реза, самого невыгодного разрушения пласта как с силовых (заклинивание инструмента), энергетических параметров (высокие удельные энергозатраты), так и износу и прочности инструмента. Во-вторых, значительное увеличение ширины среза (или шага установки) резцов обуславливает значительное уменьшение режущего инструмента на рабочем органе, а это в свою очередь приведет к увеличению неравномерности формирующейся на органе нагрузки и, как следствие, — к увеличению динамики комбайна в целом. В этой связи вопрос о формировании гранулометрического состава угля при разрушении пласта рабочим органом комбайна, оснащенного режущим инструментом с рабочей боковой гранью в работе не рассматривался.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса формирования гранулометрического состава угля при разрушении пласта рабочим органом очистного комбайна, оснащенного режущим инструментом с рабочей боковой гранью, представляет собой многомерную случайную величину с распределением вероятностей, не противоречащего нормальному закону, и является адекватной реальному

процессу его формирования для рассматриваемых исполнительных органов и очистных комбайнов.

Большинство (68 %) пластов Донбасса, разрабатываемых в настоящее время и намечаемых к разработке в ближайшей перспективе, - пласты сложного строения, содержащие прослойки породы (до 10 % от мощности пласта) и твердые минеральные включения в виде пирита, кварцита, сернистого колчедана и др. Расположение прослоек по высоте (мощности пластов) практически равномерное, расположение твердых включений – случайное. Наиболее распространенными породами прослоек являются: углистые сланцы, аргиллит и алевролит, сопротивляемость резанию которых соизмерима с сопротивляемостью угля резанию.

При расположении прослойка мощностью  $H_{np}$  в верхней или нижней части (у кровли или у почвы) пласта угол поворота органа, на протяжении которого производится его разрушение

$$\varphi_{np} = \arccos\left(1 - \frac{2H_{np}}{D_{op}}\right) = \arccos\left(1 - \frac{2\delta H}{D_{op}}\right), \quad (45)$$

где  $\delta$  - относительная величина мощности прослойка от мощности пласта  $H$ .

Тогда величина медианного диаметра гранул пород разрушаемого прослойка будет:

при разрушении резцами существующей конструкции

$$d_{m,np} = 2\sqrt{1/\pi h_{\max} t_y \sin \varphi_{np}}, \quad (46)$$

при разрушении резцами с рабочей боковой гранью

$$d_{m\sigma}^{np} = 1,823\sqrt{1/\pi k_t l_{\sigma} h_{\max} t_y \sec \beta \sin \varphi_{np}}. \quad (47)$$

И в том и в другом случае, т.е. при разрушении пласта рабочим органом комбайна, оснащенным как резцами существующей конструкции, так и резцами с рабочей боковой гранью на формирования гранулометрического состава разрушенной породы прослойка оказывает влияние довольно много факторов, таких, например, как расположение и мощность прослойка, тип и структура породы, сопротивляемость ее резанию и ряд других, большинство из которых являются случайными. Поэтому есть все основания считать, что при совмещенном в пространстве и во времени их проявлении, что, собственно, и происходит в процессе разрушения пласта рабочим органом комбайна, распределение вероятностей медианного диаметра гранул по-

роды, а следовательно, и гранулометрического ее состава не противоречит закону Гаусса,

$$f(d_{m.np}) := N\{\bar{d}_{m.np}, \sigma_{d_{m.np}}\}, \quad f(d_{m\sigma}^{np}) := N\{\bar{d}_{m\sigma}^{np}, \sigma_{d_{m\sigma}^{np}}\} \quad (48)$$

с параметрами:

математическое ожидание

$$\bar{d}_{m.np} = \sqrt{1/\pi h_{\max} t_y}, \quad \bar{d}_{m\sigma}^{np} = 0,9\sqrt[3]{1/\pi k_t l_\sigma h_{\max} t_y \sec \beta},$$

среднеквадратичное отклонение

$$\sigma_{d_{m.np}} = 0,33\sqrt{1/\pi h_{\max} t_y}, \quad \sigma_{d_{m\sigma}^{np}} = 0,30\sqrt[3]{1/\pi k_t l_\sigma h_{\max} t_y \sec \beta},$$

При мощности прослойка, например, 5 см и режиме работы комбайна, при котором толщина среза составляет 2 см (для комбайнов типа 1К-101 и К-103 скорость перемещения 3,2 м/мин), и других параметрах, принятых у современных очистных комбайнов,  $d_{m.np} = 2,35$  см и  $d_{m\sigma}^{np} = 4,72$  см. Тогда, согласно расчету, с учетом породы, разрушенной резцами кутковой группы, вероятное распределение гранулометрического состава разрушенной породы прослойка будет: примерно 25-27 % штыба (0-6 мм) и 32-35 % гранул класса 6-13 мм в первом случае и 22-23 % штыба и 12-15 % гранул класса 6-13 мм во втором случае. Наличие довольно большого объема мелких фракций породы в разрушенном угле значительно затрудняет впоследствии его обогащение. Существующие в настоящее время обогатительные машины и процессы практически не могут обогащать смешанные мелкие фракции угля и породы и весь уголь этих фракций и порода уходят в отвалы.

В случае присечки вмещающих пород с целью обеспечения так называемой вписываемости механизированной крепи в пласт разрушение их происходит, как правило, при незначительных сечениях среза, а следовательно, и малых медианных диаметрах гранул, что обуславливает значительное количество горной массы мелких фракций с вытекающими отсюда последствиями при ее обогащении.

При расположении прослойка по середине мощности пласта площадь сечение среза или объем, разрушаемый резцами, равны максимальным их значениям и определяются по приведенным выше зависимостям (46) — (48), положив  $\varphi_{np} = \pi/2$ . Поэтому гранулометрический (сортовой) состав породы разрушенного прослойка в этом случае улучшается. Так, для рассматриваемого выше примера  $S_{ср.маx} = 9$  см<sup>2</sup> и  $V_{р.маx} = 115$  см<sup>3</sup>, а вероятный фракционный состав породы прослойка с учетом породы, разрушенной резцами кутковой

группы, составляет: 28-30 % штыба и 12-15 % гранул класса 6-13 мм в первом и 15-17 % штыба и 9-10 % гранул класса 6-13 мм во втором случае. При этом, следует отметить, происходит значительное увеличение относительного объема гранул крупных классов, особенно, во втором случае, т.е. при разрушении пласта рабочим органом, оснащенным резцами с рабочей боковой гранью.

При разрушении прослоек, состоящих из углистых сланцев, представляющих собой ярко выраженную слоистую структуру толщиной слоя, изменяющегося в пределах нескольких миллиметров (обычно 3 – 7 мм), довольно хрупкого материала, максимальные размеры его при разрушении режущим инструментом обуславливаются параметрами резания. Тот фракционный состав углистых сланцев, который получается после погрузки его исполнительным органом комбайна на конвейер и транспортировки конвейером по лаве, относится, как правило, к мелким фракциям – порядка 0 — 13 мм.

Практически все пласты сложного строения содержат твердые минеральные, как правило, не прорезаемые из-за очень высокой сопротивляемости резанию включения. Для угольных пластов Донбасса удельное содержание твердых включений достигает 0,4 % при следующих их параметрах: площадь – 5–150 см<sup>2</sup>, длина – 5–25 см, высота – 1-6 см, число включений – от 10 до 120 на 100 м длины лавы [ 5 ]. Из этого следует, что встреча режущего инструмента с твердым включением относится к классу так называемых редких явлений. Это обусловлено как их незначительным объемом и относительно параметров лавы и исполнительного органа комбайна незначительными размерами, так и тем, что наличие в пласте твердых включений не является полной гарантией того, что режущий инструмент обязательно с ним должен встретиться. Это особенно относится к резцам с рабочей боковой гранью, ширина среза которых значительно больше ширины среза резцами существующей конструкции и составляет в среднем 90 – 110 мм.

Вероятность встречи резца с твердым включением, относящаяся к редким явлениям, с достаточной для практики и понимания физической картины процесса точностью может быть описана законом Пуассона [ 3 ]

$$P_n = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (49)$$

где  $\lambda$  - математическое ожидание.

Характерной особенностью закона Пуассона является то, что для него математическое ожидание и дисперсия случайной величины равны между собой [ 3 ], т.е.

$$M\{CB\} = D\{CB\} = \lambda. \quad (50)$$

Здесь  $CB$  – случайная величина.

Если математическое ожидание (средняя величина) числа твердых включений на 1 м длины лавы составляет  $\kappa_m$ , то вероятность хотя бы одной встречи резца с твердым включением

$$P_1 = \kappa_m e^{-\kappa_m}. \quad (51)$$

Так, например, для максимальной величины математического ожидания числа твердых включений, получаемого из приведенного выше среднего числа твердых включений на 100 м лавы, и равного  $1,2 \text{ м}^{-1}$ , согласно (50), вероятность хотя бы одной встречи резца с твердым включением на протяжении 1 м лавы составит 0,36.

Аналогично можно определить вероятность других характеристик или параметров твердых включений, например, расположение их по мощности пласта, габаритов и т.д.

Наличие твердых включений в пласте еще не является гарантией того, что режущий инструмент обязательно должен с ними встретиться. Это относится в первую очередь к резцам с рабочей боковой гранью, параметры разрушения которых соизмеримыми и даже больше параметров (размеров) твердых включений или при разрушении пласта рабочим органом по схеме шахматного реза для резцов существующей конструкции. Это, собственно, и подтверждается приведенной величиной вероятности встречи резца с твердым включением на протяжении 1 м лавы.

При встрече резца с твердым включением последнее или выбивается из пласта, или происходит опрокидывание двигателя (или двигателей при многодвигательном приводе) исполнительного комбайна в зависимости от параметров твердого включения. И в том, и в другом случаях часть или практически вся энергия вращающихся элементов конструкции привода исполнительного органа и ротора двигателя (двигателей) расходуется на дополнительную деформацию системы привода и, как следствие, обуславливает увеличение нагрузки этой системы, происходит так называемый выброс нагрузки выше установленного для нормального режима работы комбайна уровня. Указанные явления, хотя и относятся к редким (малая вероятность встречи), являются, однако, важными для прочности указанных элементов конструкции и практически не оказывают влияния на процесс

формирования гранулометрического (сортового) состава разрушенного рабочим органом комбайна угля.

Таким образом, из вышеизложенного и полученных результатов следует, что формирование гранулометрического состава угля при разрушении пластов сложной структуры является случайным процессом, особенностью которого является разрушение и формирование гранулометрического состава породы породных прослоек и встречи резцов с твердыми не прорезаемыми режущим инструментом включениями. Установлено, что процесс формирования гранулометрического состава разрушаемой породы прослоек является случайным, распределение вероятностей которого не противоречит нормальному закону и на который оказывает влияние ряд факторов и в первую очередь – расположение прослойка по высоте (мощности) пласта, его мощность, тип породы и т.д. Имеющие место выбросы нагрузки, обусловленные встречей режущего инструмента с твердыми не прорезаемыми твердыми включениями, практически не оказывают влияния на формирования гранулометрического (сортового) состава угля при разрушении пластов сложного строения исполнительными органами современных очистных комбайнов.

#### Список источников

1. Позин Е.З. Сопrotивляемость углей разрушению режущими инструментами. М., Наука, 1972. – 240 с.
2. Бойко Н.Г. Теория рабочих процессов комбайнов для добычи угля из тонких пологих пластов. Дисс. ... докт.техн.наук. – М., МГИ, 1985. – 287 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., Наука, 1964. – 576 с.
4. ОСТ 12.44.258.-84 «Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика» Группа Г41.М., Минуглепром СССР, 1984.- 108 с.
5. Моделирование разрушения углей режущими инструментами // Ю.Д. Красников, отв.ред. М., Наука, 1981. – 181 с.