

К ВОПРОСУ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВДАВЛИВАНИИ РЕЗЦОВ

В. И. ЗВАРЫГИН, С. С. СУЛАКШИН

(Представлена научным семинаром кафедры техники разведки)

Резание горных пород можно рассматривать как скалывание элементов породы при непрерывном вдавливании перемещающегося резца. Поэтому, исследование внедрения резца в породу, являющегося основным элементом процесса резания при бурении скважин, представляет определенный интерес.

В данной статье делается попытка рассмотреть процесс разрушения породы при вдавливании резцов с точки зрения теории упругости и определить усилия, необходимые для внедрения резцов в породу.

Как известно из теории упругости, при действии сосредоточенной нагрузки P на край полубесконечной пластинки в последней возникают напряжения, характеризующиеся линиями равных касательных (а также полных) напряжений в форме окружностей, касающихся точки приложения нагрузки и лежащих на линии направления приложенной силы.

При действии равномерно распределенной нагрузки по участку l , линии равных напряжений (касательные и полные) в пластинке также имеют форму окружностей с общей хордой l . Как в том, так и в другом случаях окружности замкнуты и не выходят на верхний край пластинки (рис. 1, а).

При вдавливании же какого-либо индентора в поверхность бесконечного полупространства такой картины не наблюдается. Условия распределения напряжений в теле достаточно больших размеров (бесконечное полупространство) являются неравномерными: чем ближе к поверхности, тем они благоприятнее. Поэтому картина распределения линий (точнее поверхностей) равных напряжений имеет иной характер.

В непосредственной близости к воздействию на какое-либо упругое тело пуансону напряжения распределяются аналогично распределению напряжений в пластинке. Причем максимальное напряжение возникает по полусфере или полуэллипсу (в пластинке по полуокружности), примыкающих к основанию пуансона [4, 5, 6, 10].

При значительных нагрузках вокруг зоны максимального давления возникает вторая деформированная зона, являющаяся как бы оболочкой первой зоны и при вдавливании пуансона служит своеобразным наконечником.

Такое явление отметил в своей работе Л. А. Шрейнер [3]. Наиболее устойчивой сферой будет сфера «скелет» (вписанный треугольник), ко-

торой является равноугольный треугольник со стороной, равной ширине пуансона, поэтому высота второй зоны, которую описал Л. А. Шрейнер равна высоте равноугольного треугольника, т. е. $0,866 b$. После образования сферического «наконечника» давление будет распространяться

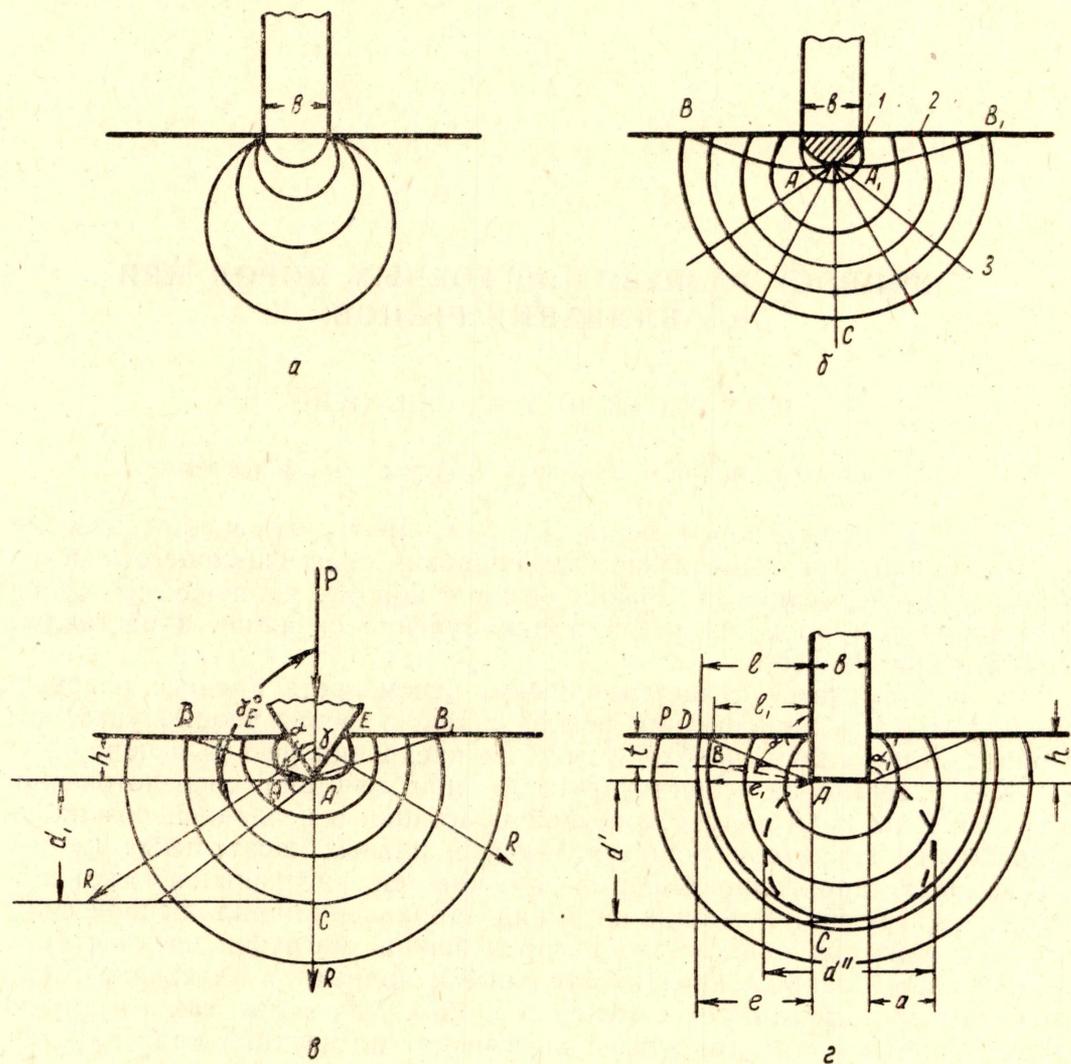


Рис. 1.

по нижней части сферы нормально к касательным плоскостям сферы. Если бы условия распространения напряжений в теле были одинаковыми (как в пластинке), распределение давления происходило бы по косинусоидальному закону. Но так как такие условия отсутствуют для тел значительных размеров, то в результате последующей передачи давления на сферические слои, последние как бы разворачиваются. Замкнутая у основания пуансона сфера на некотором удалении от пуансона снова превращается в полусферу. На рис. 1, б показан характер распределения линий равных напряжений в стекле (по материалам наблюдений изохром в поляризационном свете и следам развивающихся в стекле деформаций после скола).

В результате возникших в испытываемом материале напряжений горизонтального распора (численное значение которого по исследованиям М. М. Фрохта [4] для толстых пластин и блоков составляет P/π) в теле в начальный момент вдавливания возникает трещина, имеющая

форму полуокружности. Плоскость трещины совпадает с осью симметрии по большей стороне пуансона. Трещина хорошо наблюдается в оптически прозрачном материале (стекло, плексиглас и т. д.). При дальнейшем увеличении давления, когда полные напряжения, выходящие на поверхность тела достигнут величины напряжения, характеризующего прочность данного материала, произойдет скол элемента породы по линиям AB A_1B_1 , являющимися траекториями максимальных полных напряжений (рис. 1, б).

Остановимся подробнее на вдавливании в породу клинообразных пуансонов (резцов).

При воздействии клинообразным пуансоном на поверхность бесконечного полупространства в последнем возникнут напряжения, распределяющиеся, как известно, по сферическим поверхностям.

В непосредственной близости от щека клина будут концентрироваться сферические поверхности равных напряжений, осями центров сфер будут являться нормали к щекам клина. На некотором удалении от щека замкнутые сферы перейдут в полусферы, охватывающие клин с обеих сторон (рис. 1, в). Скол будет происходить по линии, соединяющей вершину клина с точками, лежащими на пересечении полусферы равных полных напряжений с поверхностью образца.

Причем скол происходит по траектории максимальных полных напряжений. Очевидно, что скол произойдет в тот момент, когда полные напряжения достигнут критического значения для данной породы ($\sigma_{кр}$). Напряжение в точке B будет равным напряжению в точке C . Полные напряжения в точке C можно определить, исходя из формулы теории упругости для сосредоточенной силы, действующей на плоскость, ограничивающую бесконечное пространство [5].

$$\sigma = -\frac{3R}{2\pi d^2} = -\frac{3R}{2\pi} \cdot \frac{1}{d'} \cdot \frac{1}{d''}, \quad (1)$$

где d' — расстояние от точки приложения нагрузки до точки C ;
 d'' — условная длина оси эллиптических линий напряжений в плоскости симметрии резца, которые должны быть при условии отсутствия влияния свободной поверхности образца (рис. 1, г);
 R — усилие, действующее по кромке резца, равное усилиям, действующим по граням резца.

Из условий распределения усилий на клине

$$R = \frac{P \cos(90 - \gamma)}{2}.$$

Как видно из рисунков 1, в и 1, г, построенных по материалам фотографирования изохром в поляризованном свете и следов развивающихся деформаций при скалывании:

$$d' = AB = \frac{h}{\cos \alpha};$$

$$d'' = b + 2a = b + e \approx b + l,$$

здесь h — глубина внедрения резца;
 α — угол скола элемента породы (угол между вертикалью и поверхностью скола);
 b — ширина резца;
 a — высота эллиптического сегмента поверхности напряжений, которая должна быть при отсутствии влияния свободной поверхности;

e — высота эллиптического сегмента с учетом влияния свободной поверхности;

l — расстояние от боковой грани резца до края образованной лунки.

Подставляя полученные значения d' и d'' в формулу (1), получим

$$\sigma = - \frac{3R \cos \alpha}{2\pi h (b+l)}, \quad (2)$$

откуда

$$R = \frac{2\pi h \sigma (b+l)}{3 \cos \alpha}. \quad (3)$$

Угол скола α можно определить следующим образом. Скол элемента породы произойдет в том случае, когда полные напряжения на поверхности, как мы отмечали выше, будут равными $\sigma_{кр}$. Для простоты рассуждений предположим, что сила, действующая на бесконечное полупространство, является сосредоточенной.

Напряжение от сосредоточенной силы, действующей на бесконечное полупространство, определяется формулой

$$\sigma = - \frac{3R}{2\pi} \cdot \frac{\cos^2 \Theta}{r^2}.$$

Заменяя

$$r = \frac{h}{\cos \alpha},$$

имеем

$$\sigma = - \frac{3R}{2\pi} \cdot \frac{\cos^2 \Theta \cos^2 \alpha}{h^2}.$$

Максимальное напряжение (напряжение при котором произойдет скол) будет при условии

$$-\cos^2 \Theta \cdot \cos^2 \alpha = \max, \text{ т. е. при } \Theta = \alpha$$

Значит угол скола α будет равен углу Θ (углу между направлением силы и линией скола).

Если угол между вертикалью и направлением силы обозначить через α_0 (рис. 1, в), то

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{2}, \text{ но } \alpha_0 = 90 + \gamma,$$

где γ — угол между вертикалью и гранями резца.

Следовательно,

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{2} = \frac{90 + \gamma}{2}. \quad (5)$$

Таким образом, мы пришли к несколько видоизмененной формуле К. А. Зворыкина [7], которая находит свое применение в теории резания металлов,

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma - \rho - \rho_{вн}}{2}. \quad (6)$$

Эта формула несколько упрощена А. М. Розенбергом [8]

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma - \rho}{2}, \quad (7)$$

где β_1 — угол между плоскостью сдвига элементов металла и горизонтальной плоскостью;

ρ — угол трения металла о резец;
 $\rho_{\text{вн}}$ — угол внутреннего трения.
 Но так как

$$\alpha = 90 - \beta_1,$$

то

$$\alpha = 90^\circ - 45^\circ - \frac{\gamma - \rho}{2}.$$

Принимаемый нами угол γ как положительный при резании имеет отрицательное значение и тогда

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\gamma + \rho}{2} = \frac{90 + \gamma + \rho}{2}. \quad (8)$$

Как мы видим, разница между полученной нами формулой (5) и преобразованной формулой (8) состоит в том, что мы не учли силы трения при сжатии (здесь, очевидно, будет действовать трение покоя).

Для проверки этого положения были поставлены опыты при внедрении в песчаник резцов с различным углом приострения.

После каждого внедрения резца замерялись размеры лунки. Затем по формуле $\alpha = \text{arctg} \frac{l'}{h}$ рассчитывались значения углов скола (здесь l' — расстояние от центра до края лунки, h — глубина лунки). Результаты опытов сведены в табл. 1.

Таблица I

Угол приострения резца β_0 , град.	Расстояние между краем и центром лунки l' , мм	Глубина внедрения, $h_{\text{мм}}$	Угол скола по замерам		Рассчитанный по формуле (5)
			α	α средн.	
60	3,5	1,1	72		
	5,0	1,9	69		
	5,5	3,2	60	65	60
	5,0	4,5	50		
	8,0	4,0	64		
90	3,8	1,4	70		
	4,8	2,0	67		
	5,5	2,5	66	69	67,5
	6,0	3,2	64		
	10	2,0	79		
120	5,0	0,8	81		
	6,3	1,3	78		
	8,8	1,7	79	79	75
	10	2,0	79		
	11,3	2,2	79		
Призма	7,5	1,7	77		
	8,8	2,5	74		
	11,5	2,5	77	76	—
	10	2,2	77		
	11	3,3	73		

Как видно отсюда, фактические углы скола имеют значения больше расчетных, причем отклонения составляют $1,5 \div 5$ град.

Видимо, и при вдавливании резцов в породу сказывается действие силы трения. Действительно, при коэффициенте трения для испытываемых образцов (песчаников) $f = 0,1 \div 0,2$ (по данным В. С. Федорова и Е. Ф. Эпштейна [1])

$$\frac{\rho}{2} = \frac{6 \div 12}{2} = 3 \div 6 \text{ град},$$

т. е. отклонения фактических углов от расчетных примерно равны значению $\frac{\rho}{2}$, которое фигурирует в формуле Зворыкина. Следовательно,

и для пород будет применима формула Зворыкина.

Вернемся снова к формуле (1). Рассмотрим, как будет изменяться значение l с ростом глубины внедрения. Предположим, что резец углубился на некоторую величину h (рис. 1, 2). Если бы верхний слой толщиной t отсутствовал, то скол, вероятно, произошел бы по траектории максимальных напряжений AB . Угол скола в плоскости симметрии в этом случае был бы равен α_1 . При наличии слоя толщиной t линии равных напряжений при выходе на поверхность будут снова сближаться по окружности, как это показано на рис. 1, в, г (рис. 1, в, г начерчен по материалам фиксации линий равных напряжений в эпоксидной смоле в поляризационном свете). В результате этого линия траектории максимальных напряжений AD составит с вертикалью угол α_1' меньше угла α_1 . Значение же e будет очень мало отличаться от величины e_1 и при небольшой глубине внедрения резца ее можно считать постоянной и тогда

$$e = e_1 = l = l_1.$$

Изменение угла скола α_1 с увеличением глубины внедрения пуансона в канифоль было отмечено В. С. Владиславлевым [9].

Ниже приводятся данные по изменению α_1 и l (табл. 2) при резании углей, по данным исследования А. И. Берона [8].

Таблица 2

Шахта, пласт	h , см	α_1 , град.	l , см
№ 25, III Каменский K_5	0,5	81	3,2
	0,75	80	4,2
	1,0	79	5,1
	1,25	74	4,4
	1,5	72	4,5
	2,0	68	4,8
	2,5	64	5
Центральная Боковская Боковский K_5	0,5	84,5	5
	0,75	81	4,8
	1,0	80	5,6
	1,25	76,5	5
	1,5	75,6	5,7
	2,0	72	5,4
	2,5	69	6,5

Значение l рассчитано по формуле $l = h \operatorname{tg} \alpha$.

Из табл. 2 видно, что при глубине резания от 5 до 25 мм значения l колеблются в небольших пределах. Причем, колебания связаны не только с увеличением глубины, но, видимо, с неоднородностью условий резания.

Таким образом, как было отмечено выше, значение e при внедрении резцов на небольшую глубину можно принять (с очень малой погрешностью) как величину постоянную.

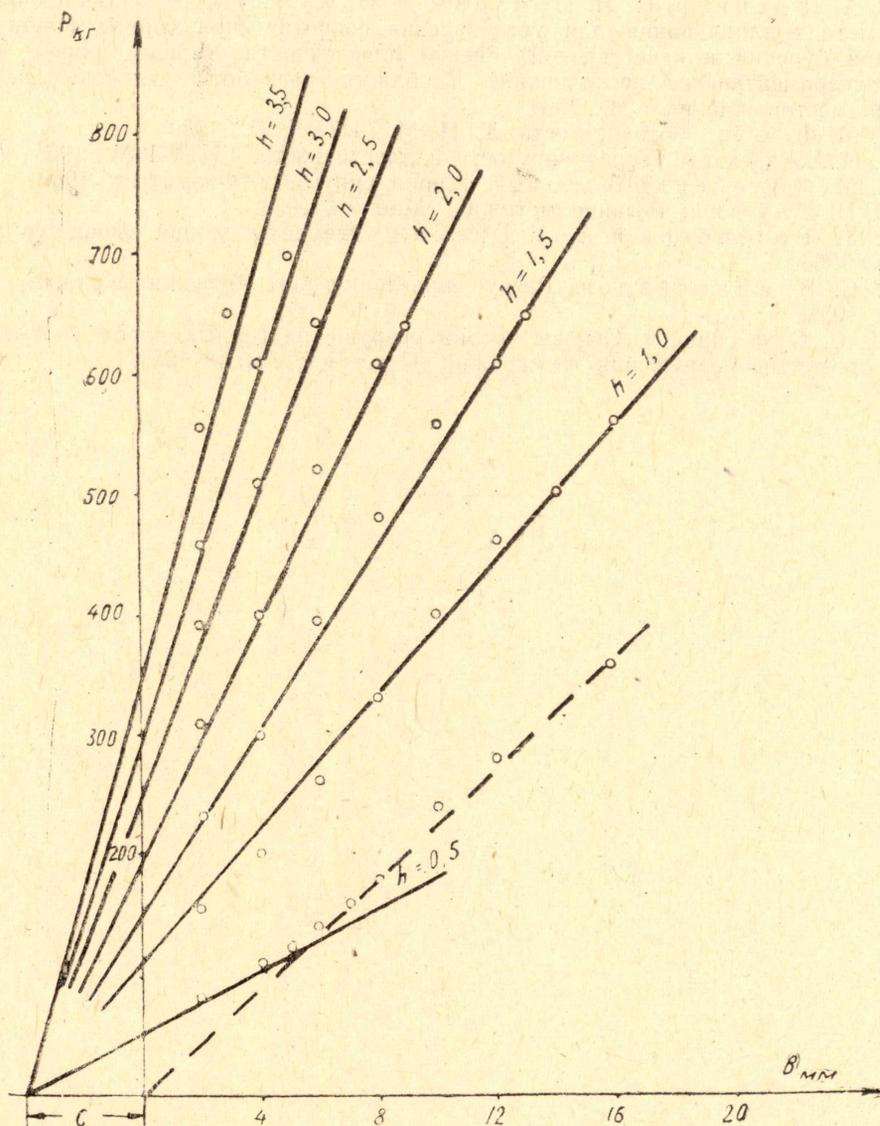


Рис. 2. Сравнение теоретических прямых зависимости усилий вдавливания от ширины резца и глубины внедрения резца.

Для проверки полученной формулы (3) воспользуемся материалами, полученными В. С. Владиславлевым при вдавливании в мрамор резцов различной ширины.

На графике (рис. 2) точками показаны результаты исследований В. С. Владиславлева; прямые построены по формуле (3) при

$$\sigma = 1,31 \text{ кг/мм}^2 \text{ и } l = 4 \text{ мм.}$$

Как видно из графика, теоретические выводы хорошо согласуются с экспериментальными данными, а полученная формула (3) позволяет

с достаточной степенью точности определить значения усилий, необходимых для внедрения резцов в породу, например, при работе шарошечного долота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Ф. Эпштейн. Теория бурения-резания горных пород твердыми сплавами. ГОНТИ, 1939.
2. И. А. Остроушко. Разрушение горных пород при бурении. Госгеолиздат, М., 1952.
3. Л. А. Шрейнер, Н. Н. Павлова, В. П. Якушев, Б. В. Байдюк. Применение метода вдавливания для установления сопротивления горных пород разрушению при бурении и качественной оценки пластичности горных пород. Статья в сб. «Экспериментальные исследования в области разработки глубоких нефтяных и газовых месторождений», М., 1964.
4. М. М. Фрохт. Фотоупругость, Т. II, М. ГИТТЛ, Л., 1950.
5. Н. И. Безухов. Теория упругости и пластичности. ГИТТЛ М., 1953.
6. М. М. Филоненко-Бородич. Теория упругости. Физматгиз, 1959.
7. М. И. Клушин. Резание металлов. Машгиз, 1958.
8. А. М. Розенберг и А. А. Еремин. Элементы теории процесса резания металлов, 1956.
9. В. С. Владиславлев. Разрушение пород при бурении скважин. Гостехиздат, 1958.
10. С. С. Сулакшин. Основы теории разрушения горных пород и транспортирования продуктов разрушения из скважин. Изд. ТГУ, Томск, 1964.