

УДК 622.026

А.С. Курилко, М.М. Иудин

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО
ПОРОДНОГО МАССИВА И КРЕПИ ГОРНЫХ
ВЫРАБОТОК, ПРОЙДЕННЫХ В УСЛОВИЯХ
КРИОЛИТОЗОНЫ**

В статье рассмотрены условия протекания геомеханических процессов в многолетнемерзлом породном массиве вокруг выработки в результате прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурной области в окрестности выработки с учетом температурной зависимости механических свойств пород. На основе этих результатов разработаны методы расчета термомеханического взаимодействия многолетнемерзлого массива горных пород с крепью вертикального ствола для условий Севера.

Ключевые слова: крепь горных выработок, многолетнемерзлый массив, температурный режим.

Неделя горняка

Анализ эксплуатации горных выработок в районах Севера показывает, что поддержание крепи в устойчивом состоянии обуславливается состоянием температурного поля породного массива. При сохранении горных пород вокруг выработки в мерзлом состоянии условия обеспечения устойчивости более благоприятные, чем при оттаивании этих пород. Это объясняется цементирующим действием замерзшей воды в порах и трещинах, которая соединяет трещиноватые породы в монолитный массив, обеспечивая тем самым повышенную прочность мерзлых пород. При оттаивании льда нарушается связность, ослабевает сцепление отдельных кусков, блоков мерзлых пород. Вследствие этого изменяются прочностные и деформационные свойства горных пород в массиве.

В традиционных упруго-пластических моделях зону пластических деформаций принимают равной размеру зоны протаивания вокруг горной выработки. Это справедливо при не-

большой глубине протаивания мерзлых пород, характерной для выработки с естественным (нерегулируемым) тепловым режимом. При положительном тепловом режиме глубина протаивания вокруг выработки значительно превышает размеры зоны пластических деформаций. Для условий, когда зона протаивания больше области пластических деформаций, разработан метод расчета термомеханического взаимодействия, в основу которого положен принцип совместного деформирования системы "крепь выработки — массив горных пород" [1, 2]:

$$U_{\alpha}(P) = U_0 + U(P), \quad (1)$$

где $U_{\alpha}(P)$ — смещение породного контура к моменту установления статического равновесия в системе крепь — массив; U_0 — начальные смещения породного контура до момента ввода крепи в работу; $U(P)$ — смещение внешнего контура крепи при статическом равновесии в системе крепь — массив.

Постановка задачи. Пусть в мерзлом массиве с естественной температурой пройдена вертикальная выработка, в которой поддерживается положительный тепловой режим. Тогда под влиянием положительного теплового потока вокруг ствола будет происходить повышение температуры пород в приконтурном слое, и зона протаивания радиусом r_T постепенно будет отодвигаться вглубь массива пород. Размеры области определяются тепловыми свойствами пород и условиями теплообмена на поверхности выработки. Считаем, что эти параметры нам известны. Принимаем, что внутри зоны протаивания формируется область пластических деформаций, в которой условие пластичности принимаем в виде огибающей предельных кругов Мора.

Таким образом, фиксируем в расчетной схеме взаимодействия вертикального ствола с массивом многолетнемерзлых горных пород две зоны: зону пластических деформаций и остальная область — массив пород, деформирование которых описывается законом упругости. В зоне пластических деформаций соблюдаются уравнения равновесия напряжений и условие пластичности в виде прямолинейной огибающей кругов Мора. На границе зоны пластических деформаций и зоны протаивания с одной стороны, и на границе зоны протаивания и мерзлого массива имеем равенство перемещений и радиальных напряжений.

В области пластических деформаций перемещение горных пород определяется по формуле:

$$U = \frac{(1 + \nu_T)(1 - 2\nu_T)[B_1 + (a_1 - 1)q]r_n^2}{E_T[(a_1 + 1)(1 - 2\nu_T) - (a_1 - 1)\eta_1 r_n^2]} r, \quad (2)$$

$$\eta_1 = \frac{1 - 2\nu_T}{r_T^2} \left[1 - \frac{(1 + \nu_T)\eta_2}{E_T} \right],$$

$$\eta_2 = \frac{E}{1 + \nu}.$$

$$a_1 = \frac{1 + \sin \rho_m}{1 - \sin \rho_m}, \quad B_1 = \frac{2k_m \cos \rho_m}{1 - \sin \rho_m},$$

где E_T — модуль упругости горных пород в талом состоянии; ν_T — коэффициент Пуассона горных пород в талом состоянии; E — модуль упругости горных пород в мерзлом состоянии; ν — коэффициент Пуассона горных пород в мерзлом состоянии; q — нагружение расчетной схемы на внешней границе силами тяжести горных пород; ρ_T — угол внутреннего трения пород в талом состоянии; k_T — коэффициент сцепления пород в талом состоянии.

Радиус пластической области определяется по формуле:

$$\eta_3 D_1 + \left[P + \frac{B_1}{a_1 - 1} \right] r_n^{(a_1 - 1)} = q + \frac{B_1}{a_1 - 1},$$

$$\eta_3 = \frac{E_T}{1 + \nu_T} \left(\frac{1}{r_n^2} - \frac{1}{r_T^2} \right) - \frac{\eta_2}{r_T^2}.$$

Величина пластических деформаций зависит от величины соотношения модуля упругости мерзлых пород к модулю упругости талых пород $\eta_v = E/E_T$ (коэффициент упругой неоднородности). Увеличение коэффициента упругой неоднородности с 1,1 до 3,0 в зоне протаивания приведет к возрастанию пластических перемещений пород на поверхности крепи выработки в 2,5 раза (рис. 1). Зона протаивания, образуемая между массивом мерзлых пород и областью пластических деформаций, выступает в роли демпфирующего слоя, позволяет уменьшить уровень напряженного состояния в пластической области.

При небольшой разнице размеров зоны протаивания и пластических деформаций перемещение породного контура выработки в зависимости от величины коэффициента упругой неоднородности носит сложный характер (рис. 2).

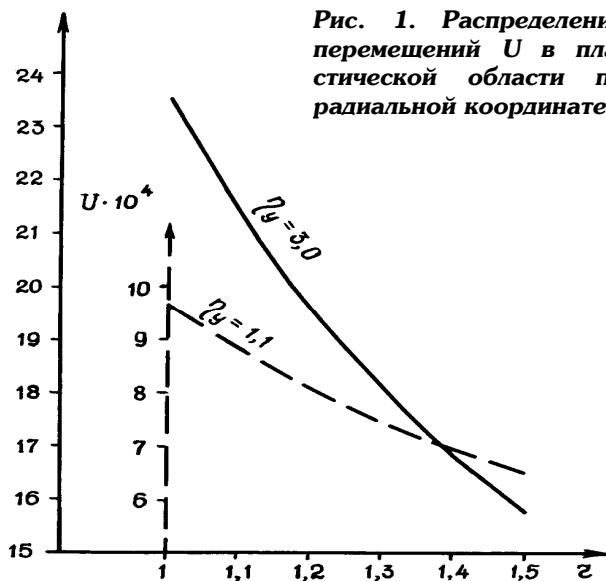


Рис. 1. Распределение перемещений U в пластической области по радиальной координате r

При значении коэффициента упругой неоднородности $\eta_v = 1,1$ кривая плавно опускается вниз, а при возрастании коэффициента кривая перемещений достигает максимального значения в данном примере при радиусе протаивания 3,5 ($\eta_v = 3,0$). Это объясняется совместным влиянием изменения упругих свойств горных пород и размера зоны протаивания на величину перемещений в области пластических деформаций.

Таким образом, разработан метод расчета влияния упругих свойств горных пород в зоне протаивания на изменение напряженно-деформированного состояния пластической области, что обеспечивает оценку максимально возможной нагрузки на крепь выработки от развития пластических деформаций в зоне протаивания при взаимодействии многолетнемерзлого породного массива и крепи горных выработок.

Пластическое деформирование мерзлых пород ввиду разнообразия типов структуры, текстуры и физико-механических свойств многофазной

системы является сложным явлением для прогнозирования при взаимодействии породного массива с крепью горной выработки. Из всех компонентов мерзлой породы наиболее подверженным пластическому деформированию считается лед. Условия протекания деформационных процессов в чистом льде, как отдельного твердого тела, приводят в зависимости от уровня напряженного состояния к смене механизмов деформирования льда. Как отмечает В.И. Соломатин, порядок изменения деформирования кристаллов льда соответствует

следующей схеме: сначала наблюдаются пластические деформации, а затем, по мере роста напряжений, наступают хрупкие деформации. Наличие большого количества размеров и форм кристаллов льда предполагает множество путей реализации механизмов деформирования и их развитие от уровня действующих напряжений.

Принцип совместного деформирования системы "крепь выработки — массив горных пород" дает возможность учитывать влияние новых геомеханических ситуаций, возникающих при эксплуатации горной выработки, на расчет параметров крепи. В основе принципа лежит условие контактного деформирования приконтурного слоя массива горных пород и внешней поверхности конструкции крепи выработки. Принцип совместного деформирования позволяет комплексно учитывать различные виды деформаций породного массива, которые можно разделить на деформации, вызванные собственно проведением выработки, и на деформации,

обусловленные осложненными горно-геологическими, геокриологическими и горнотехническими условиями. Это дает возможность использовать комбинированный способ расчета составляющих системы взаимодействия.

Уравнение совместности перемещений контура породного обнажения и внешней поверхности крепи выработки описывается формулой (1).

Пластические деформации в отличие от упругих накапливаются в породном массиве даже в случае снятия причин, их вызвавших. Для многолетнемерзлого массива пород пластические деформации имеют температурную зависимость, особенно при фазовом переходе. Учитывать многократные процессы изменения температурного состояния, при которых происходит рост пластических деформаций, целесообразно, формулируя разные постановки геомеханических задач, соответствующие температурным режимам многолетнемерзлого породного массива вокруг выработки. Тогда, влияние роста пластических деформаций в процессе эксплуатации выработки можно учитывать через условие совместности деформаций (1), применяя принцип суперпозиции. Учет пластических деформаций по условию (1) можно осуществить двумя способами.

С одной стороны, можно рекомендовать накапливать расчетные значения пластических деформаций в компоненте условия (1), характеризующего смещение породного контура к моменту установления статического

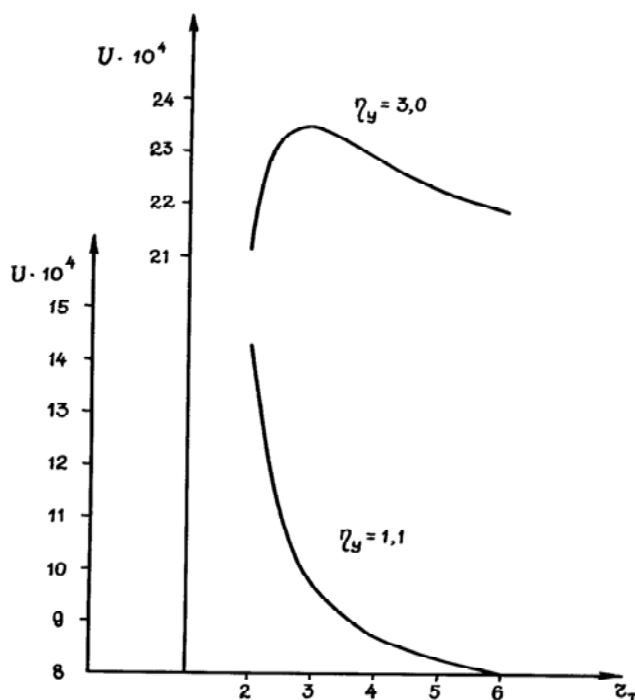


Рис. 2. Зависимость пластических перемещений от величины радиуса зоны протаивания и коэффициента упругой неоднородности

равновесия в системе «крепь — массив»:

$$U_{\infty}(P) = \sum U_i.$$

Условие модифицируем следующим образом:

$$U_{\infty}(P) = (Q - P) \sum A_i.$$

Тогда параметры взаимодействия будут определяться непосредственно из условия (1).

В режиме взаимовлияющей деформации породного массива слагаемому условия (1), относящуюся к величине смещения контура поверхности крепи выработки, представим в виде:

$$U(P) = B \cdot P,$$

где P — расчетная нагрузка на крепь выработки, определяемая как результат совместного деформирования породного массива и крепи.

Параметры взаимодействия породного массива и крепи выработки по условию (1) составят:

$$P = \frac{Q \sum A_i - U_0}{B + \sum A_i}.$$

Анализ выражения показывает, что с накоплением пластических деформаций в породном массиве происходит увеличение значений расчетной нагрузки на крепь выработки. Причем амплитуда увеличения нагрузки будет определяться величиной исходной силовой нагрузки в породном массиве.

Если взаимодействие происходит в режиме заданной деформации, то можно получить аналогичным образом расчетную нагрузку и в этом случае:

$$P = \frac{\sum A_i - U_0}{B}.$$

Второй способ заключается в возможности накапливать пластические деформации в компоненте начальных смещений породного контура до момента ввода крепи в работу:

$$U_0 = \sum U_i.$$

В данном случае необходимо при каждом суммировании пластических деформаций определять параметры взаимодействия породного массива и крепи выработки. Например, для режима заданной деформации породно-

го массива расчетная нагрузка на крепь выработки будет равна:

$$P_i = \frac{U_\infty - \sum U_i}{B}.$$

А общую нагрузку на крепь выработки можно определить суммированием расчетных параметров взаимодействия:

$$P_{\text{общ}} = \sum P_i.$$

В этом способе учета пластических деформаций сложность решения задачи заключается в правильном определении компоненты $U_\infty(P)$ условия (1). Те приемы, что известны в геометрических задачах, будут неприемлемы в рассматриваемом варианте, хотя возможность таким образом определять нагрузку на крепь выработки является вполне логически обоснованной.

Таким образом, предлагается два способа расчета параметров взаимодействия многолетнемерзлого породного массива и крепи, учитывая, что породный массив на протяжении длительного периода эксплуатации выработки, в зависимости от сезонных изменений температурного режима пород, имеет тенденцию постепенно накапливать пластические деформации в приконтурной области породного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. — М.: Недра, 1986. — 272 с.
2. Белаенко Ф.А. Расчет крепи стволос шахт на больших глубинах в условиях Донецкого бассейна // Разработка угольных месторождений на больших глубинах. — М. — 1955. — С.25-32. **ИДБ**

Коротко об авторах

Курилко А.С. — доктор технических наук, заведующий лабораторией,
Иудин М.М. — кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск
e-mail: igds@ysn.ru