

УДК 622.271.333:622.02

В.И. Слепцов

УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТА КАРЬЕРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Методом конечных элементов рассчитано напряженно-деформированное состояние уступов борта карьера, где в качестве областей неоднородности по механическим и прочностным свойствам, приняты максимальные ореолы оттаивания, которые определены из расчетов температурного поля уступа борта карьера. Проведено исследование влияния на устойчивость уступов борта карьера таких факторов, как сцепление и угол внутреннего трения горных пород, предел горных пород на одноосное растяжение и упругие характеристики многолетнемерзлых горных пород.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, механика горных пород, устойчивость откоса, метод конечных элементов.

Откосом называется искусственно созданная поверхность, ограничивающая природный породный массив, выемку или насыпь. Откосы образуются при возведении различного рода насыпей (дамбы, земляные плотины и т.д.) и выемок (карьеры, котлованы и т.д.).

При неблагоприятном сочетании разнообразных факторов породный массив, ограниченный откосом, может перейти в неравновесное состояние и потерять устойчивость.

Для многолетнемерзлых горных пород одним из основных факторов, влияющим на потерю устойчивости откосов, является изменение характеристик прочности пород или снижение ее сопротивления сдвигу за счет изменения температуры (оттаивания). Кроме того, исследования показали, что на физико-механические свойства многолетнемерзлых горных пород существенно влияет количество циклов промерзания–оттаивания [1].

Инженерные расчетные методы оценки степени устойчивости откосов основаны на применении теории предельного равновесия, рассматриваю-

щей предельное напряженное состояние породного массива.

В инженерных методах расчета принимается ряд условных допущений, которые в общем случае являются недостатками данных методов: используется гипотеза затвердевшего тела (призма возможного смещения рассматривается в виде затвердевшего клина); допускается определенная форма поверхности скольжения, которая как правило, принимается уже установленной; при использовании основным критерием прочности Кулона-Мора ($\tau = c + \sigma \tan \varphi$) напряжения заменяются силами; в некоторых методах силы взаимодействия между отсеками, на которые разбивается оползневой блок, не учитываются; принимаются излагаемые далее допущения о значениях и проявлениях давления грунтовых вод и сейсмической силы; в некоторых методах при рассмотрении равновесия массива принимается одно уравнение статики; в отдельных случаях теория предельного равновесия применяется к породному массиву, находящемуся в за-предельном состоянии.

Эти методы расчета, хотя и не вполне математически и физически строгие, до сих пор успешно используются для разработки простых инженерных способов оценки устойчивости откосов [2, 3].

Когда поверхность скольжения не предопределена геологическим строением склона и наиболее опасное ее положение нельзя установить по материалам инженерно-геологических изысканий, оценку устойчивости склона можно произвести вариационными методами расчета.

Вариационные методы расчета являются наиболее корректными, позволяющими избежать допущений, принятых в инженерных методах расчета, и использовать разные модели деформирования горных пород и критерии разрушения. Основными недостатками этих методов считалась необходимость применения ЭВМ с использованием специальных прикладных пакетов программ. Данный недостаток в настоящее время является несущественным.

Наиболее распространенным вариационным методом анализа напряженно-деформированного состояния склона является метод конечных элементов (МКЭ).

Расчет по МКЭ условно можно разделить на следующие этапы:

- задание расчетной области с выделением характерных областей и механических свойств для выделенных областей;
- задание граничных условий на границах расчетной области и выделенных областей;
- разбиение расчетной области на конечные элементы (выбор типа и размера конечных элементов в выделенных областях);
- выбор характера деформирования материала (упругий, пластиче-

ский и пр.) и критерия разрушения (Кулона-Мора, Друкера-Прагера, Хука-Брауна и др.);

- расчет напряжений (деформаций, перемещений), графическое представление и интерпретация результатов расчета.

Для упругой плоской задачи методом конечных элементов с помощью программы «Phase2» рассчитано напряженно-деформированное состояние уступов борта карьера, где в качестве областей неоднородности по механическим и прочностным свойствам, приняты в максимальные ореолы оттаивания, которые определены из расчетов температурного поля уступа борта карьера [5]. В качестве критерия разрушения выбран критерий Кулона-Мора.

Расчетная область, которая принималась изотропной средой, показана на рис.1.

Высота уступов составляла 30.0 м, ширина бермы 5.0 м, угол откоса 70 градусов. Глубина оттаивания на наклонной поверхности составляла 2.8 м, на горизонтальной поверхности – 2.0 м.

Для нетронутых многолетнемерзлых горных пород принимались следующие характеристики (соответствует средним значениям для доломита): модуль упругости Юнга $E = 45,0$ ГПа,

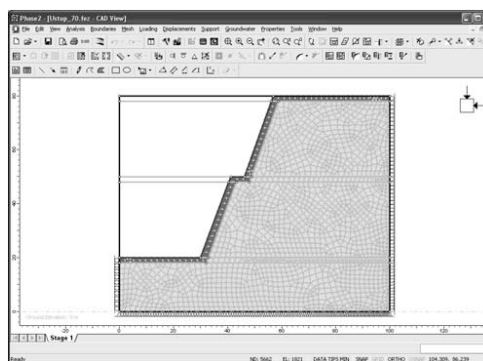


Рис. 1. Расчетная область

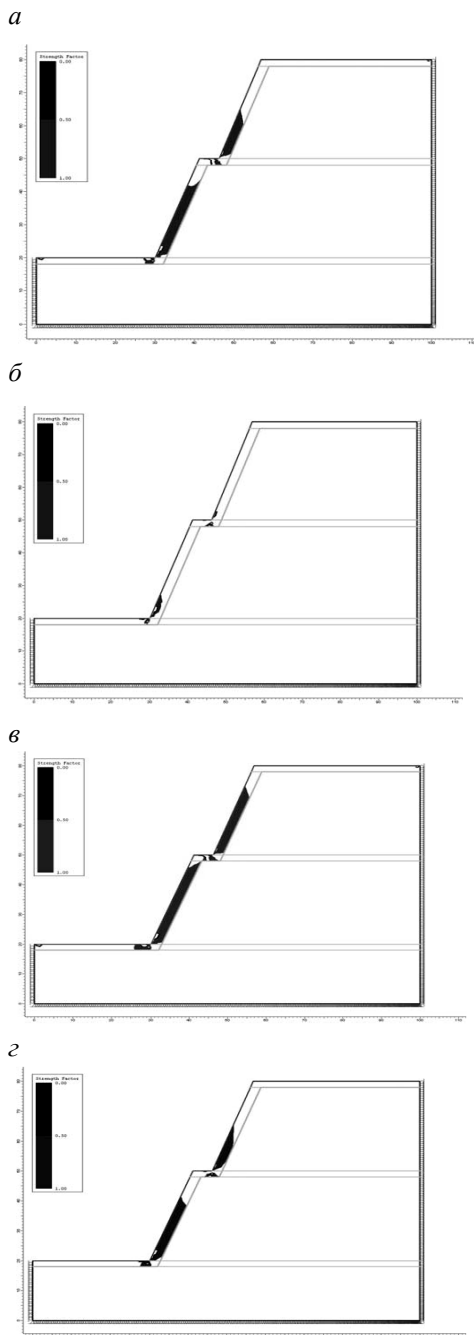


Рис. 2. Неустойчивые области откоса (выделено темным): а – $c = 0,1$ МПа, $E = 45,0$ ГПа; б – $c = 0,1$ МПа, $E = 22,5$ ГПа; в – $c = 0,05$ МПа, $E = 45,0$ ГПа; г – $c = 0,05$ МПа, $E = 22,5$ ГПа

коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, плотность $\rho = 2700,0$ кг/м³, предел прочности на одноосное растяжение $\sigma_p = 6,0$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 40^\circ$, сцепление $c = 40,0$ МПа. Экспериментальными исследованиями установлено, что в зоне фазовых переходов (замерзание поровой влаги) происходит резкое падение (на 50 %) прочности карбонатных горных пород. При дальнейшем понижении температуры прочность увеличивается, но, как правило, не превышает прочности при положительных температурах. При повторных циклах оттаивания-замерзания происходит резкое понижение остаточной прочности и разрушение отдельных типов карбонатных горных пород [1]. Также известно, что талые горные породы имеют меньший модуль упругости, чем мерзлые. Поэтому в областях неоднородностей характеристики изменялись в следующих пределах (используются те же единицы, что и для нетронутых многолетнемерзлых горных пород): $22,5 < E < 45,0$; $0,15 < \nu < 0,25$; $0,0 < \sigma_p < 6,0$; $30 < \varphi < 40$; $0,01 < c < 40,0$. В расчетах всегда принималось, что $\sigma_p < c$.

Расчеты показали, что основное влияние на образование и размеры неустойчивых областей рассматриваемого откоса оказывает сцепление c и модуль упругости горных пород E . Остальные факторы в рассматриваемых интервалах существенного влияния не оказывают.

При принятой в расчетах конфигурации склона для $c > 1,0$ МПа (остальные характеристики горных пород могут быть произвольными), откос является абсолютно устойчивым, т.е. неустойчивых областей выявлено не было. Существенные размеры неустойчивых областей появляются при $c < 0,5$ МПа.

Снижение модуля упругости E приводит к уменьшению размера не-

устойчивых областей, причем с уменьшением c убывает влияние модуля упругости E (рис. 1).

При $c < 0,01$ МПа модуль упругости E практически перестает оказывать влияние на размеры неустойчивых областей.

Таким образом, установлено, что на устойчивость откоса в многолетнемерзлых горных породах наибольшее влияние оказывают сцепление и модуль упругости горных пород, причем их влияние является разнонаправленным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курилко А.С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород – Якутск: ЯФ ГУ. Изд-во СО РАН, 2004

2. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. – М.: Госстройиздат, 1962.

3. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. (Оползни и борьба с ними). – М.: Стройиздат, 1977

4. Слепцов В.И. Исследование методом математического моделирования процессов оттаивания-промерзания на наклонных по-

верхностях различной ориентации и крутизны. //Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 9. – С. 61–65.

5. Sleptsov V.I. Estimation of thickness of layer sloughing of the pit edge owing to influence of cyclic sign-variable temperature processes. //Proceedings of the IV International geomechanics conference. Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and the construction. 3–6 June, 2010. Varna, Bulgaria. – P.160–166. **ГИАБ**

Коротко об авторе

Слепцов В.И. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН, v.i.sleptsov@igds.ysn.ru



Моя статья в ГИАБе будет прочитана только российскими инженерами или может заинтересовать зарубежных специалистов?

ГИАБ распространяется не только в России. Есть подписчики на Украине, в Белоруссии, Монголии, Германии и других странах. Электронные версии запрашиваются тысячами специалистов. Два информационных агентства рассылают дайджест по материалам ГИАБа во многие страны мира. Аннотации статей на английском языке позволяют практически всем специалистам работать с информационными материалами ГИАБа. По количеству интернет-запросов «eLibrary» ГИАБ входит в первую пятерку научно-технических журналов России.

