

УДК 531.781

**А. Л. Майстренко**, чл.-корр. НАН Украины; **В. И. Куц**, докт. физ.-мат. наук; **С. И. Шестаков**, канд. техн. наук; **И. А. Свешников**, докт. техн. наук;  
**С. Д. Заболотный**, **С. Ф. Беспалов**, инженеры

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ САМОВРАЩЕНИЯ РЕЗЦА НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГОРНОЙ ПОРОДОЙ**

*A theoretical model has been developed that describes the behavior of self-rotating cutters during their contact interaction with a rock. For self-rotating cutters of the «CHAMPION Equipment Co. (SEC)», USA, with cylinder-conic carbide rock destruction elements, the values of the normal  $P_y$  and tangential  $P_z$  components of the cutting force have been defined. The values are in good agreement with the experimental data. The effect of the tool cutting edge blunting on the cutting force components has been studied. In the mode of a computerized experiment, the range of the cutting parameters variation has been assessed, at which the conditions of the cutter self-rotation are met.*

Большинство буровых долот, применяемых в США, Германии, Италии, Украине и во многих других странах, оснащены самовращающимися резцами. Как правило, такие резцы оснащаются твердосплавными породоразрушающими элементами и отличаются высокой производительностью и износостойкостью. С другой стороны, нарушение условий самовращения указанных резцов может привести к прерывистому вращению или даже к их работе в режиме заблокированного резания. Последнее особенно часто встречается при бурении скважин по прочным абразивным породам. Это приводит к преждевременному выходу из строя бурового инструмента вследствие прогрессирующего одностороннего износа породоразрушающих элементов.

Прерывистое вращение с периодическими остановками при резании прочных пород и, в частности, тербовлянского песчаника наблюдалось и у резцов фирмы «CHAMPION Equipment Co. (SEC)» (США), оснащенных цилиндроконическими твердосплавными породоразрушающими элементами (рис. 1).

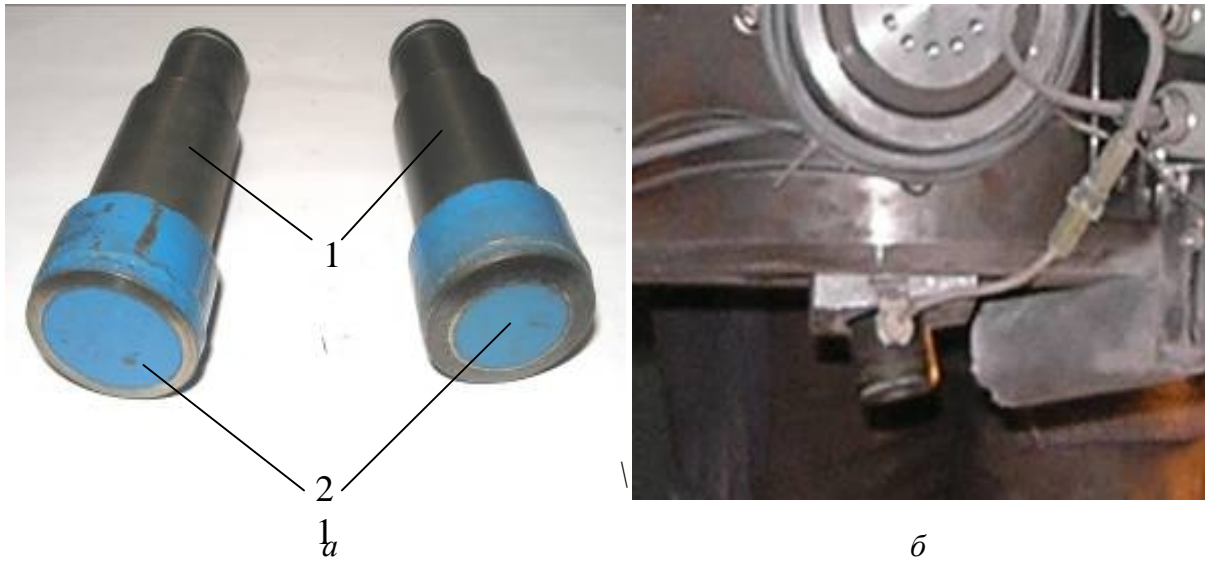


Рис. 1. Самовращающиеся резцы фирмы «CHAMPION Equipment Co. (CEC)» (США): а – их расположение в корпусе испытательной установки; б– 1 – державка резца; 2 – твердосплавный породоразрушающий элемент.

Теоретические и экспериментальные исследования указанных резцов различного профиля проводились в ИСМ НАН Украины в рамках заключенного партнерского проекта и были направлены на определение условий их самовращения для различных режимов бурения путем анализа основных составляющих усилия резания.

Как свидетельствуют экспериментальные исследования [1–3], механизм разрушения породы в большинстве случаев является пороговым с пилообразным изменением во времени горизонтальной  $P_z$  и вертикальной  $P_y$  составляющих силы резания. Естественно предположить, что указанные силы, действующие на границе контакта, максимальны в момент макророскола, т. е. когда напряжения и необратимые деформации в породе достигают критического (разрушающего) значения.

Даже поверхностный анализ экспериментальных данных (подобно приведенным на рис. 2) показывает, что составляющая  $P_z$  пропорциональна  $P_y$  во всем диапазоне изменения глубины  $h$  и шага резания  $L$ . Легко заметить, что существует очевидная корреляция не только между усредненными по времени значениями полных компонент силы резания, но также и между их мгновенными значениями, т.е. в любой момент времени значение осевого усилия может быть получено путем умножения  $P_z$  на некоторый коэффициент. Это позволяет нам уменьшить размерность исходной трехмерной задачи путем разделения ее на две связанные двухмерные подзадачи, рассматриваемые в координатах  $yz$  (подзадача 1) и  $xz$  (подзадача 2).

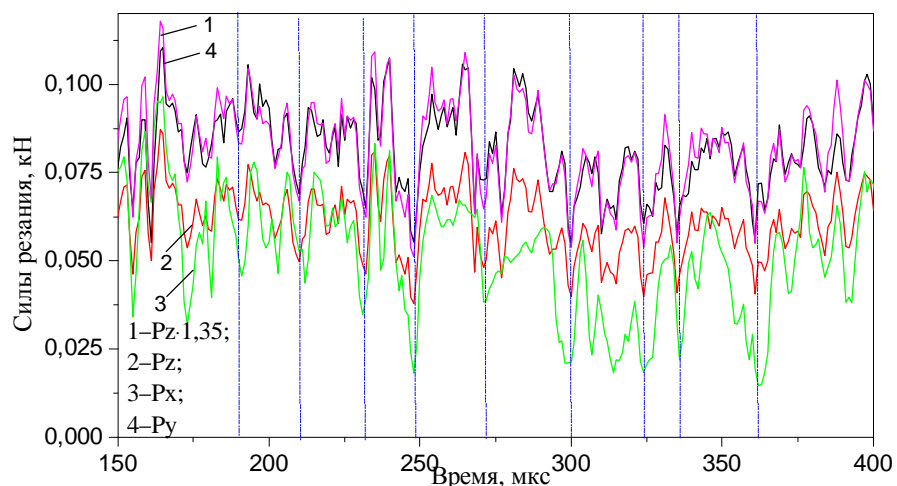


Рис. 2. Изменение во времени компонент силы резания:  $h=2$  мм;  $L=18$  мм.

Кроме того, эксперименты показывают, что усилия  $P_y$  и  $P_z$  так же, как и их отношение  $P_y/P_z$ , являются возрастающими функциями  $h$  и  $L$ . В рамках подзадачи 1 эти зависимости будут получены аналитическим путем.

Общая трехмерная модель резца, взаимодействующего с породой, показана на рис. 3. Принято, что в процессе работы резец двигается в направлении оси  $z$ .

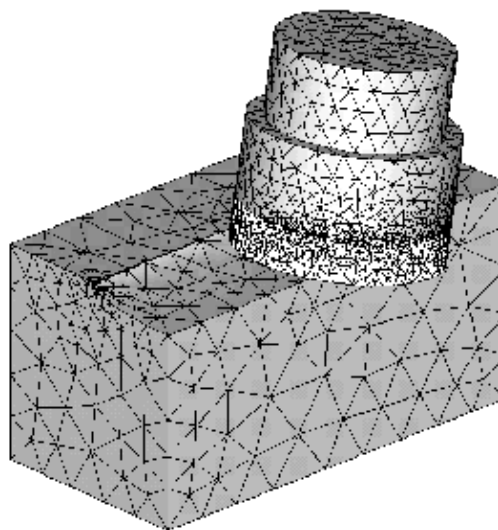


Рис. 3. Трехмерная конечноэлементная модель контактного взаимодействия самовращающегося резца с породой.

Вследствие относительно медленного движения резца ( $\sim 1$  м/с) задачу можно рассматривать как квазистатическую. Однако задача при этом остается контактной, что делает ее прямой численный анализ сложным и требующим значительных затрат времени.

#### Подзадача 1

Для определения основных составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$  воспользуемся проекцией системы взаимодействующих тел на плоскость, перпендикулярную оси  $x$  и ранее разработанным подходом, основанным на анализе условий равновесия сил, действующих на скалываемый резцом обломок породы [4]. Расчетная схема задачи представлена на рис. 4.

Напряжения во фрагменте породы, форма которого близка к треугольной, в момент времени, предшествующему его отрыву от массива, рассчитываются, исходя из равновесия всех действующих на него сил. Как следует из схемы, скальваемый фрагмент породы ABC ограничен поверхностью контакта передней грани резца с породой, плоской поверхностью породы на забое и поверхностью трещины условно прямолинейной формы, начинающейся в нижней части режущей кромки резца и выходящей на свободную поверхность породы под углом  $\alpha$ , определяемом, как

$$a = p / 4 - (f_p + q_f - w_c) / 2, \quad (1)$$

где  $w_c$  – угол резания, равный по экспериментам для рассматриваемой конструкции резца  $-10^\circ$ ;

$f_p$  – угол внутреннего трения;

$q_f$  – эффективный угол трения между резцом и частично раздробленной породой, изменяющийся в зависимости от породы и состояния поверхностного слоя в диапазоне от 8 до 13 [3].

При работе резца нормальные и тангенциальные напряжения действуют на обеих режущих поверхностях резца – на передней поверхности площадью  $S_c$  и на изношенной (или созданной искусственным затуплением) плоской площадке  $S_f$ . На каждой из указанных поверхностей принимается, что тангенциальные напряжения связаны с нормальными напряжениями согласно закону контактного трения Кулона.

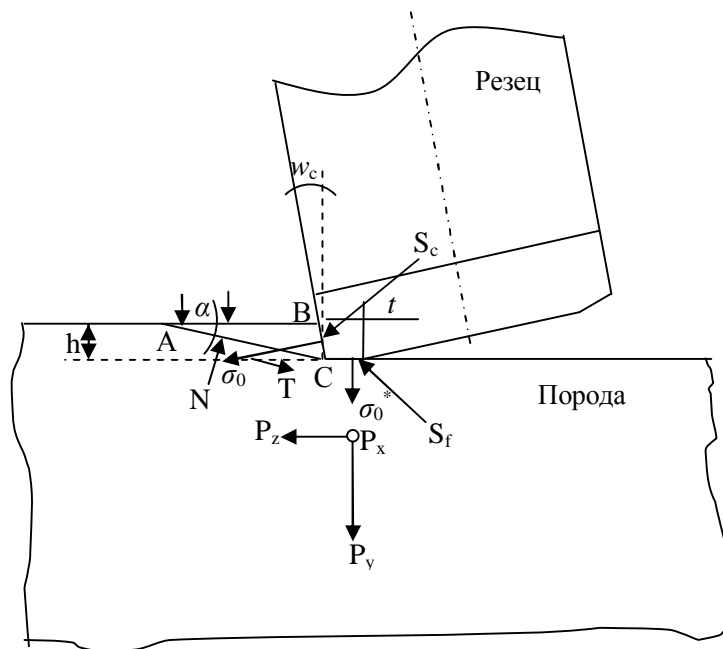


Рис. 4. Расчетная схема контактного взаимодействия самовращающегося резца с горной породой.

Выполненные ранее методом конечных элементов исследования контактного взаимодействия резцов с крепкими породами показали, что изменение нормального напряжения на поверхности резца происходит следующим образом [4]. При внедрении резца в породу на постоянную глубину  $h$  под ним формируется зона сжатия, порода деформируется и позади режущей кромки формируется зона растягивающих напряжений, приводящая к появлению так называемой подъемной силы, действующей на поверхности обломков породы. По мере износа резца эта подъемная сила все время уменьшается, тогда как увеличиваются нормальные напряжения, действующие на границе контакта затупленной поверхности твердосплавной встав-

ки и породы. При этом среднее напряжение  $S_0^*$  на этой поверхности практически равно нормальному напряжению на передней поверхности резца  $S_0$ , которое, в свою очередь, определяется из условия статического равновесия рассматриваемого фрагмента породы треугольной формы.

В таком случае можно предположить, что отделение фрагмента ABC от основного массива породы начинается тогда, когда соотношение между нормальным  $N$  и касательным  $T$  напряжениями, развивающимися на поверхности разрушения, удовлетворяют критерию Кулона – Мора вида  $T = C_p + N \operatorname{tg}(\Phi_p)$  [2,5], где  $C_p$  и  $\Phi_p$  соответствуют сопротивлению сдвигу породы и углу ее внутреннего трения.

Интегрирование нормального и касательного напряжений вдоль поверхности контакта резца с породой, проведенное аналогично [4], позволяет получить формулы для определения горизонтальной  $F_z$  и вертикальной  $F_y$  составляющих максимальной результирующей силы, необходимой для скалывания породы

$$F_z = [R(f_p)C_p + Q(f_p)] \left( 1 + S \frac{\sin q_f}{\cos(q_f - w_c)} \right) h^{3/2}; \quad (2)$$

$$F_y = [R(f_p)C_p + Q(f_p)] \frac{\sin 2(q_f - w_c) + S[\sin(2q_f - w_c) - \sin(w_c)]}{\cos^2(q_f - w_c)} h^{3/2}, \quad (3)$$

где  $S$  определяется отношением площади изношенной (затупленной) части твердосплавной вставки резца  $S_f$  и площади его контакта с породой  $S_c$ .

Входящие в уравнения (5) и (6) коэффициенты  $R(\Phi_p)$  и  $Q(\Phi_p)$ , являются возрастающими функциями угла внутреннего трения породы и в области больших значений  $\Phi_p$ , практически совпадают (рис. 5).

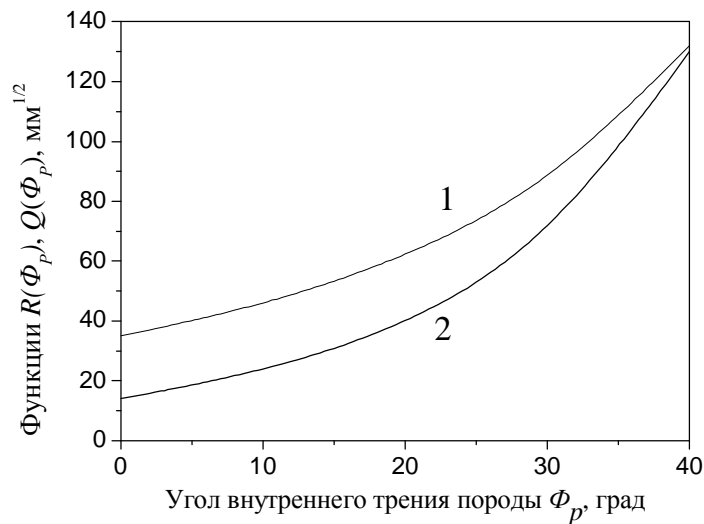


Рис. 5. Зависимость коэффициентов  $R$  (1) и  $Q$  (2) от величины угла  $\Phi_p$ .

Используя полученные зависимости коэффициентов  $R$  и  $Q$  от угла внутреннего трения  $\Phi_p$ , определим нормальные и тангенциальные составляющие максимальной результирующей силы, нужной для резания породы – песчаника Теробовлянского месторождения.

Расчеты проведем для глубины резания  $h$ , изменяющейся от 2 до 4 мм. Согласно [3] принимаем, что сопротивление сдвигу песчаника равно 33 МПа, а угол его внутреннего трения и эффективный коэффициент трения  $\theta$ , равны соответственно 14,0 и 10,5.

Результаты расчетов зависимости вертикальной составляющей силы резания  $P_Y$  и отношения  $P_Y/P_Z$  от шага  $L$  и глубины резания  $h$  для острого резца приведены на рисунках 6 и 7. На рис. 8 и 9 показано влияние длины площадки затупления твердосплавной вставки на указанные силовые параметры.

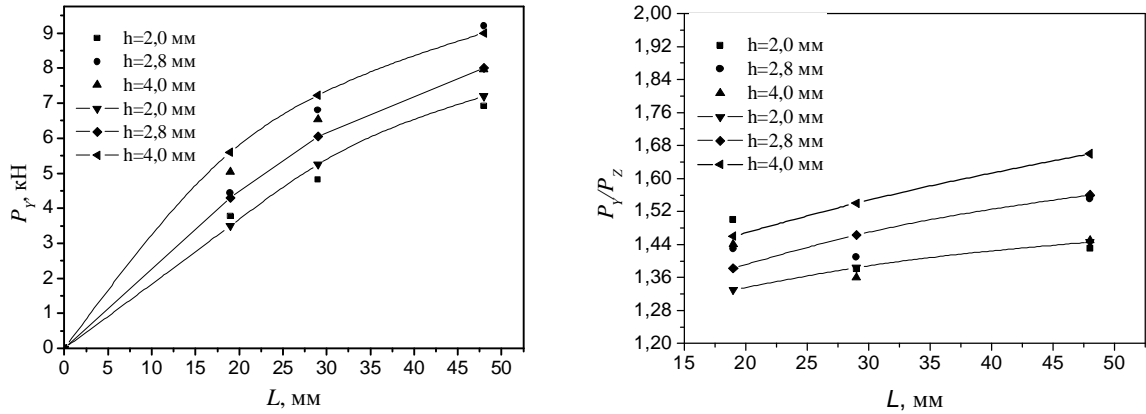


Рис. 6. Зависимость вертикальной составляющей силы резания  $P_Y$  и отношения  $P_Y/P_Z$  от величины шага резания  $L$  для различных значений глубины резания  $h$ .

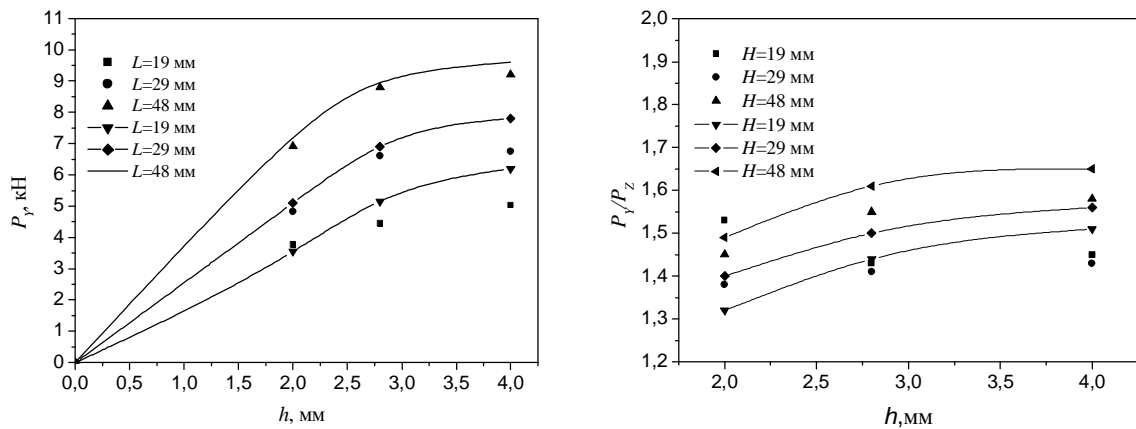


Рис. 7. Зависимость вертикальной составляющей силы резания  $P_Y$  и отношения  $P_Y/P_Z$  от  $h$  для различных значений шага резания  $L$ .

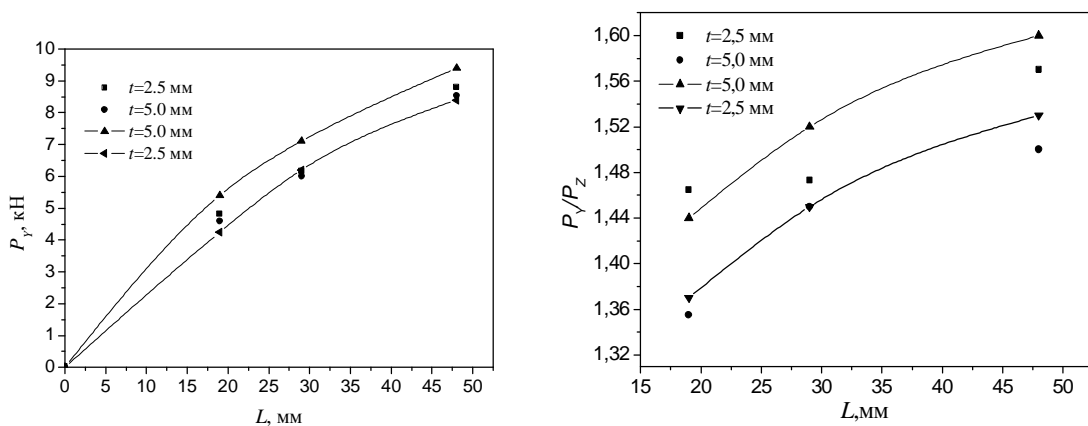


Рис. 8. Зависимость вертикальной составляющей силы резания  $P_Y$  и отношения  $P_Y/P_Z$  от  $L$  для резца с затуплением 2,5 и 5 мм и  $h=2,8$  мм

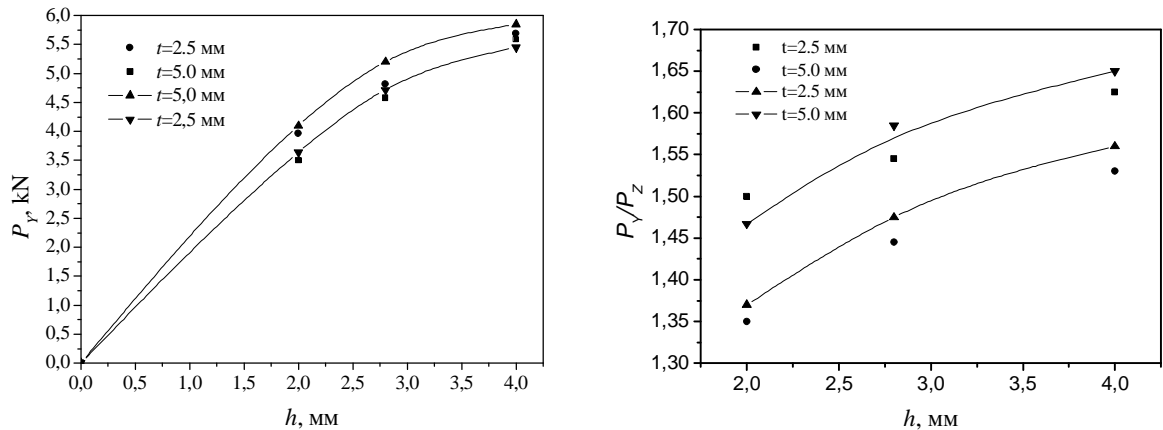


Рис. 9. Зависимость вертикальной составляющей силы резания  $P_y$  и отношения  $P_y/P_z$  от глубины резания  $h$  для резца с затуплением 2,5 и 5 мм и шага резания  $L=19$  мм.

На всех графиках сплошными линиями показаны расчетные данные, а символами – результаты экспериментальных исследований. Последние были проведены с помощью разработанного в ИСМ НАНУ трехкомпонентного динамометра, оснащенного высокоточной, (сертификационной по стандарту ISO 9000), измерительной системой фирмы WPS. Указанная система оснащена блоком аналогово-цифрового преобразователя типа Spider, что позволило с высокой степенью точности измерять составляющие силы резания для различных режимных параметров резания. Эксперименты проведены на лабораторном стенде, разработанном на базе токарно-карусельного станка с планшайбой диаметром 2,1 м. Это дало возможность моделировать процесс разрушения массива породы в условиях, в максимальной степени приближенных к эксплуатационными соответствующим работе исполнительных органов буровых установок американского производства.

#### Подзадача 2

Вторая из рассматриваемых нами подзадач направлена на установление корреляции между горизонтальной составляющей силы резания  $P_z$ , определенной на предыдущем шаге и боковой составляющей  $P_x$ . Фактически эта пара сил и предопределяет, главным образом, условия вращения резца при разрушении породы.

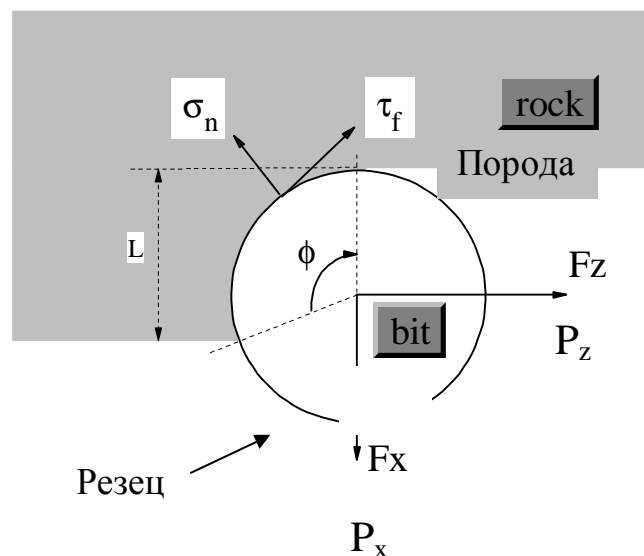


Рис. 10. Расчетная схема контактного взаимодействия резца с породой, спроектированная на плоскость  $xz$ .

Расчетная схема задачи, описывающая процесс контактного взаимодействия инструмента с породой, показана на рис. 10 и включает в себя стальной корпус резца с твердосплавной вставкой и блок породы, размеры которого взяты достаточно большими, чтобы исключить влияние условий его закрепления по внешним граням на напряжения в зоне контакта с резцом.

В качестве граничных условий задавалось закрепление блока породы, перемещение (подача) инструмента, а также условие контакта резца с породой, отвечающее закону трения Кулона с коэффициентом трения  $k_f$ , изменяющимся в диапазоне, охватывающем все его возможные значения.

Предполагается также, что остаточные термические напряжения, возникающие в резце после пайки, значительно меньше по величине эксплуатационных напряжений и поэтому не оказывают существенного влияния на его усталостную прочность.

Согласно принятой геометрической модели, круглый жесткий резец внедряется в упругопластическую среду, параметры которой моделируют фактический материал породы. При этом поступательное перемещение резца определяется достижением деформации материала некоторого критического значения  $\epsilon^*$ , при котором происходит макроскол породы. Используя экспериментальные данные [1], выбираем  $\epsilon^*=0,035$  как интенсивность суммарной деформации, которая отвечает усилию резания  $P_z = 150$  кГ при глубине резания  $h = 2$  мм.

Сформулированная таким образом нелинейная контактная задача решалась методом конечных элементов. На рис. 11 приведены некоторые результаты решения задачи.

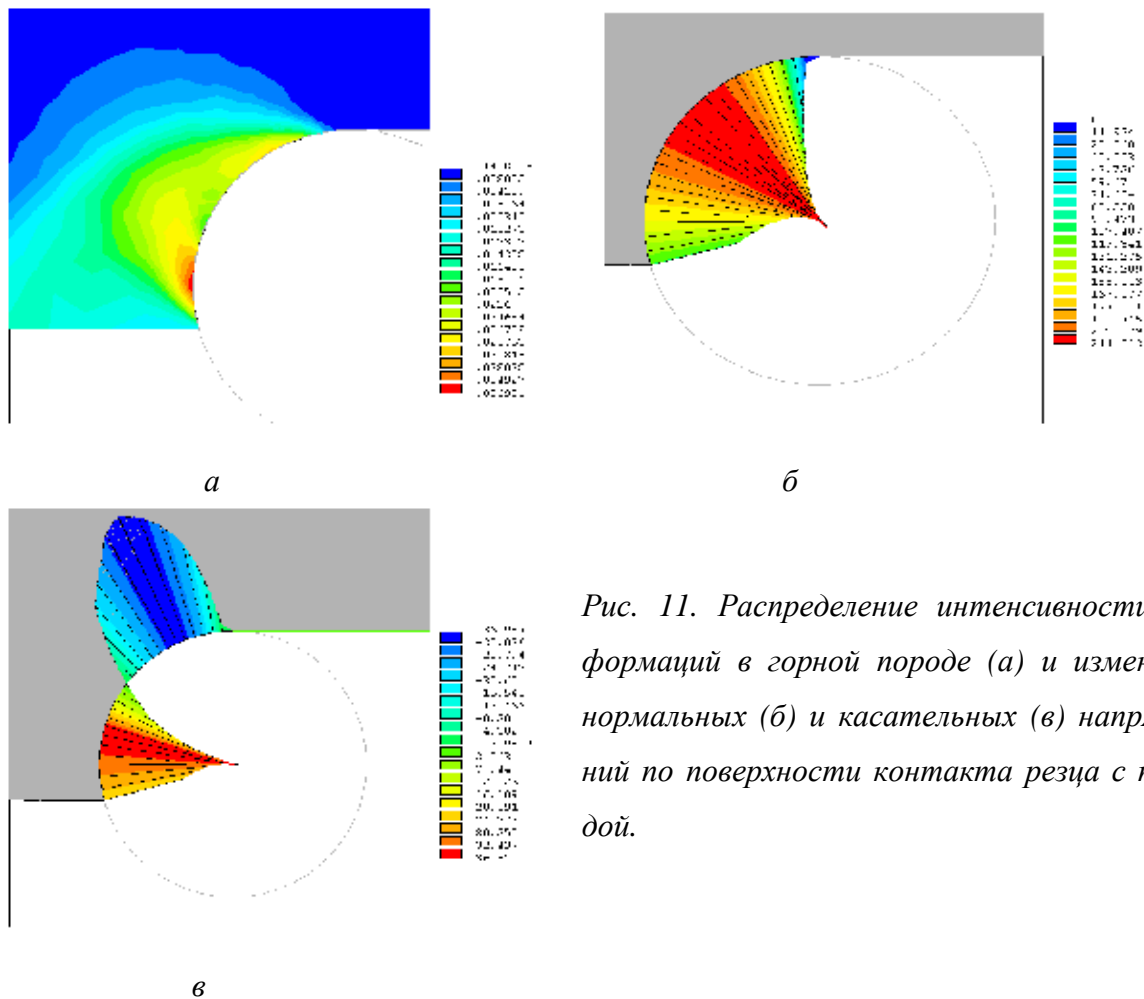


Рис. 11. Распределение интенсивности деформаций в горной породе (а) и изменение нормальных (б) и касательных (в) напряжений по поверхности контакта резца с породой.

В частности, на рис. 11, а показаны изолинии интенсивности деформаций породы, свидетельствующие, что для данной схемы нагружения разрушение породы начинается на



поверхности контакта в области, расположенной на расстоянии около  $0,25 h$  от свободной поверхности. Кроме того, интенсивному деформированию подвержен участок породы в зоне, где максимального значения достигают как нормальные (рис. 11, б), так и касательные (рис. 11, в) напряжения. Отметим также наличие точки на поверхности контакта, расположенной приблизительно на расстоянии  $2/3h$  от свободной поверхности, в которой касательные напряжения меняют свой знак. Такой характер распределения касательных напряжений подтверждает экспериментально установленный факт, что лишь часть касательных напряжений, действующих на цилиндрическую поверхность резца, способствует его вращению при резании породы.

Установлено, что форма и размер обломков, а также силы, действующие на резец, являются, по существу, случайными функциями времени (см., например, рис. 2); при моделировании мы имеем дело с некоторыми усредненными по времени (средний, пиковый и т.д.) значениями. Суммарные силы  $P_z$  и  $P_x$ , а также момент  $M_y$ , действующие на резец со стороны породы, определяются в этом случае интегрированием их локальных значений.

На рис. 12 показаны, декартовы компоненты суммарной нагрузки, полученные расчетным путем для  $h=2$  мм и трех значений коэффициента трения. Как видно из рисунка, имеет место удовлетворительная корреляция между теорией и экспериментом, несмотря на определенные допущения, сделанные нами при постановке задачи.

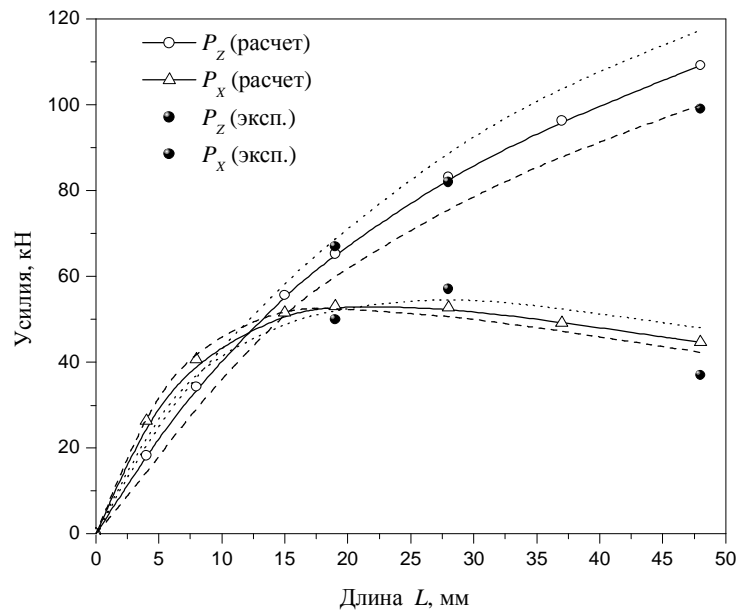


Рис. 12. Теоретические и экспериментальные зависимости суммарных усилий  $P_z$  и  $P_x$  от шага резания для различных значений коэффициента трения резца с горной породой  $k_f = 0,02$  (штрих. линия);  $k_f = 0,2$  (сплош. линия);  $k_f = 0,5$  (пункт. линия).

### Условие самовращения резца

Естественно предположить, что резец вращается при условии, что  $M_y > M_T$ , где вращающий момент определяется как

$$M_y = \int_L t_f dL = R_{bit} \int_f^{p/2} t_f(R_{bit}, f) df, \quad (4)$$

где  $L$  – длина зоны контакта резец – порода;

$R_{bit}$  – радиус резца;

$s_n, t_f$  – нормальное и тангенциальное напряжения;

$M_T$  – момент трения в адаптере, зависящий от формы контактирующих поверхностей деталей.

Разумно также предположить, что момент трения в адаптере пропорционален вертикально приложенной силе  $P_y$

$$M_T = k_T P_y \quad (5)$$

Нормированные значения вращающего момента  $M_y$  как функции ширины резания даны на рис. 13 (для трех коэффициентов трения); нижняя кривая характеризует поведение момента  $M_T$  (коэффициент трения в адаптере взят равным 0,1). Тогда абсцисса точки пересечения дает максимальную ширину резания, при которой резец все еще способен вращаться.

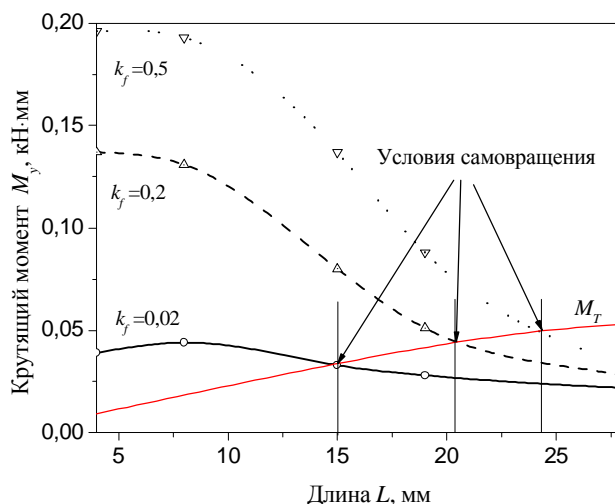


Рис. 13. Критерий самовращения резца.

Из рис. 13 видно, что предложенная модель позволяет достаточно достоверно предсказывать влияние входящих в нее параметров. Так, например, увеличение трения в адаптере, характеризуемое коэффициентом  $k_T$ , уменьшает максимальную допустимую ширину шага резания  $L$ ; в то же самое время увеличение трения на границе порода – резец (которое нужно рассматривать по аналогии с другими проблемами механики горных пород как некоторое эффективное значение, включающее как обычное трение, так и вклад от разрушения породы) обеспечивает вращение резца при больших значениях  $L$ .

### Литература

1. Каталог механических свойств горных пород при широкой вариации видов напряженного состояния и скорости деформирования. – Л.: Всесоюзный НИИ горной геомеханики маркшейдеровского дела, 1976. – 176 с.
2. Hoek E., Bieniawski Z. T. Brittle fracture propagation in rock under compression // International Journal of Fracture Mechanics. – 1985, Vol. 1. – P. 137–155.
3. Altiero N. J., Sikarskie D. L. Fracture initiation in elastic analysis brittle materials having non-linear fracture envelopes // Int. J. Fracture. – 1975. – V 11. – P. 431–440.
4. Моделирование контактного взаимодействия резцов, оснащенных АТП, с горной породой / И. А. Свешников, В. И. Куш, С. И. Шестаков и др. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения // Сб. науч. тр. – К.: ИСМ НАН Украины, 2005. – С. 69–72.
5. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наук. думка, 1976. – 415 с.

Поступила 05.07.07.