

О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫЕМОК

М. А. Резников

Дается краткий критический обзор существующих методов оценки устойчивости горных выемок. Предлагается оценивать устойчивость подземных выработок с помощью коэффициента запаса устойчивости для наиболее слабой линии, которая должна находиться путем вариации расчетных линий. Приводится порядок подсчета удерживающих и сдвигающих сил по расчетной линии в окрестности одиночной подземной выработки.

Ключевые слова: устойчивость; подземная выработка; удерживающие и сдвигающие силы; коэффициент запаса устойчивости.

При разработке месторождений полезных ископаемых возникают вопросы, связанные с устойчивостью горных выемок. При открытых горных работах это прежде всего борта карьеров, уступы и отвалы пустых пород. При подземном способе разработки это системы одиночных выработок, камер и междукамерных целиков.

Существуют различные методы и приемы для решения таких задач:

- аналитические;
- моделирование на эквивалентных материалах;
- моделирование на оптически активных материалах,
- натурные измерения.

Следует отметить, что существующие методы расчета устойчивости открытых и подземных выработок далеки от кардинального разрешения. Поскольку не существует совершенно достоверных методов их расчета, то правильнее будет говорить о сравнительной количественной оценке устойчивости выработок, получаемой с применением того или иного метода расчета. Для такой оценки может служить коэффициент запаса устойчивости открытой или подземной выработки, определяемый как отношение удерживающих сил к сдвигающим по наиболее слабой поверхности (объемная задача) или линии (плоская задача).

При всем многообразии существующих расчетных моделей и схем задачи, как правило, решаются в плоской постановке, что следует считать правомерным, если форма рассматриваемого объекта остается неизменной в перпендикулярном ее сечению направлении на протяжении 5–6 характерных размеров выработки.

К аналитическим методам при открытых

разработках полезных ископаемых следует отнести известные методы оценки устойчивости откосов, основанные на разделении области откоса на вертикальные призмы и отнесении веса пород этих призм к соответствующим наклонным площадкам. Этим, по существу, задается напряженное состояние пород откоса. Породы, расположенные ниже рассматриваемых наклонных площадок, считаются невесомыми. При всех недостатках этой методологии получены инженерные решения задачи об устойчивости откосов горных пород, которые имеют широкое распространение. К числу аналитических методов следует отнести также известное решение задачи о напряженном состоянии массива горных пород в окрестности одиночной подземной выработки, полученное с применением методов теории упругости. Здесь следует отметить, что в реальных условиях среда в окрестности такой выработки в общем случае анизотропна. Здесь имеются напластования, трещины разрыва сплошности и другие нарушения однородности массива пород.

Метод конечных элементов также следует отнести к числу аналитических. Его можно было бы считать универсальным для определения напряженного состояния массивов горных пород, если бы не один существенный его недостаток: в разложении функций, определяющих напряженное состояние массивов пород, удерживаются лишь линейные члены степенного ряда. В дальнейшем возникает необходимость решать системы линейных уравнений больших размеров, что не вызывает принципиальных затруднений. По мере удаления от контура выработки накапливаются ошибки, связанные с отбрасыванием нелинейных членов степенного ряда, что приводит к искажению конечных результатов решения.

Если учитывать нелинейные члены разложения в степенном ряду, то возникает необходимость решения больших систем нелинейных уравнений, что в общем случае представляется сложной математической проблемой.

Моделирование с применением оптически активных материалов позволяет получить качественную характеристику распределения напряжений в окрестности одиночных выработок или их систем. Основным недостатком этого метода является несоизмерность геометрических размеров модели и натуры.

При моделировании на эквивалентных материалах требуется соблюдение условий подобия не только геометрических размеров модели и натуры, но также и прочностных свойств их пород. Это требование далеко не всегда удается соблюсти, так как возникают затруднения, связанные с подбором эквивалентных материалов, физико-механические характеристики которых удовлетворяют условиям подобия пород натуры.

Поскольку не существует совершенно достоверных методов расчета устойчивости открытых и подземных выработок, то правильнее будет говорить о сравнительной количественной оценке степени устойчивости выработок, получаемой с применением того или иного метода расчета. В качестве такой количественной оценки может быть принят

коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) открытой или подземной выработки, определяемый как отношение удерживающих сил к сдвигающим по наиболее слабой поверхности (объемная задача) или линии (плоская задача).

Резюмируя изложенное, отметим, что многими исследователями достигнуты важные результаты в области оценки степени устойчивости открытых и подземных выработок. Эти результаты собираются по крупицам. Количественные познания со временем приведут к появлению иных методов, которые позволят решить проблему оценки устойчивости открытых и подземных выработок на качественно новом уровне.

Автору представляется, что решение задач об устойчивости горных выработок можно искать путем вариации расчетных поверхностей при решении объемных задач или линий при решении задач в плоской постановке. Что касается устойчивости откосов горных пород, то приемлемое решение с нахождением наиболее слабой линии и КЗУ достигается с применением метода динамического программирования [1].

Рассмотрим возможный порядок решения задачи об оценке устойчивости одиночной подземной выработки, сечение которой в направлении, перпендикулярном ее протяжен-

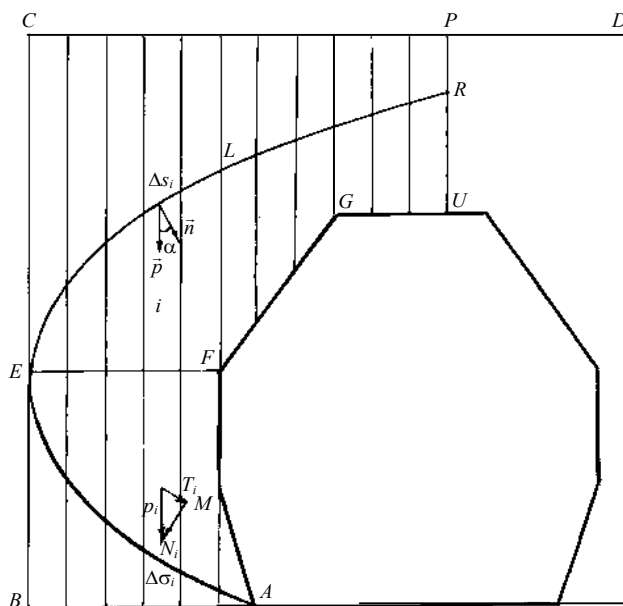


Рис. 1. Схема к постановке задачи об устойчивости подземных выработок

ности, представлено на рис. 1.

Выберем систему координат XOY так,

чтобы ось OX была направлена вправо, ось OY вертикально вверх, а координаты самой

выработки и искомой наиболее слабой линии (НСЛ) имели заведомо положительные значения.

Задача ставится так. В замкнутой области $ABCPUGFGFMA$ нужно найти такую линию, для которой значение КЗУ будет иметь минимальное значение. При этом искомая линия должна начинаться в точке A и заканчиваться в какой-нибудь точке отрезка PU .

Для решения задачи разобьем область возможных положений НСЛ на ряд вертикальных отсеков равной ширины. Приведем порядок подсчета удерживающих и сдвигающих сил для некоторой произвольно выбранной линии $AELR$. Найденные значения этих сил позволяют определить величину критерия оптимизации – КЗУ.

Рассмотрим произвольный i -й отсек, верхняя и нижняя границы которого целиком расположены в допустимой области возможного положения НСЛ. На площадке $\Delta\sigma_i$ нижней границы этого отсека в обычном порядке подсчитаем удерживающие силы внутреннего трения и сцепления. Также легко могут быть найдены сдвигающие силы, определяемые весом вышележащих пород отсека и наклоном площадки $\Delta\sigma_i$. На верхней площадке $\Delta\sigma_i$ имеют место лишь удерживающие силы сопротивления отрыву и срезу, которые могут быть подсчитаны с применением формулы

$$\Delta N = \frac{RC}{R \sin \alpha + C \cos \alpha}, \quad (1)$$

где R – сопротивление отрыву пород; C – сопротивление срезу; α – угол между нормалью к рассматриваемой площадке и направлением сдвига.

Из формулы (1) видно, что при $\alpha = \pi/2$ имеет место чистый срез, а при $\alpha = 0$ – чистый отрыв. При промежуточных значениях угла α на рассматриваемой площадке имеют место отрыв и срез.

Будем считать, что тело, ограниченное линией $AELR$, отрезком RU и контуром выработки, сдвигается как единое целое. Возникает вопрос, как следует учитывать вес пород, заключенных в области $FLRUGF$. Подсчитаем средневзвешенный наклон площадок $\Delta\sigma_i$ на участке AE с учетом высоты соответствую-

ющих отсеков. Эту величину примем за средний наклон площадок $\Delta\sigma_i$ на этом участке и отнесем вес пород в области $FLRUGF$ к этому среднему наклону. К подсчитанным ранее суммам удерживающих и сдвигающих сил на участке AE прибавим соответствующие силы, вызываемые весом пород в области $FLRUG$. Сделаем еще такое допущение: на участке LR имеет место чистый срез, а на участке RU – отрыв и срез.

Принятые допущения, по существу, задают напряженное состояние пород в окрестности рассматриваемой выработки. Эти допущения позволяют определить суммы удерживающих и сдвигающих сил, а также значение КЗУ для любой линии, начинающейся в точке A , расположенной на контуре выработки и в области $ABCPUGFGFMA$, и заканчивающейся на отрезке RU . Вычислительный процесс можно повторить, изменив положение отрезка RU , на котором заканчивается НСЛ. Можно также изменить начало НСЛ, выбрав иное положение точки A на контуре выработки.

Нужно найти линию, начинающуюся и заканчивающуюся на контуре выработки, для которой подсчитанное значение КЗУ будет иметь минимальное значение. Такая задача может быть решена с применением метода динамического программирования или метода комплексов [2]. Для линий, одна из которых совпадает с контуром выработки, а другая значительно заглубляется в массив пород, окружающих выработку, значение КЗУ будет бесконечно большим. Между этими крайними возможными положениями НСЛ, очевидно, находится ее истинное положение. Наличие линий ослабления в окрестности выработки, где физико-механические свойства пород изменяются как на самой линии, так и от слоя к слою, не является непреодолимым препятствием.

В таком же порядке можно решать задачи об устойчивости камер и междуканальных целиков при применении той или иной системы разработки (рис. 2).

При этом представляется возможным получить количественную оценку устойчивости не только одиночной выработки, но и совокупности выработок. Положение НСЛ или отдельных ее участков может также задаваться исходя из логических соображений. Важно, чтобы вопрос об устойчивости подземных

выработок и их совокупности решался на основе вариации расчетных поверхностей в окрестности этих выработок с нахождением

такой линии, для которой найденное значение КЗУ было бы минимальным.

Автор отдает себе отчет, что рассмотрен-

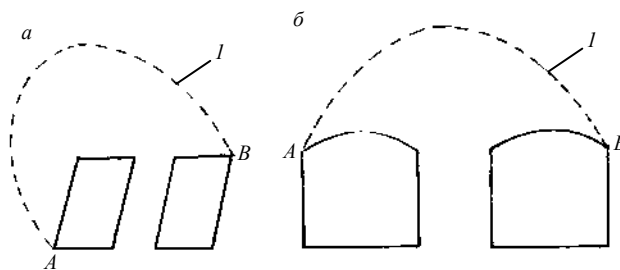


Рис. 2. Схемы к расчету устойчивости камер и междукамерных целиков:

l – линии, ограничивающие положение наиболее слабой линии

ный порядок нахождения КЗУ подземных выработок и их систем далеко не совершенен. Однако при всех его недостатках представля-

ется возможность получить сравнительную количественную оценку степени устойчивости подземных выработок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников М. А. Вариационный метод в расчетах устойчивости горных выемок и сооружений. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, Deutschland.
2. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике / пер. с англ. Т. 1. М.: Мир, 1986.

Поступила в редакцию 14 июня 2013 г.

Резников Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики. 455000, Магнитогорск, просп. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет. E-mail: Reznikotkos@mail.ru