РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2014 № 1

УДК 539.3

К ВОПРОСУ О ЗОНАЛЬНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

В. Е. Миренков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: mirenkov@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Обсуждается проблема математического моделирования процесса зональной дезинтеграции горных пород около заглубленной выработки. В рамках упругой модели для изотропного материала в двумерном случае рассматривается поле напряжений в плоскости около выработки кругового поперечного сечения. На бесконечности действуют сжимающие напряжения, определяемые глубиной заложения выработки. Анализ касательных напряжений показал, что вокруг выработки на расстоянии $r = \sqrt{3}R$ от ее центра образуется круговая область повышенных значений. Эти напряжения предшествуют разрушению материала и создают условия для реализации следующих колец разрушения. Обсуждаются возможности влияния исходного гидростатического напряженного состояния на закон дезинтеграции. Кольца зональной дезинтеграции возникают на бóльшем расстоянии от центра выработки, чем полученные экспериментально, что объясняется идеализацией классических формулировок задач механики горных пород.

Зональная дезинтеграция, выработка, напряжения, аналитическое решение, разрушение, упругость

Согласно классическим представлениям, горные породы на больших глубинах должны находиться в столь сжатом состоянии, что вокруг образующихся полостей (например, в процессе бурения) любые из них начинают разрушаться, и полость будет заполняться разрушенным материалом. Однако этого не происходит в результате зональной дезинтеграции (ЗД). Явление зональной дезинтеграции, открытое авторами [1], представляет собой научный факт, который многократно подтвержден. В то же время при ожидаемых высоких давлениях в недрах Земли на протяжении миллионов лет все поры и трещины, казалось бы, должны быть закрыты, а породный массив является сплошным и только на обнажениях, где произошла разгрузка, можно наблюдать трещины и раскрытие пор.

В работе [2] отмечено, что такой фундаментальный факт, как зональная дезинтеграция, должен объясняться и на сравнительно простых моделях геосред, например для упругой слоистой среды, обеспечивающей скачок нормальной компоненты напряжений на контактах слоев. Открытие ЗД сопровождается многими попытками обосновать ее аналитически, вводя в рассмотре-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00133).

ние новые сложные модели сред. Их анализ дан в работах [3, 4], и они требуют широкого круга экспериментальных исследований, результаты которых необходимы также для верификации и валидации приближенных теоретических и расчетных моделей и натурных экспериментов.

Рассмотрим упругую плоскость, ослабленную круговым отверстием радиусом R, понимая под последним заглубленную выработку. Пусть контур выработки свободен от внешних напряжений и на бесконечности действует сжимающее напряжение p в направлении оси x. Следуя [5], решение этой задачи в полярных координатах (рис. 1) имеет вид:

$$\sigma_r = -\frac{p}{2}\left(1-\frac{R^2}{r^2}\right)-\frac{p}{2}\left(1-\frac{4R^2}{r^2}+\frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta ,$$

$$\sigma_\theta = -\frac{p}{2}\left(1+\frac{R^2}{r^2}\right)+\frac{p}{2}\left(1+\frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta , \tag{1}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{p}{2}\left(1+\frac{2R^2}{r^2}-\frac{3R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta .$$

На контуре выработки (при $r = R$) $\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0$.

Значения σ_θ на контуре будут $\sigma_\theta = -p(1-2\cos 2\theta)$.

Максимальные значения σ_θ равны

$$\sigma_{\theta\max} = -3p \quad \text{при } \theta = \pm\pi/2 , \tag{2}$$

т. е. утроенному значению сжимающих на бесконечности напряжений.

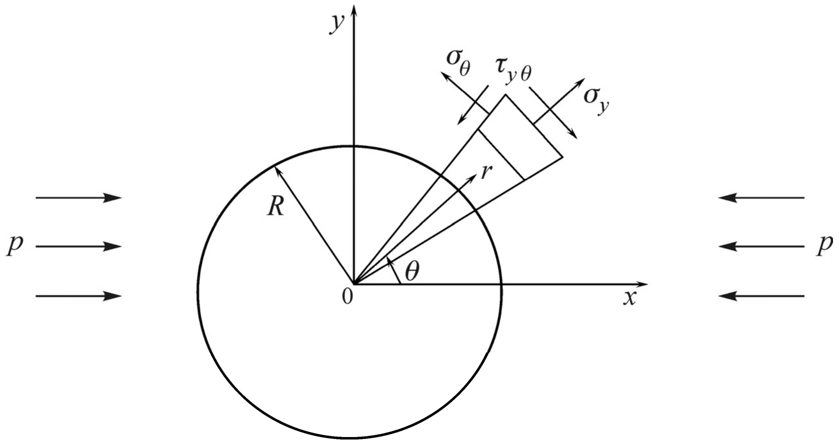

Рис. 1. Расчетная схема для подземной выработки в полярных координатах

Если рассматривать случай заглубленной выработки, то при определенном p может оказаться, что в природе нет таких горных пород, которые выдерживают сжатие (2), и на контуре в этом месте будет разрушение, т. е. выработка должна “схлопнуться”. Однако на практике этого не происходит. Природа “готовится” к такому событию заранее, инициируя шелушение, отслоение пород на контуре, продлевая срок службы выработки, и приводит в итоге к падению повышенных напряжений, перемещая их в глубь массива.

Исследуем поведение касательных напряжений $\tau_{r\theta}(r,\theta)$ из решения (1). На луче $\theta = 0$ значения $\tau_{r\theta}(r,\theta) = 0$, на луче $\theta = \pi/4$

$$\tau_{r\theta}(r) = \frac{p}{2}\left(1+\frac{2R^2}{r^2}-\frac{3R^4}{r^4}\right), \tag{3}$$

а на луче $\theta = \pm\pi/2$ — соответственно $\tau_{r\theta} = 0$. Для любого текущего фиксированного значения $r = r_0$ на окружности радиусом r_0 значения $\tau_{r\theta}(\theta)$ по модулю возрастают от нуля при $\theta = 0$ до максимальных значений при $\theta = \pm\pi/4$, затем плавно убывают до нуля при $\theta = \pm\pi/2$ и снова достигают максимумов при $\theta = \pm 3\pi/4$ по синусоидальному закону. Учитывая зависимость $\tau_{r\theta}$ от θ из (1), рассмотрим процесс изменения $\tau_{r\theta}(r)$ на луче $\theta = \pm\pi/4$, т. е. решение (3). Согласно (3), $\tau_{r\theta}(r = R) = 0$ и $\tau_{r\theta}(r \to \infty) = p/2$. Для определения координаты экстремального значения $\tau_{r\theta}$ продифференцируем его выражение по r и приравняем нулю. Получим, что при

$$r^2 = 3R^2 \tag{4}$$

функция (3) достигает экстремального значения

$$\tau_{r\theta}(r = \sqrt{3}R) = (2/3)p, \tag{5}$$

что больше значения $\tau_{r\theta} = p/2$ на бесконечности.

Таким образом, на окружности радиусом $r_0 = \sqrt{3}R$ касательные напряжения $\tau_{r\theta}(r_4)$ достигают максимальных значений при растяжении или сжатии в направлении оси x плоскости, ослабленной круговым отверстием. При растяжении или сжатии породных образцов перед разрушением, как известно, наблюдают возникновение “линий Людерса”, как результат сдвигов, и только затем идет образование так называемой шейки образца с последующим разрушением. Аналогичная ситуация наблюдается и в окрестности кругового отверстия в плоскости, растягиваемой на бесконечности. Это обстоятельство использовалось при теоретическом доказательстве, сформулированном в виде открытия явления зональной дезинтеграции [1].

Из доказанной “теоремы” вытекает важное следствие — ЗД лежит в основе возможности добычи полезных ископаемых на больших глубинах. Без этого закона природы — зональной дезинтеграции — невозможно существование полостей в массиве пород на больших глубинах, так как горные породы не могут выдерживать большие давления. Это подтверждает основной факт, наблюдаемый при добыче полезных ископаемых: смещения в выработанном пространстве происходят и их невозможно остановить (по крайней мере, на достаточно больших глубинах), пока не реализуется зона дезинтеграции, после чего можно крепить выработку и крепь выдерживает последующие нагрузки [3].

Реальная выработка в массиве пород находится под воздействием сжимающих вертикальных и горизонтальных напряжений q и p. Результат действия горизонтальных усилий p приводит к решению (1). Действие вертикальной компоненты q легко получить из (1) заменой p на q и θ на $\theta_1 = \theta + \pi/2$. Сумма этих двух воздействий сохраняет радиальную координату ЗД в виде $r = \sqrt{3}R$ из формулы (4), а величина касательных напряжений определяется их суммой. Окончательно для общего случая получим

$$\begin{gathered}\sigma_r = -\frac{q+p}{2}\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{q-p}{2}\left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta, \\ \sigma_\theta = -\frac{q+p}{2}\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{q-p}{2}\left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} = -\frac{q-p}{2}\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta.\end{gathered} \tag{6}$$

Необходимо отметить, что в случае гидростатического нагружения массива пород ($q = p$) в центре будущей выработки касательные напряжения $\tau_{r\theta}(r,\theta) \equiv 0$ всюду в плоскости с круговым отверстием. Этот аномальный, казалось бы, случай не дает развиться ЗД по указанной схеме. На самом же деле в природе обычно исключается возможность реализации такой идеальной ситуации. С одной стороны, это частный случай даже в идеальной схеме, рассмотренной здесь. Если перейти к линейному закону связи напряжений в заданной точке массива на глубине H:

$$\sigma_r = \gamma H\ , \quad \sigma_x = \lambda\gamma H\ , \tag{7}$$

где γ — удельный вес пород; λ — боковой распор, то добиться равенств (7) вряд ли возможно для реального массива пород. Другими словами, использование предположения (7) для формулировки граничных условий на контуре любой выработки при расчете напряженно-деформированного состояния, являющегося очень приближенным и требует уточнения, т. е. возникает проблема валидации. Если предположить, что в массиве пород найдется ограниченная область на глубине H с гидростатическими напряжениями, то полость в ней создать нельзя, пока не нарушится условие гидростатики. С другой стороны, приведенное решение не отвечает реальной ситуации, когда напряжения с глубиной увеличиваются и исключают симметрию дополнительных напряжений на контуре выработки. Однако тенденция к ослаблению проявления ЗД при $p = q$ сохраняется, что согласуется с положением об отсутствии разрушения в условиях гидростатики, и может привести к быстрому затуханию процесса ЗД. Для последнего случая решения пока нет. Именно поэтому геометрические особенности зональной дезинтеграции связаны с окружностями. Следует отметить, что В. Н. Опарин в [3] определяет радиус образования первой зоны ЗД в реальных условиях как $r \sim \sqrt{2}R$. В данной же работе, в силу известной идеализации модели при формулировке задачи, имеем $r = \sqrt{3}R$.

Перейдем к более глубокому результату, содержащемуся в [1], — особенностям формирования последующих зон дезинтеграции по каноническому закону. По рассматриваемой в данной статье модели на расстоянии $r = \sqrt{3}R$ от центра выработки за счет реализации линий Людерса образуется разрушенная кольцевая область (рис. 2), и напряженно-деформированное состояние в результате изменяется. Происходит уменьшение значений напряжений, приложенных на бесконечности при переходе через разрушенные породы на окружности $r = \sqrt{3}R$. При этом обычно неизвестно, каков коэффициент передачи давления через образованную “буферную” зону. Если будем знать новые значения σ_{rn} и $\tau_{r\theta n}$ на границах разрушенной зоны, то вопрос о напряжениях в области, ограниченной радиусами R и $\sqrt{3}R$, и вне ее решается достаточно просто.

Для получения этих результатов необходимы экспериментальные данные и решения обратных задач. К сожалению, данное решение идеализировано, а эксперименты, приведенные в [1], реальны, и их нельзя использовать в таком некорректном анализе. Тем не менее наличие разрушенной зоны и связанное с ней уменьшение напряжений позволяет исследовать новую выработку радиусом $\sqrt{3}R$ с некоторыми нормальными и касательными напряжениями на контуре и напряжениями p на бесконечности. Рассмотрим эту ситуацию как сумму двух задач: первая — на контуре выработки заданы нормальные и касательные напряжения, исчезающие на бесконечности; вторая — на контуре выработки отсутствуют напряжения, а на бесконечности они равны p. Вторая задача дает максимальные значения $\tau_{r\theta}$ на окружности радиусом $r = 3R$, а первая может несколько уменьшить это значение. Тем не менее второе кольцо разрушения находится дальше, чем первое от контура соответствующей выработки. Представляется оправданным принять значение $r = 3R$ как оценку сверху для образования второй зоны дезинтеграции. Этот процесс будет развиваться до тех пор, пока не удастся снизить давление на предпоследней зоне до величины, не вызывающей сдвиг разрушения на последней.

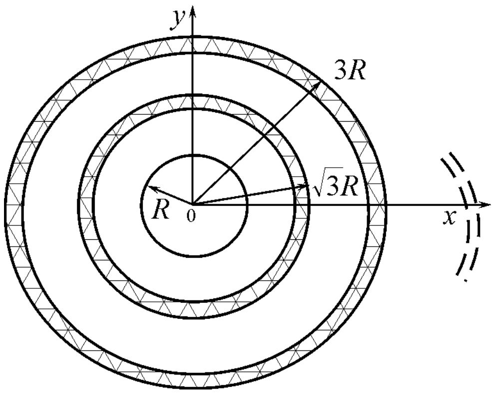

Рис. 2. Схема чередующихся ненарушенных и разрушенных пород явления зональной дезинтеграции (в [3] — по каноническому закону $R_i = R_i(\sqrt{2})^i$)

Обычно, обсуждая проблему зональной дезинтеграции горных пород , говорят об окрестности заглубленной выработки. В данной работе такая оговорка делается только в связи с использованием решения (1) для q, а по существу, только точное решение может оценить глубину, с которой возможно явление ЗД.

ВЫВОДЫ

На основе предложенного аналитического решения о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород в окрестности подземной выработки круглого поперечного сечения получена кольцевая область, в которой могут реализовываться линии Людерса, вызывая разрушение пород.

В силу приближенности граничных условий, в аналитическом решении первая зона дезинтеграции образуется на расстоянии $\sqrt{3}R$ от центра выработки, что можно считать оценкой сверху для реальных экспериментов. Эта оценка может использоваться в случаях сложной формы подземной выработки или выработанного пространства, когда возможно заменить реальные выработки эквивалентной круговой (например, по площади).

Доказательство “теоремы”, сформулированной В. Н. Опариным в виде открытия, с позиций приведенного в настоящей статье аналитического решения для его объяснения представляется весьма перспективным для поиска конструктивных методов верификации и валидации описываемого явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Открытие № 400 СССР**. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, М. А. Розенбаум // Опубл. в БИ. — 1992. — № 1.
2. **Миренков В. Е.** О возможности разрушения подработанных пород в массиве // ФТПРПИ. — 2009. — № 2.
3. **Зональная дезинтеграция** горных пород и устойчивость подземных выработок / В. И. Опарин, А. П. Тапсиев, М. А. Розенбаум и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
4. **Гузев М. А., Макаров В. В.** Деформирование и разрушение сильносжатых горных пород вокруг выработок. — Владивосток: Дальнаука, 2007.
5. **Мусхелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1967.

Поступила в редакцию 18/XI 2013