

УДК 539.4.019.3:550.882

В.Д.ЕВСЕЕВ, А.Н. СНЕГИРЕВ

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПОД ВНЕДРЯЮЩИМСЯ ИНДЕНТОРОМ

Целью исследования является поиск возможности повышения эффективности разрушения горных пород при бурении. Рассматривается элементарный акт взаимодействия долота с горной породой: вдавливание породообразующих элементов вооружения в образец горной породы. Разрушение под индентором вызывается процессами дилатансионного дробления, компактирования порошкообразного материала в верхней части ядра сжатия, дилатансионным разрыхлением породы в нижней его части, вызывающими неупругое увеличение объема ядра сжатия. Повышение эффективности разрушения горных пород при бурении связывается с увеличением коэффициента сжимаемости жидкости, в присутствии которой происходит разрушение, и искусственным стимулированием сдвиговой деформации вращением индентора.

Согласно [1], при действии на горную породу контактным давлением $P_k = F/\pi a^2$, где a – радиус цилиндрического индентора, F – усилие вдавливания, в значительной части ядра сжатия, расположенного под пятном контакта, выполняется условие $\delta_2 \approx \delta_3$. Это означает, что порода в ядре находится в состоянии всестороннего сжатия под действием напряжения δ_3 , на которое накладывается избыточное давление $(\delta_1 - \delta_3)$ вдоль главного направления, совпадающего с линией действия осевого усилия F (здесь $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – главные нормальные напряжения, линейно зависящие от P_k). В этом случае интенсивность касательных напряжений τ_i и гидростатическое напряжение P_r , действующие в горной породе ядра сжатия, можно определить выражениями

$$\begin{aligned}\tau_i &= (\delta_1 - \delta_3)/3^{0.5}, \\ P_r &= (\delta_1 + 2\delta_3)/3\end{aligned}$$

и считать, что ядро сжатия находится под действием нагрузки ВД + ДС, где ВД – всестороннее равномерное давление, обеспечивающее величину средней линейной деформации $\epsilon_r = (\epsilon_1 + 2\epsilon_3)/3$, ДС – интенсивность деформации сдвига $\gamma_i = 2(\epsilon_1 - \epsilon_3)/3^{0.5}$, возникающей под действием девиаторного напряжения.

Объемную деформацию ϵ_v горной породы ядра сжатия при вдавливании индентора следует представить в виде суммы: $\epsilon_v = \epsilon_v^{\text{ш}} + \epsilon_v^{\text{д}}$, где $\epsilon_v^{\text{ш}}$, $\epsilon_v^{\text{д}}$ – деформации, вызванные шаровой и девиаторной частями нагрузки соответственно. Объемная деформация ядра состоит из обратимой и остаточной Δ части.

Гидростатическая составляющая напряженного состояния вызывает уменьшение объема ядра сжатия. С увеличением пористости горной породы вес слагаемого Δ в суммарной величине объемной деформации будет возрастать. Развитие положительной дилатансии приводит к необратимому уменьшению пористости горной породы ядра сжатия. Это сопровождается разрушением адгезионных контактов между зернами минералов, разрушением самих минералов и цементирующего вещества, перекомпоновкой продуктов разрушения и их уплотнением.

Уменьшение объема ядра, вызванное действием изотропной составляющей напряженного состояния, с увеличением контактного давления будет иметь затухающий характер: предельно малой величине объема ядра будет отвечать максимальная плотность породы в нем.

Вдавливание индентора в горную породу сопровождается преобразованием механической энергии в электрическую в ядре сжатия: разрушение адгезионных границ между твердой компонентой горной породы, минералов-диэлектриков приводит к появлению механических потерь энергии электростатической природы, влияющих на развитие разрушения [2].

Если пористая горная порода насыщена жидкостью, то появление эффективных напряжений в твердом скелете породы ядра сжатия в районе защемленных пор приведет при росте P_k к облегчению развития сдвигового разрушения: чем меньше коэффициент сжимаемости жидкости β , тем

при меньшей величине F произойдет разрушение породы под индентором с образованием лунки. Причем разрушение горной породы под индентором при наличии растущего порового давления в ядре сжатия будет стремиться реализоваться путем межзернового адгезионного проскальзывания, а не в результате разрушения зерен минералов.

Для установления влияния сжимаемости жидкости на развитие разрушения пористой горной породы при вдавливании в неё индентора нами было проведено экспериментальное исследование на установке УМГП-3. В образцы кварцевого песчаника с базальным цементом каолинит-кремнистого состава, имеющего величину открытой пористости 9,0%, вдавливался конический индентор с площадью основания $2,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ и углом при вершине конуса 60° . Насыщение поверхностного слоя образца породы жидкостью в области пятна контакта производилось в течение трех минут, предшествующих вдавливанию. Используемые неполярные, химически инертные по отношению к горной породе жидкие диэлектрики (четырёххлористый углерод и бензол) одинаковы с точки зрения проявления эффекта Ребиндера, но отличаются по величине коэффициента сжимаемости β : $91,6 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$ у CCl_4 и $49,1 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}$ у бензола [3]. В опытах с каждой жидкостью было проведено по 13 вдавливаний.

Эксперимент показал, что влияние жидкостей на разрушение песчаника вдавливанием различно: если присутствие в горной породе бензола привело к возникновению девяти выколов при достижении величиной P_k среднего значения 942 МПа (коэффициент вариации 7,4 %) при средней абсолютной деформации $32,47 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (коэффициент вариации 11,7 %) и лишь в четырех вдавливаниях выкола не произошло (хотя и были превзойдены приведенные средние значения), то вдавливание индентора в песчаник в присутствии четыреххлористого углерода не привело к возникновению выколов, хотя достигнутые контактное давление и абсолютная деформация (1079 МПа и $41,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, коэффициенты вариации 7,2 и 7,8% соответственно) значительно превысили средние значения этих величин, при достижении которых произошел выкол в случае использования бензола: при доверительной вероятности, превышающей величину 0,98, различие средних значений является значимым. (Дальнейшее увеличение контактного давления в случае применения CCl_4 нецелесообразно по причине выполаживания кривой деформирования и опасности раскола образца горной породы.)

При величине контактного давления, обеспечивающего обратимое развитие деформаций в горной породе под пятном контакта, компонента ВД напряженного состояния характеризуется модулем объёмной деформации K , компонента ДС – модулем сдвига G . Совместное действие нагрузок ВД и ДС на горную породу под штампом следует характеризовать коэффициентом поперечного расширения: отношением поперечной деформации ε^3 , вызываемой девиаторным напряжением, к продольной деформации ε^1 , вызываемой гидростатической нагрузкой:

$$\nu = \varepsilon^3 / \varepsilon^1.$$

Минимального значения $\nu = 0$ коэффициент поперечного расширения достигнет при отсутствии поперечной деформации в ядре сжатия. Этот случай соответствует изменению объёма ядра сжатия при вдавливании индентора, происходящему без изменения формы ядра, и $K = 2G/3$. Если считать, что горная порода представляет собой несжимаемый материал, то величина ν при вдавливании индентора достигнет своего предельного значения 0,5; при этом ядро будет менять свою форму без изменения объёма и $E = 3G$. Последний случай соответствует основному физическому положению методики определения механических свойств горных пород Л.А.Шрейнера, согласно которому в горной породе под вдавливаемым индентором развивается пластическая деформация.

Реализация условия ВД + ДС в горной породе под площадкой давления приводит к возникновению в ядре сжатия катакластического течения, особенностью которого является дилатансионное увеличение объёма ядра сжатия при росте сдвиговой деформации в нём в соответствии с уравнением $\varepsilon_d^v = \mu \cdot \gamma_i$, где μ – коэффициент пропорциональности.

Особенность развития объёмной деформации в ядре сжатия определяется соотношением девиаторной и шаровой компонент напряженного состояния: неоднородность отношения τ_i/P_r в ядре сжатия определяет неоднородное развитие отрицательной дилатансии и усилий, передаваемых ядром, на окружающую его породу при вдавливании индентора. В части ядра, где отношение δ_3 / δ_1

изменяется от нуля до 0,23 ($0,638 < z/a < 1,0$), увеличение контактного давления приводит к росту необратимой объёмной деформации в результате множественного развития трещин нормального отрыва и разрыхлению горной породы; с уменьшением z и увеличением отношения δ_3/δ_1 до 0,8 дилатансионное разрыхление породы в ядре ослабляется вплоть до его полного исчезновения и развития дилатансионного дробления породы (измельчения), протекающего с одновременным множественным разрушением элементов сухого трения Сен-Венана, уплотнением, агрегированием и компактированием частиц возникающего полидисперсного порошкообразного материала.

Если обозначить через $k \cdot V = A_d$ работу упругого деформирования породы под пятном контакта, где k – работа деформирования единицы объёма породы, V – объём очага разрушения, то энергоёмкость процесса вдавливания индентора можно описать выражением, близким к закону измельчения Ребиндера:

$$A = k \cdot V + \gamma_{\text{эфф}} \cdot S_s + A_k + A_{\text{StV}},$$

где $\gamma_{\text{эфф}}$ – эффективная энергия разрушения, включающая в себя механические потери энергии электростатической природы [2]; A_{StV} – работа сил трения элементов Сен-Венана в ядре сжатия; A_k – работа компактирования продуктов измельчения.

Увеличение необратимой объёмной деформации в нижней части ядра и рост дисперсности порошка в его верхней части при возрастании P_k увеличивает коэффициент передачи ядром осевого усилия на целик и снижает сопротивление ядра сжатия сдвигу, приводит к различному росту продольной ε_1 и радиальной ε_3 деформаций ядра сжатия при вдавливании индентора.

Изменение ν при вдавливании индентора в горную породу определяется отношением законов изменения модуля объёмной деформации и модуля сдвига:

$$\nu = [(3K/2G) - 1] / [(3K/G) + 1].$$

Вид функций $K = K(P_r)$ и $G = G(\tau_r)$ будет различен в силу того, что с ростом контактного давления закономерности деформирования горной породы ядра сжатия при сдвиге и всестороннем сжатии различны: если $\varepsilon_r \rightarrow \text{const}$, то $\gamma_r \rightarrow \infty$. Это означает, что увеличение объёмной деформации ядра при вдавливании индентора вызовет рост коэффициента ν . Разрушение горной породы произойдёт при достижении им критического значения ν_k , соответствующего потери сдвиговой устойчивости горной породы ядра.

Развитию горизонтальных усилий со стороны ядра на окружающую его породу препятствует недонасыщение жидкостью полостей трещин нормального отрыва в нижней части ядра сжатия в результате дилатансионного упрочнения ядра и процессы агрегирования и компактирования продуктов измельчения в верхней его части.

Развитие релаксационных процессов в очаге разрушения (ядре сжатия) содействует дополнительному приросту объёмной деформации ядра. Прирост объёма ядра зависит от способности жидкости, в присутствии которой происходит формирование очага, снижать время релаксации электрических зарядов, появляющихся на свежих поверхностях развивающихся трещин нормального отрыва, от времени действия механического усилия, от объёма очага.

В методике Л.А.Шрейнера определение механических свойств горных пород происходит при непрерывном вдавливании индентора в горную породу и является результатом естественного развития сдвиговой неустойчивости породы в очаге при росте усилия F . Между тем возникающее в горной породе под пятном контакта напряжённое состояние позволяет произвести и искусственное стимулирование развития сдвиговой деформации, например, вращением индентора вокруг своей оси после предварительного вдавливания его в поверхность образца породы. Это должно обеспечить разрушение горной породы при меньших осевых усилиях. Для проверки этого положения нами было проведено экспериментальное исследование. Использовались образцы горных пород габбро, кварцита, алевролита. В первой серии испытаний были определены твердость $P_{\text{ш}}$ горных пород и величина условного предела текучести P_0 . Во второй серии испытаний непрерывное вдавливание индентора производилось до величины контактного давления, отвечающей разви-

тию деформации как в упругой области деформирования, так и за пределом упругости. Затем производилось вращение индентора с помощью специального приспособления.

Эксперимент с образцами габбро ($P_{ш} = 3333$ МПа) показал, что поворот индентора приводит к разрушению породы и образованию лунки не только при контактном давлении $P_k = 2367$ МПа, обеспечивающем деформирование породы за пределом упругости ($P_o = 2184$ МПа), но и в пределах упругого поведения горной породы при достижении контактным давлением величины 2077 МПа. Аналогичные результаты получены и при использовании осадочной горной породы: контактные давления (2174 и 1932 МПа), при которых поворот индентора обеспечил разрушение поверхности образцов алевролита под пятном контакта, значительно меньше не только твердости породы ($P_{ш} = 3058$ МПа), но и уступают по величине условному пределу текучести ($P_o = 2232$ МПа).

При неоднократном вдавливании используемого индентора в образцы кварцита достигнутое на установке УМГП-3 максимальное контактное давление 4640 МПа не обеспечило образования лунки под пятном контакта. Полученные деформационные кривые свидетельствуют о том, что при такой нагрузке под пятном контакта в кварците развиваются упругие деформации. Тем не менее поворот индентора при достижении контактным давлением значительно меньшей величины 2610 МПа привел к разрушению горной породы под пятном контакта и образованию лунки.

Развитие представлений о механизме разрушения горной породы при вдавливании индентора необходимо для выяснения возможностей ускорения разрушения горной породы при бурении. Нам представляется, что можно указать на две возможности ускорения разрушения: совершенствование породоразрушающего инструмента и управление физическими свойствами промывочной жидкости, способными активно вмешиваться в развитие разрушения.

Для эффективного влияния жидкости на разрушение горных пород фильтрат промывочной жидкости должен обладать минимальной вязкостью, большой электропроводностью, малой величиной коэффициента сжимаемости, должен обеспечивать снижение зернограничного трения в порошкообразном материале ядра в зоне дилатансионного уплотнения, препятствовать агрегированию и компактированию измельчаемой горной породы под пятном контакта.

Породоразрушающий инструмент должен стимулировать развитие сдвиговой неустойчивости в горной породе при внедрении в неё элементов вооружения. Иначе говоря, вдавливание породоразрушающих элементов вооружения долот необходимо дополнить искусственным сдвигом, например, вращением вдавливаемых элементов вооружения.

Исследование проводится совместно с кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эйгелес Р. М. Разрушение горных пород при бурении. - М.: Недра, 1971. - 232 с.
2. Евсеев В. Д. Особенности разрушения горных пород при использовании различных буровых растворов: Дис. докт. техн. наук. - Тюмень, 1997. - 323 с.
3. Субботина Е. П. Сборник физических констант и параметров. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1967. - 148 с.