

УДК 622.283

Иудин М.М. (Северо-Восточный федеральный университет)

ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНОРАЗВЕДОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ С УЧЕТОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

*Рассмотрена и решена задача прогноза напряженно-деформированного состояния массива мерзлых горных пород с учетом перехода зоны протаивания через зону пластических деформаций. **Ключевые слова:** массив горных пород, мерзлое состояние, пластическая деформация, зона протаивания, напряженно-деформированное состояние.*

Iudin M.M. (North-Eastern federal university)

FORECAST STRESS STATE OF FROZEN ROCK MASSIF GORNORAZVEDOCHNOY AROUND DEVELOPMENT IN VIEW OF PLASTIC DEFORMATION

*Considered and solved the problem of the forecast of the stress-strain state of frozen rocks, taking into account the transition zone of thawing through a zone of plastic deformation. **Key words:** massif of rocks, frozen condition, plastic deformation, a zone thawing, stress—deformed condition.*

Массив многолетнемерзлых горных пород является твердым телом, состоящим из минерального скелета и пустот, заполненных жидкой и твердой фазами воды. В процессе силового давления со стороны породного массива минеральный скелет проявляет разные стадии деформирования (упругое, пластическое, вязкое). В зависимости от соотношения параметров напряженного и прочностного состояния породного массива можно предположить одновременность протекания разных видов деформаций в разных точках приконтурного слоя массива.

При сохранении в мерзлом естественном состоянии горных пород вокруг выработки условия обеспечения устойчивости породного обнажения более благоприятные, чем при оттаивании этих пород. Это объясняется цементирующим фактором замерзшей воды в порах и трещинах, которая соединяет трещиноватые породы в монолитные блоки и агрегаты, обеспечивая тем самым повышенную прочность мерзлых пород. При оттаивании льда нарушается монолитность и связность породного массива. Ослабевает сцепление отдельных кусков, блоков мерзлых пород. Вследствие этого изменяются прочностные и механические свойства пород в приконтурном слое массива. Кроме того, под влиянием изменяющейся геомеханической обстановки вокруг выработки по причине зависимости физико-механических свойств пород от температуры, происходят процессы, вызывающие дополнительное деформирование породного обнажения. Изменение основных механических свойств многолетнемерзлого

массива пород связано с образованием зоны протаивания вокруг выработки.

В статье [1] рассмотрено взаимодействие выработки с массивом многолетнемерзлых горных пород, когда образование зоны пластических деформаций вокруг выработки происходит без протаивания, а в остальной части массива деформирование описывается законом Гука (упругости).

Задача, когда в зоне протаивания горные породы проявляют пластические деформации нами решена в статье [2]. Если в зоне протаивания горные породы начинают деформироваться как упругие твердые тела, т.е. происходит смена вида деформирования, то это может привести к тому, что в области протаивания горные породы будут деформироваться по упругой схеме. Данный случай рассмотрен в статье [3].

В отличие от этих решенных задач рассмотрим следующий вариант деформирования горных пород в зоне протаивания.

Напряженно-деформированное состояние массива горных пород будет определяться общими решениями задач, приведенных в работах [1, 2, 3]. Отличие будет заключаться в прогнозе развития деформаций в зоне протаивания вокруг выработки. При переходе зоны протаивания (радиус r_T) через границу области пластических деформаций (радиус r_n) вокруг горноразведочной выработки образуются по условиям протекания механических процессов три зоны: пластическая зона, переходная и массив многолетнемерзлых пород.

Если рассмотреть теплофизические аспекты влияния на механические процессы в породном массиве, то наиболее значимой следует принять переходную зону. Предполагаем, что переходная зона ограничивается глубиной протаивания мерзлой породы, а свойства мерзлой породы в ореоле протаивания изменяются скачкообразно на фронте фазового перехода. Принимаемые в области ($r_n \leq r \leq r_m$) модуль упругости и коэффициент Пуассона горных пород равны их значениям в талом состоянии, а в остальной части массива — равны при естественной отрицательной температуре.

Тогда, в области пластических деформаций распределение дополнительных перемещений определяется по формуле:

$$U^{(1)} = \frac{D_1}{r}, \quad (1)$$

$$a_1 = \frac{1 + \sin \rho_m}{1 - \sin \rho_m}, \quad \varepsilon_1 = \frac{2k_m \cos \rho_m}{1 - \sin \rho_m},$$

$$D_1 = \frac{(1 + \nu_T)(1 - 2\nu_T)[\varepsilon_1 + (a_1 - 1)q]r_n^2}{E_T[(a_1 + 1)(1 - 2\nu_T) - (a_1 - 1)\eta_6 r_n^2]},$$

$$\eta_6 = \frac{1 - 2\nu_T}{r_T^2} \left[1 - \frac{(1 + \nu_T)\eta_5}{E_T} \right],$$

$$\eta_5 = \frac{E_m}{1 + \nu_m}.$$

где ρ_m — угол внутреннего трения пород в талом состоянии; k_m — коэффициент сцепления пород в талом состоянии; E_T , E_m — модуль упругости горных пород в талом и мерзлом состояниях; ν_T , ν_m — коэффициент Пуассона горных пород в талом и мерзлом состояниях; r — радиальная координата. Радиус пластической области находится из решения трансцендентного уравнения, которое выводится из равенства радиальных напряжений на границе зон протаивания и пластических деформаций:

$$\eta_7 D_1 + \left[P + \frac{\sigma_1}{a_1 - 1} \right] r_n^{(a_1-1)} = q + \frac{\sigma_1}{a_1 - 1}, \quad (2)$$

$$\eta_7 = \frac{E_T}{1 + \nu_T} \left(\frac{1}{r_n^2} - \frac{1}{r_T^2} \right) - \frac{\eta_5}{r_T^2}.$$

где r_T — радиус зоны протаивания горных пород; r_n — радиус области пластических деформаций; q — внешняя сила, равная γH , где γ — плотность горных пород, H — глубина, на которой расположена горноразведочная выработка; P — реакция отпора крепи выработки, если отсутствует крепь, то $P = 0$.

Анализ результатов расчетов показывает, что наиболее существенное влияние на формирование пластической области оказывают размеры зоны протаивания. При малых размерах зон протаивания наблюдаются максимальные радиусы пластической области. С увеличением своей толщины переходная зона выступает в роли демпфирующего слоя, что приводит к понижению уровня напряжений и, соответственно, к уменьшению радиуса пластической области. Влияние изменения модуля упругости пород в талом состоянии неоднозначно. Данный фактор следует рассматривать отдельно, чтобы определить его влияние на размеры пластической области.

Кроме того, следует отметить другой интересный результат. При небольшой разнице размеров зон протаивания и пластических деформаций перемещение породного обнажения в зависимости от величины коэффициента упругости талых пород носит сложный характер.

Таким образом, результаты исследований, опубликованные в работах [1, 2, 3], расширены вариантом, когда горные породы в зоне протаивания проявляют пластические свойства, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния на контуре горноразведочной выработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иудин М.М. Расчет крепи выработки с учетом пластических деформаций мерзлых горных пород // Вестник Якутского государственного университета. — Якутск. — 2009. — Т. 6. — № 3. — С. 26–30.
2. Курилко А.С., Иудин М.М. Методы расчета термомеханического взаимодействия многолетнемерзлого породного массива и крепи горных выработок, пройденных в условиях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 11. — С. 311–315.
3. Иудин М.М. Напряженное состояние массива горных пород с учетом зоны протаивания и пластических деформаций // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 12. — С. 54–56.

© Иудин М.М., 2015

Иудин Михаил Михайлович // mmi_52@mail.ru

Николаева М.В., Бердыев С.С., Попов В.В., Иванов А.В. (Северо-Восточный федеральный университет), Капитонова Т.А., Стручкова Г.П. (Институт физико-технических проблем Севера СО РАН)

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА С ОКРУЖАЮЩИМ ГРУНТОМ

*Приведен анализ моделей силового взаимодействия подземного трубопровода с окружающим грунтом. Выбрана наиболее оптимальная модель оценки напряженно-деформированного состояния. По этой модели методом конечных элементов произведен расчет напряженно-деформированного состояния участка трубопровода. **Ключевые слова:** магистральный трубопровод, напряженно-деформированное состояние, сопротивление грунта, метод конечных элементов.*

Nikolaeva M.V., Berdyev S.S., Popov V.V., Ivanov A.V. (North-Eastern federal university), Kapitonova T.A., Struchkova G.P. (Institute of Physical and Technical Problems of the North)

ANALYSIS OF MODELS OF FORCE INTERACTION OF UNDERGROUND PIPELINE TO THE SURROUNDING SOIL

*The article provides an analysis of patterns of force interaction of underground pipeline to the surrounding soil, choose the best model for evaluating the stress-strain state. The finite element method calculated the stress-strain state of the pipeline section on this line. **Key words:** main pipeline, the stress-strain state, the resistance of the soil, the finite element method.*

На трубопроводах России ежегодно происходят более 40 тысяч отказов и аварий, потери составляют более 3 % от полного объема добычи нефти и газа. Значительная часть аварий обусловлена воздействием на трубопроводы нештатных нагрузок. В связи с этим при определении технического состояния трубопроводов необходимо контролировать изменение напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации. Подземные магистральные трубопроводы, прокладываемые в сложных инженерно-геологических условиях, подвержены значительным пространственным перемещениям и находятся в сложном силовом взаимодействии с окружающими грунтами. Процесс изменения проектного положения обусловлен сложным сочетанием эксплуатационных и инженерно-геологических факторов.

Воздействие со стороны грунта может быть осуществлено силовым, тепловым, влажностным, химическим, коррозионным, биологическим и другими способами. В свою очередь, трубопровод влияет на окружающий грунт как через постоянные нагрузки (вес трубы, ее давление на грунт и т.д.), так и временные длительные, обусловленные изменением температуры и давления перекачиваемого продукта по длине трассы.

Оценка напряженно-деформированного состояния трубопровода связана с закономерностями его взаимодействия с грунтом, а одним из главных условий объективного расчетного анализа напряженно-деформированного состояния и оценки прочности является