

УДК 622.271.332 : 624.131.537

**Жабко Андрей Викторович**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры маркшейдерского дела,  
Уральский государственный  
горный университет,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30  
e-mail: [zhabkoav@mail.ru](mailto:zhabkoav@mail.ru)

### О ПРОБЛЕМАХ И СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДАХ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

*Аннотация:*

*В работе кратко рассматриваются основные проблемные вопросы геомеханики открытых разработок. Указывается на безальтернативность метода предельного равновесия при оценке устойчивости карьерных откосов и о необходимости совершенствования нормативной базы по данному вопросу. В этой связи предложена новая теория оценки устойчивости откосов, исключающая целый ряд недостатков существующих способов расчета. На основе данной теории разработаны методики расчета устойчивости откосов практически для условий любой сложности: однородный откос, неоднородный откос, анизотропный откос, обводненный откос, откос на слабом наклонном контакте, откос на слабом наклонном основании, подработанный и закарстованный откос, нагруженный откос, откос несвязных пород на различных основаниях, устойчивость откосов в поле тектонических и сейсмических напряжений. Доказывается, что существующие способы расчета приводят к завышению предельных параметров откосов, что объясняется необоснованностью положения и формы (геометрии) поверхности скольжения в массиве и несостоятельностью критериев устойчивости.*

*Ключевые слова:* откос, напряженно-деформированное состояние, прочностные характеристики трещиноватого горного массива, метод предельного равновесия, тектонические напряжения, поверхность скольжения, критерий устойчивости

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.03.096

**Zhabko Andrey V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, mine surveying department,  
Urals State Mining University,  
620144, Ekaterinburg, Kuybushev street, 30  
e-mail: [zhabkoav@mail.ru](mailto:zhabkoav@mail.ru)

### ON PROBLEMS AND MODERN METHODS OF EVALUATING THE STABILITY OF SLIDES ON OPEN MOUNTAIN WORKS

*Abstract:*

*In the paper the main problematic issues of geomechanics of open-cast minings are briefly considered. The lack of alternative for the method of extreme balance at assessment of stability of career slopes is pointed out, and the need of improvement of the regulatory base on the matter. In this regard, the new theory of assessment of stability of slopes excluding a number of shortcomings of the existing ways of calculation is offered. On the basis of this theory a calculation method the slopes stability is developed, practically for conditions of any complexity: an uniform slope, a non-uniform slope, an anisotropic slope, a flooded slope, a slope on weak inclined contact, a slope on the weak inclined basis which is earned additionally and a carstified slope, a loaded slope, a slope of incoherent breeds on various bases, stability of slopes in the field of tectonic and seismic tension. It is proved that the existing ways of calculation lead to overestimate of extreme parameters of slopes, which is explained by groundlessness of situation and form (geometry) of a surface of sliding in the massif and insolvency of criteria of stability.*

*Key words:* slope, stress-strained state, strength characteristics of the fractured massif, method of extreme balance, tectonic tension, the surface of sliding, criterion of stability

### Постановка проблемы

Проблема оценки устойчивости откосов является весьма актуальной при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом в гидротехническом, транспортном, промышленном и гражданском строительстве, а также в других отраслях деятельности человека.

Применительно к вопросу оценки устойчивости бортов карьеров в нашей стране данный вопрос имеет свою уникальную историю и связан с именами конкретных исследователей, заложивших основу данного направления.

На первом этапе до середины 50-х годов прошлого века устойчивость бортов по существу определялась качественными характеристиками горного массива. К концу 50-х и началу 60-х годов борт карьера стал рассматриваться как геотехническое сооружение, параметры которого можно рассчитывать, используя физико-механические характеристики массива. Этот период связан с такими именами, как С. И. Попов, Г. Л. Фисенко, Ю. Н. Малюшицкий и др. Становление горной геомеханики при открытых разработках как самостоятельного направления науки, имеющего определенные цели и методы исследований, произошло в середине 60-х годов и связано с организацией лабораторий и групп исследователей во ВНИМИ (Г. Л. Фисенко), в Унипромеди (Ю. И. Туринцев), в ИГД МЧМ СССР (В. Г. Зотеев), в ВИОГЕМе (А. И. Ильин), в ИГД им. Скочинского (А. М. Демин), в ГИГХе (М. Е. Певзнер), в Укрниипроекте (Н. Н. Куваев), в СГИ (В. В. Камшилов, Н. Д. Ипполитов, А. В. Шабурников, А. П. Бадулин), в КПИ (М. Л. Рудаков, И. И. Попов) и др. [1].

Подавляющее большинство исследований, посвященных устойчивости горнотехнических сооружений, рассматривают откос как сплошную среду, обладающую внутренним трением и сцеплением. В случае рыхлых пород это оправдано без дополнительных замечаний, по крайней мере, с практической точки зрения. Процессы, происходящие при разрушении откосов с блочным строением, подобны процессам, происходящим в геологических разломах. Описание процесса разрушения блочных сред с трещинами отдельности, имеющими сложную геометрию (фрактал) и чрезвычайно сложный характер деформирования, на сегодняшний день несколько затруднено, хотя серьезные научные проработки по данному вопросу уже имеются. Поэтому для скальных трещиноватых массивов (откосов) горных пород (блочные среды) применяется тот же подход, что и для рыхлых отложений (представление сплошной средой), а пробелы в понимании процессов, происходящих при пластическом деформировании и разрушении блочных сред, вкладывают в собирательную и абстрактную величину – сцепление трещиноватого горного массива. То есть считается, что при такой постановке задачи найдется некая эквивалентная величина сцепления, которая будет характеризовать сдвиговое свойство блочного массива. Поверхности ослабления массива представляются плоской линией с известными параметрами паспорта прочности (без учета сложного механизма разрушения трещины). По поводу абстракции величины сцепления необходимо отметить, что в действительности поверхность разрушения (скольжения) в массиве не является плоской, а собственно разрушение представляет собой совокупность скольжений и вращений отдельных структурных блоков как твердых тел с одновременным их деформированием. В этой связи понятие сцепления несколько отличается от классического представления о сдвиговой характеристике горных пород.

С практической точки зрения такой подход оправдан, однако в этой же связи необходимо отдавать себе отчет, что, без знания механизма протекания процесса деформирования и разрушения блочных сред, точность обоснования величины сцепления трещиноватого массива будет крайне низкой. Вопрос определения прочности трещиноватого горного массива является наиболее острым, впрочем, как и в других направлениях геомеханики. На сегодняшний день при определении прочности горного массива приходится довольствоваться применением эмпирических зависимостей.

Еще одним проблемным вопросом является вопрос установления критических значений деформаций (скоростей деформаций) откосов бортов карьеров и отвалов. Описание напряженно-деформированного состояния откосов посредством механики сплошной среды и особенно теории упругости не отражает основного и фундаментального свойства массива – его иерархически блочного строения. В этой связи такой подход носит лишь оценочный характер, тем более что деформационные характеристики массива также сложно определимы. Представляется перспективным использование моделей блочных сред для определения деформаций трещиноватого массива во времени. Автор

не встречал подобных работ применительно к проблеме оценки деформационных процессов отколов трещиноватых горных массивов, однако такие работы имеются применительно к динамике геологических разломов [2].

На сегодняшний день известны три основных метода оценки устойчивости отколов:

- 1) метод механики сплошной среды;
- 2) метод предельного напряженного состояния;
- 3) метод предельного равновесия.

Все существующие методы оценки устойчивости отколов едины в том смысле, что в качестве предельного условия используют критерий Кулона. Однако, как известно, предельное кулоновское напряжение зависит от нормального напряжения на площадке среза. А вот способы определения тензора напряжений в окрестности поверхности скольжения и установления геометрии критической (наиболее слабой) поверхности скольжения различны.

В связи с развитием математического моделирования геомеханических процессов, расчет отколов может осуществляться посредством метода конечных элементов (МКЭ) [3, 4]. В приоткосной области производится расчет напряженно-деформированного состояния, после чего появляется возможность оценить степень устойчивости вдоль произвольно выбранной поверхности скольжения. Данный подход является современным, однако он вряд ли может претендовать на строгость и получение сколько-нибудь фундаментального решения. Дело в том, что для определения напряженного состояния в откосе необходимо подобрать модель, то есть заведомо наложить на массив какие-то ограничения, например: данный массив будет вести себя как упругое тело во всех своих точках. Кроме того, любая модель имеет свое параметрическое обеспечение, которое определяется для горного массива, мягко говоря, с погрешностями. Единственной теоретически строгой моделью является упругая модель, однако она не подходит для моделирования процессов пластической деформации и разрушения. Поэтому данное направление нуждается в дальнейшем совершенствовании, прежде всего, с точки зрения корректировки модельных представлений теории пластичности. Однако в любом случае данный подход будет ограничен точностью задания (определения) граничных условий и параметрического обеспечения. Кроме того, помимо прочностных характеристик горного массива, необходимо также располагать и деформационными.

Традиционно исследования в области оценки устойчивости отколов идут по двум направлениям. Сразу же оговоримся, что указанные направления представляют собой две абсолютно различные задачи, описывают два различных вида потери устойчивости отколов (обрушения и оползни), а их сравнение некорректно. Первое направление (метод предельных напряженных состояний) отыскивает такую форму откоса и функцию распределения нагрузки на его площадке, при которых в каждой точке области, потерявшей устойчивость (призмы смещения), выполняется условие предельного напряженного состояния. Другими словами, данное направление отыскивает условия обрушения отколов. Однако на практике мы имеем откос, как правило, произвольной формы, нагруженный произвольной нагрузкой, а еще чаще вообще без нагрузки, его разрушение представляет собой смещение оползневых масс по ярко выраженной поверхности скольжения. В этом случае условие предельного напряженного состояния во всех точках области выполняться не будет, а соответственно, не применима данная теория. С. С. Голушкевич отмечает: “Случай, когда сыпучая среда находится в предельном напряженном состоянии во всех точках, следует рассматривать как иногда возможный, частный и притом крайний случай состояния предельного равновесия. Поэтому состояние предельного равновесия массива сыпучей среды лучше определять как состояние, при котором его внутренняя граница является поверхностью скольжения”. Искусственность данного приема и его не-

правомерность признается как в геомеханике [5], так и в механике деформируемого твердого тела [6], однако спекуляции по данному вопросу в литературе встречаются по сей день.

Все сказанное выше говорит о том, что методу предельного равновесия, по крайней мере, на сегодняшний день, альтернативы нет.

Таким образом, второе направление (метод предельного равновесия) исследует условия равновесия (устойчивости) откосов вдоль одиночной поверхности скольжения, в общем случае, ее форма и положение в массиве неизвестны. В этой связи основными задачами являются: 1) определение траектории (геометрии) поверхности скольжения (разрушения) в массиве; 2) получение критерия устойчивости (условия равновесия) вдоль данной поверхности. Первые работы в данном направлении датируются началом XX века. Исследованиями данного вопроса занимались железнодорожники, автодорожники, строители, гидротехники, горняки и др. К настоящему времени, по некоторым оценкам, разработано около 100 способов оценки устойчивости откосов, ни один из которых не является строгим (фундаментальным). Главной причиной отсутствия строгого решения является статическая неопределимость задачи. И действительно, при рассмотрении равновесия призмы смещения по произвольной (в общем случае нелинейной) поверхности скольжения встает проблема установления закона распределения нормальных к данной поверхности напряжений. Для этого прибегают к разбиению призмы смещения на отсеки (блоки), но в этом случае при рассмотрении их равновесия неизвестных реакций связей оказывается больше, чем условий для их определения (условий равновесия). Кроме того, в качестве поверхностей скольжения используются слабо обоснованные кривые (функции), положение которых в массиве определяется, как правило, подбором.

На сегодняшний день можно говорить о некоторой стагнации в исследованиях по вопросу оценки устойчивости откосов как в России, так и за рубежом, при этом актуальность данной тематики возрастает пропорционально росту глубины современных карьеров. И действительно, пожалуй, единственной основательной и фундаментальной работой по вопросам оценки устойчивости бортов карьеров, на которую по сей день опираются исследователи, была и остается монография Г. Л. Фисенко, датируемая 1965 годом [5]. В 2015 году вышел в свет русскоязычный перевод руководства по проектированию бортов карьеров (научный редактор русского издания А. Б. Макаров) [7]. Данный документ является плодом труда большого количества специалистов из многих стран мира. Руководство включает 14 глав, в которых весьма подробно описаны все работы и мероприятия, связанные с проектированием карьеров от начала разработки и до ликвидации предприятия. Безусловно, книга отражает весь передовой зарубежный опыт по проектированию бортов карьеров. Однако заслуживает внимания тот факт, что из 544 страниц текста, где просто досконально отражены даже вспомогательные работы, выполняемые для целей проектирования бортов карьеров, вопросу оценки их устойчивости уделено всего около 15 страниц. Хорошая половина из этих страниц посвящена описанию способов математического моделирования, а оставшаяся часть кратко повествует о существующих способах оценки устойчивости откосов (способы Феллениуса, Бишопа, Ямбу, Morgenштерна-Прайса, Лоу и Крафта, Спенсера, Сарма, способ инженерного корпуса сухопутных войск США), датируемых примерно серединой прошлого века.

#### *Суть вопросов и предлагаемые решения*

Существует большое количество способов (несколько десятков) расчета устойчивости однородных откосов. Каждый из этих способов наделен теми или иными недостатками [8]. С этой точки зрения интересно посмотреть на приоритет при выборе того или иного способа расчета устойчивости различными ведомствами. И действительно, оценкой устойчивости откосов занимаются проектировщики железных и автомобильных дорог, оснований и фундаментов, гидротехники, горняки и др.

Итак, в СНиПе по земляным сооружениям [9] для определения крутизны откосов временных выемок рекомендуют использовать модифицированные номограммы Д. Тейлора (круг трения) [10]. Расчет устойчивости портовых сооружений [11] рекомендуется осуществлять способом круглоцилиндрической поверхности. При проектировании полотна железных дорог [12] рекомендуется в качестве основной схемы использовать способ Г. М. Шахунянца, однако сводом правил не исключается применение других способов, известных по литературным источникам или разработанных в проектных организациях и проверенных практикой, например, способ Л. Л. Перковского [12]. При проектировании шламонакопителей и хвостохранилищ при расчете ограждающих дамб рекомендуется использовать способы наклонных сил Р. Р. Чугаева, Крея – Янбу (горизонтальных сил) или же способ К. Терцаги [13]. Для расчета устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов рекомендуются к применению два способа: алгебраического сложения сил и модифицированный способ многоугольника сил [14 – 16]. Сразу же отметим, что в действующем нормативном документе [14] не говорится о том, каким образом необходимо строить потенциальные поверхности скольжения. Сказано лишь, что в однородных откосах поверхность скольжения близка к круглоцилиндрической, а для расчета необходимо исследовать не менее трех потенциальных поверхностей.

Способ алгебраического сложения сил является наиболее простым, наглядным и фактически является прообразом исторически первых способов оценки устойчивости по методу предельного равновесия (способы Терцаги, Феллениуса, Хюльтина, Иванова, круглоцилиндрической поверхности, моментов и т. д.). Поэтому его часто используют для предварительных и оценочных расчетов.

Вместе с тем способу присущи существенные недостатки:

- 1) для произвольной криволинейной (не круглоцилиндрической) поверхности скольжения критерий устойчивости (коэффициент устойчивости) не отражает необходимых и достаточных условий равновесия призмы смещения (данный тезис вытекает уже из самого названия способа, т. е. векторные величины складываем алгебраически – парадокс);
- 2) пренебрегается влиянием межблоковых реакций на коэффициент устойчивости;
- 3) способ не позволяет обосновать положение и форму наиболее опасной (слабой, напряженной) поверхности скольжения.

Термин и, соответственно, способ расчета «многоугольник сил» ввел Г. М. Шахунянец. Сотрудники ВНИМИ модифицировали его достаточно оригинальным способом. Способ Г. М. Шахунянца подразумевает разбиение призмы смещения на отсеки (блоки) вертикальными гранями, причем на этих гранях выполняется условие предельного кулоновского равновесия.

Основной идеей модификации является то, что условие предельного кулоновского равновесия выполняется не на вертикальных гранях, а на наклонных, проведенных подобно второму семейству поверхностей скольжения (характеристик), в методе предельного напряженного состояния (рис. 1). Таким образом, исходя из рисунка можно выделить основные недостатки способа многоугольника сил в постановке ВНИМИ:

1. Криволинейная поверхность предельно напряженного откоса  $AIB$  заменяется прямой линией  $AB$ . Заметим, что при такой замене поверхности соответствующие второму семейству поверхностей скольжения исчезнут, т. е. уравнения предельного напряженного состояния выполняться не будут.
2. Поверхности, соответствующие второму семейству в методе предельного напряженного состояния в способе многоугольника сил, заменяются прямыми. То есть по линиям  $HL$ ,  $GM$ ,  $FB$  условие предельного равновесия выполняться не будет.
3. Для получения прямолинейной формы откоса предельный откос  $AIBC$  заменяется плоскостью  $AC$ .

4. В отличие от метода предельного напряженного состояния, где геометрия поверхности скольжения обосновывается расчетом, в способе многоугольника сил не обосновывается вовсе. Данное замечание присуще практически всем способам метода предельного равновесия [8].

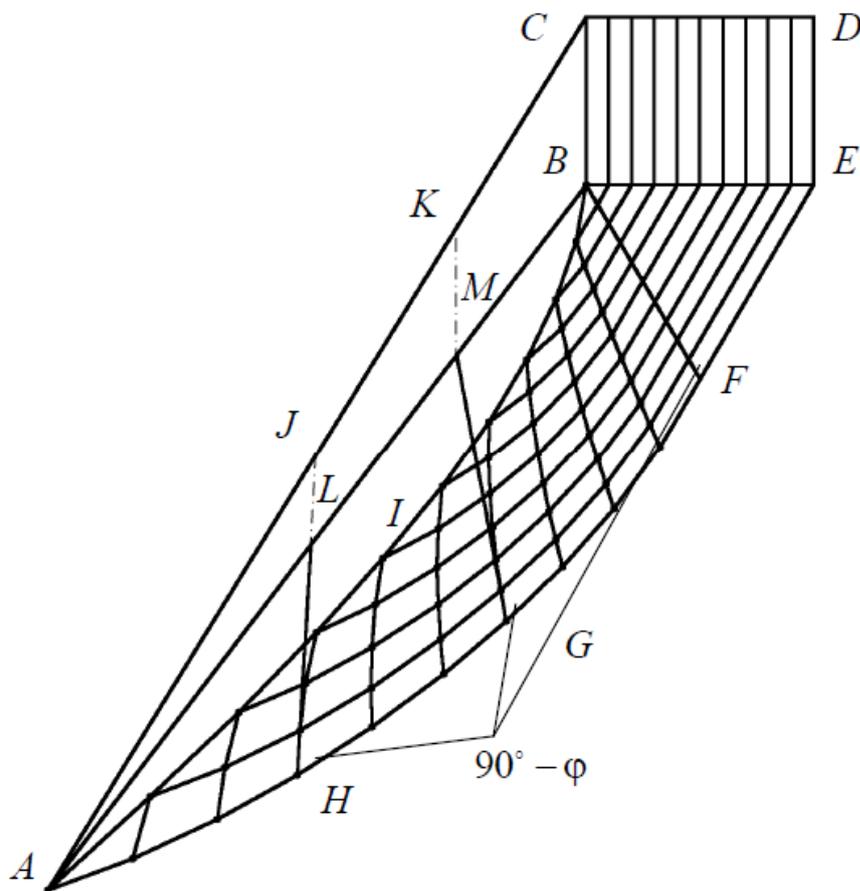


Рис. 1 – Модификация способа многоугольника сил (Г. М. Шахунянца) посредством метода предельного напряженного состояния

Призма смещения разбивается на 3 – 4 блока, в нашем случае  $BCDEF$ ,  $MKCBFG$ ,  $LJKMGH$  и  $AJLH$ . На каждый блок (отсек) действует вес горных пород, реакции смежных блоков, а по граням  $AH$  и  $LH$ ,  $HG$  и  $GM$ ,  $GF$  и  $FB$ ,  $FE$  выполняется условие предельного равновесия. Грани  $JL$ ,  $KM$  и  $CB$  вертикальны, а реакции на них отсутствуют. После разбивки производится суммирование всех действующих на систему сил в графическом [14] или аналитическом (ЭВМ) [17] виде.

Разумеется, степень обоснованности постулатов способа и точность прогнозирования параметров откосов определить не представляется возможным.

Несмотря на отмеченные объективные недостатки способа многоугольника сил (ВНИМИ), он рекомендуется действующими нормативными документами в области обеспечения устойчивости откосов на горных предприятиях в качестве базового.

Таким образом, подведя итог обзора по нормативным документам в области обеспечения устойчивости откосов, можно констатировать следующее. Авторы упомянутых нормативных документов как у нас в стране, так и за рубежом, сами являясь крупными специалистами в вопросах устойчивости откосов, просто не знают, какой из существующих способов рекомендовать к использованию в той или иной сфере. А почему? Ответ очевиден: вопрос оценки устойчивости откосов недоисследован и требует доработки.

Вопрос совершенствования нормативной базы в области устойчивости бортов карьеров назрел уже давно, на это же указывается в работе [18].

Основные недостатки способов расчета по методу предельного равновесия заключаются в следующем:

- 1) недостаточная обоснованность геометрии поверхности скольжения;
- 2) вследствие статической неопределимости задачи, критерии устойчивости не обеспечивают необходимости и достаточности условий равновесия;
- 3) существующие способы расчета учитывают только гравитационную составляющую напряжений, вместе с тем в массиве достаточно часто присутствует тектоническая составляющая напряжений;
- 4) недостаточная обоснованность углов излома поверхности скольжения в анизотропных и неоднородных откосах:
  - а) предположение о том, что в точке излома площадка скольжения отклонена от направления действия  $\sigma_1$  на угол  $\pi/4 - \varphi/2$  для произвольной формы откоса и нагрузки на него бездоказательно (данный постулат лежит в основе способа);
  - б) условие специального предельного равновесия возможно не для всех профилей откоса, в частности, оно не выполняется для вогнутых откосов;
  - в) для определения угла излома необходимо располагать значениями главных напряжений в точке излома, определить которые не представляется возможным без дополнительных предположений;
  - г) если пренебрегать влиянием главных напряжений на угол излома, что и предлагал Г. Л. Фисенко, значение последнего становится инвариантным (независимым) относительно угла наклона поверхности ослабления.

В работах [19 – 22, 23] предложена принципиально новая теория устойчивости (разрушения) откосов и оснований сооружений как сплошной среды, основанная на фундаментальных теоремах и принципах механики, таких как принцип возможных перемещений Лагранжа, принцип наименьшего принуждения Гаусса, теорема наименьшей потерянной работы Остроградского и т. д. Основой математического аппарата предлагаемой теории являются вариационное, дифференциальное и интегральное исчисления. На основе данной теории разработаны методики расчета устойчивости откосов практически для условий любой сложности: однородный откос, неоднородный откос, анизотропный откос, обводненный откос, откос на слабом наклонном контакте, откос на слабом наклонном основании, подработанный и закарстованный откос, нагруженный откос, откос несвязных пород на различных основаниях, устойчивость откосов в поле тектонических и сейсмических напряжений.

В предлагаемой теории исключены перечисленные выше недостатки.

#### *Результаты исследований*

По результатам численного интегрирования были построены поверхности скольжения для некоторых значений углов откоса и внутреннего трения в предельном равновесии (рис. 2, а, б, в, г, д, е). В результате численного решения определены предельные параметры плоских однородных откосов и построена номограмма устойчивости (рис. 3, а), а также номограмма для определения ширины призмы обрушения однородных откосов (рис. 3, б).

На рис. 4, а приведено сравнение полученных графиков устойчивых откосов с графиками, рекомендуемыми действующими «Правилами обеспечения устойчивости...», ВНИМИ, 1998 [14]. Анализ данных графиков показывает, что рекомендуемый нормативным документом предельный угол устойчивых откосов завышен относительно предлагаемого автором на  $2 - 8^\circ$ . Меньшие значения соответствуют высоким откосам (бортам карьера) и составляют  $1 - 3^\circ$ , что является достаточно существенным.

Также полученные графики были сравнены с графиками, рекомендуемыми нормативом в области строительства – СНИП 45.13330.2012 (рис. 4, б) [9]. В данном случае

также отмечаем, что для высоких откосов рекомендации СНИП прогнозируют более высокие значения углов откосов на  $1-5^\circ$ , в зависимости от угла внутреннего трения. Для невысоких откосов разница становится весьма существенной. Завышения углов устойчивых откосов прогнозируют и расчеты способами Янбу и Тейлора (рис. 5 а, б), однако для высоких откосов разница с автором уже менее значительна, а для небольших по высоте откосов разница углов откоса также возрастает.

Прогнозирование завышенных значений углов откосов всеми рассмотренными способами и нормативными документами относительно предлагаемых объясняется недостаточной обоснованностью формы и положения, используемых в расчетах потенциальных поверхностей скольжения. Кроме того, значительные различия углов откоса (см. рис. 4 а) объясняются использованием расчетных схем с переоцененным вкладом в устойчивость касательной межблоковой реакции.

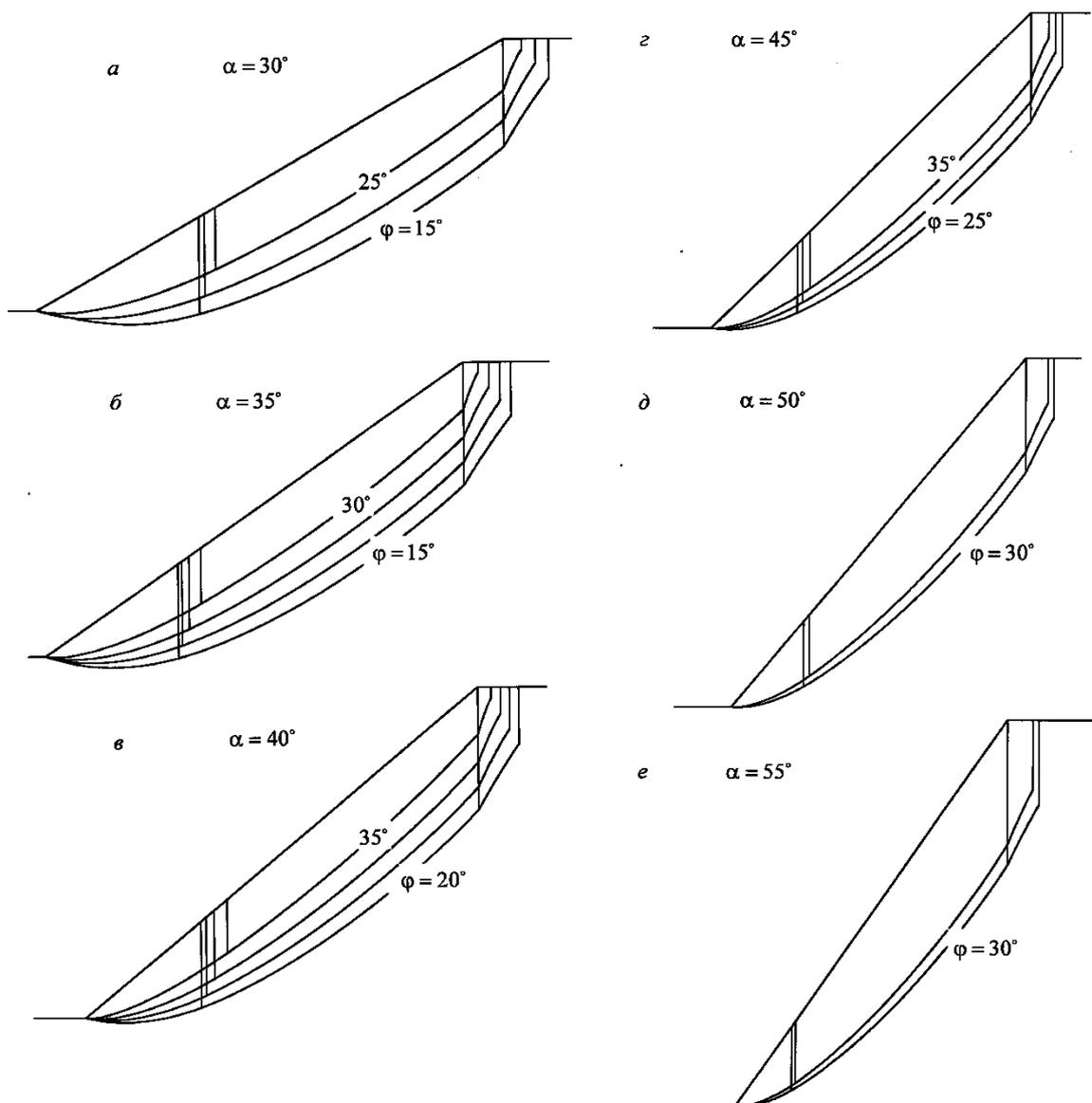


Рис. 2 – Поверхности скольжения в плоском однородном откосе для  $\alpha = 30^\circ$  (а);  $\alpha = 35^\circ$  (б);  $\alpha = 40^\circ$  (в);  $\alpha = 45^\circ$  (г);  $\alpha = 50^\circ$  (д);  $\alpha = 55^\circ$  (е)

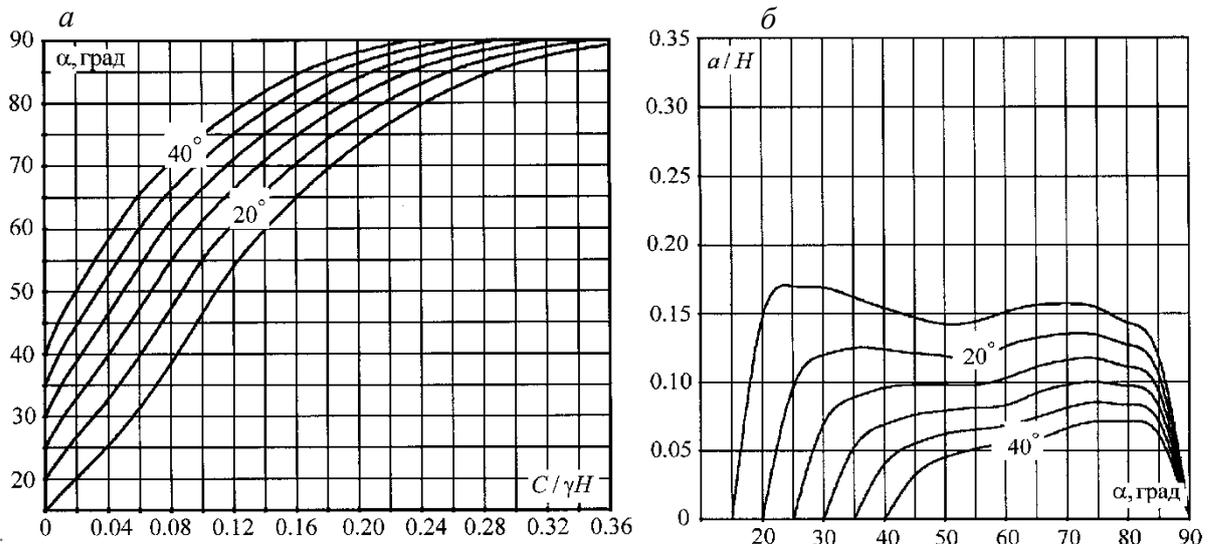


Рис. 3 – Номограммы устойчивости (а) и ширины призмы обрушения (б)

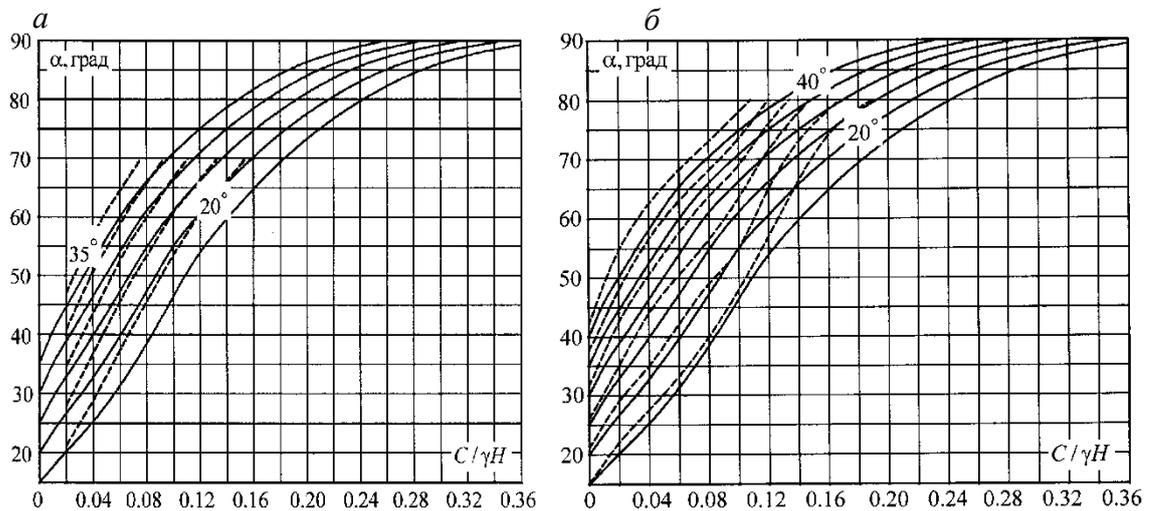


Рис. 4 – Сравнение полученных графиков устойчивости (сплошная) с данными ВНИМИ, 1998 (пунктир) (а) и СНИП 45.13330.2012 (пунктир) (б)

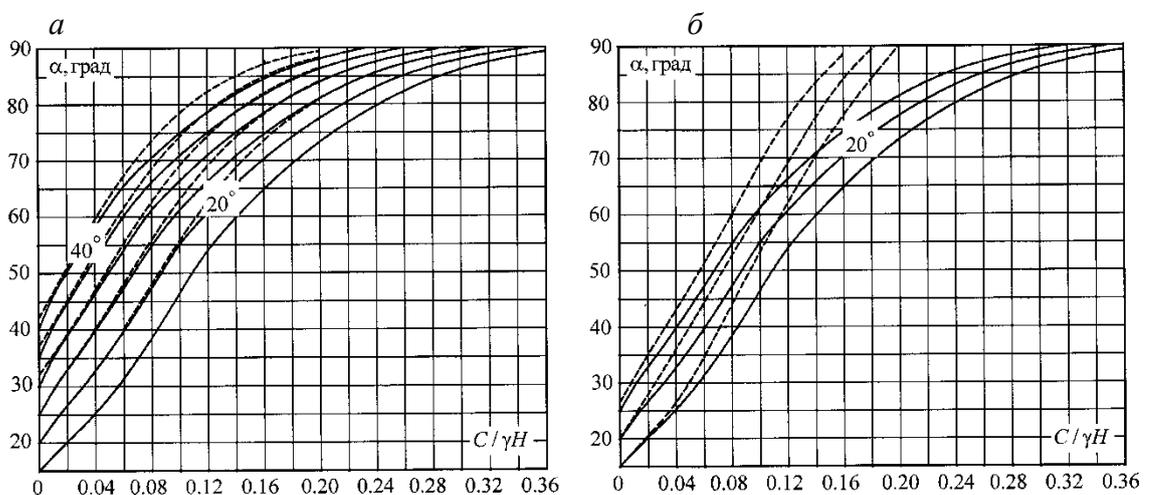


Рис. 5 – Сравнение полученных графиков устойчивости (сплошная) с графиками способов Ямбу (Гордеев В.А., пунктир) (а) и Тейлора (пунктир) (б)

Кроме того, необходимо отметить, что только предлагаемая теория прогнозирует для сыпучих пород ( $C = 0$ ) плоскую поверхность скольжения, совпадающую с откосом, и его устойчивый угол, равный углу внутреннего трения (углу естественного откоса). Все известные способы, схемы расчета и т. д. не удовлетворяют данному теоретическому условию по уже упомянутой причине – недостаточной обоснованности поверхности скольжения.

В практике горного дела однородные и изотропные откосы встречаются достаточно редко, однако исключительно важно было разработать теорию именно для такой идеализированной среды. Подземные горные работы, карст, геологическое строение массива, условия отсыпки отвалов и пр. создают анизотропию и неоднородность разрушаемого массива. В этом случае поверхность скольжения при переходе из одного литологического слоя в другой или на поверхности ослабления (контакты слоев, трещины большого протяжения, тектонические нарушения и т. д.) преломляется. Таким образом, задача по расчету неоднородных и анизотропных откосов усложняется, относительно однородных откосов, определением углов излома и координатами точек излома.

На рис. 6 приведены примеры строгого аналитического расчета откосов бортов карьеров и отвалов в различных горно-геологических условиях. Решение систем уравнений для определения численных значений неизвестных параметров, а также определение координат точек поверхностей скольжения (см. рис. 6) производилось в математическом комплексе *Mathcad*.

Оценку устойчивости откосов в условиях обводненности, сейсмичности и тектонических полей напряжений рекомендуется производить по формуле [22, 23]:

$$\begin{aligned} & \sum_{\vartheta \leq \varphi} \left[ \frac{\gamma h (\operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \varphi + k_c / (\cos \vartheta \cos \varphi)) + k_k \sigma_T \operatorname{tg} \vartheta (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta) - (C - \gamma_B h_B \operatorname{tg} \varphi) (1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta)}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta} \right] \Delta + \\ & + \sum_{\vartheta > \varphi} \left[ \frac{\gamma h (\operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \varphi + k_c / (\cos \vartheta \cos \varphi)) + k_k \sigma_T \operatorname{tg} \vartheta (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta) - (C - \gamma_B h_B \operatorname{tg} \varphi) (1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta)}{1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta} \right] \Delta + \quad (1) \\ & + \sum_{\text{берма}} \left[ \frac{\gamma h (\operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \varphi + k_c / (\cos \vartheta \cos \varphi)) + k_k \sigma_T \operatorname{tg} \vartheta (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta) - (C - \gamma_B h_B \operatorname{tg} \varphi) (1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta)}{\Delta} \right] \Delta = 0, \end{aligned}$$

где  $h$  – высота отсека;  $\Delta$  – ширина отсека;  $k_c; k_k$  – соответственно, коэффициенты сейсмичности и концентрации тектонических напряжений в точке поверхности скольжения;  $\sigma_T$  – тектоническое (горизонтальное) напряжение;  $\gamma_B; h_B$  – объемный вес воды и ее превышение над поверхностью скольжения;  $C, \varphi$  – сцепление и угол внутреннего трения;  $\vartheta$  – угол наклона поверхности скольжения в точке (угол наклона основания отсека).

В кругу некоторых геомехаников-подземщиков существует мнение, что якобы метод предельного равновесия не учитывает напряженного состояния, что, конечно, неверно. В формуле (1) первое слагаемое в суммах определяет гравитационную составляющую напряжений, третье – сейсмическую, четвертое – тектоническую, а последнее слагаемое – гидростатическую.

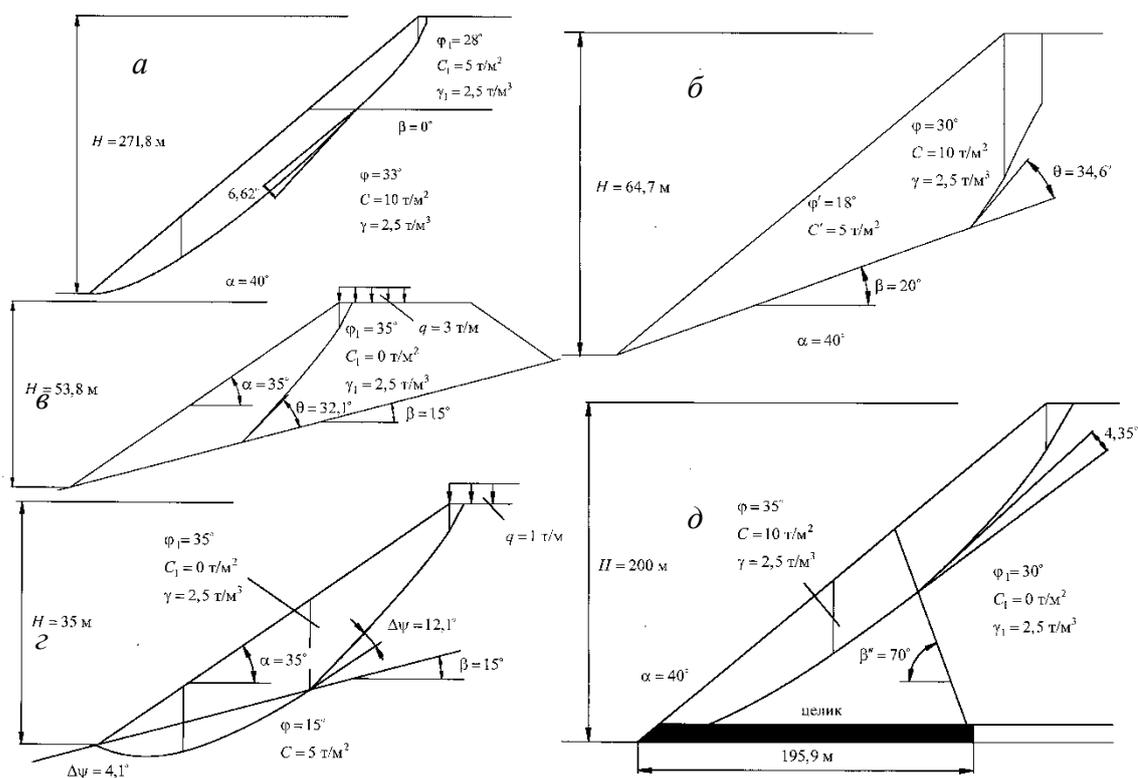


Рис. 6 – Примеры расчета откосов в различных горно-геологических условиях: неоднородный откос (а); анизотропный откос (б); отвал на наклонном (в) и неустойчивом (г) основаниях; подработанный откос (д)

### Заключение

Таким образом, в работе указывается на безальтернативность метода предельного равновесия при оценке устойчивости карьерных откосов, по крайней мере, на сегодняшний день, и говорится о необходимости совершенствования нормативной базы по данному вопросу. В этой связи предложена новая теория оценки устойчивости откосов по методу предельного равновесия, исключая целый ряд недостатков существующих способов расчета. Доказывается, что существующие способы расчета приводят к завышению предельных параметров откосов, что объясняется недостаточной обоснованностью положения и формы (геометрии) поверхности скольжения в массиве (ее формой в основном задаются априори – круглоцилиндрическая, логарифмическая спираль, сплайн, ломаная и т. д.) и отсутствием критериев устойчивости, обеспечивающих выполнение условий необходимости и достаточности равновесия твердых тел.

### Литература

1. Туринцев Ю.И. Методическое руководство по определению максимальных углов погашения бортов меднорудных карьеров / Ю.И. Туринцев, П.В. Кольцов, А.В. Жабко. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 106 с.
2. Быков В.Г. Нелинейные волны и солитоны в моделях разломно-блоковых геологических сред / В.Г. Быков // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 5. – С. 1008 - 1024.
3. Козлов Ю.С. К вопросу об использовании упругих решений при оценке устойчивости однородных откосов / Ю.С. Козлов, А.Б. Фадеев // Физ.-тех. пробл. разраб. полез. ископаемых. – 1978. - Вып. 3. – С. 63 - 70.
4. Мочалов А.М. Оценка напряженно-деформированного состояния откосов и реализация расчетных моделей сред методом конечных элементов / А.М. Мочалов,

- Э.К. Абдылдаев // Маркшейдерское дело в социалистических странах. – Л.: ВНИМИ, 1988. – Т. 11. – С. 194 - 203.
5. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
6. Ревуженко А.Ф. Механика упруго-пластических сред и нестандартный анализ / А.Ф. Ревуженко. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун.-та, 2000. – 428 с.
7. Руководство по проектированию бортов карьеров / Под ред. Джон Рид, Питер Стейси; пер. с англ., науч. редактор А.Б. Макаров – Екатеринбург: Правовед, 2015. – 544 с.
8. Жабко А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов / А.В. Жабко // Известия УГГУ. – 2015. – № 4 (40). – С. 45 – 57.
9. СП 45.13330.2012. Земляные сооружения, основания и фундаменты (Актуализированная редакция СНиП 3.02.01 – 87), М., 2012.
10. Тейлор Д. Основы механики грунтов / Д. Тейлор; Пер. с англ. инж. Г.Л. Игнатюка; под ред. Н. А. Цытовича. – М.: Госстройиздат, 1960. – 598 с.
11. СНиП 2.02.02 – 85. Основания гидротехнических сооружений. Утвержден и введен в действие Государственным комитетом СССР по делам строительства 01 января 1987 г.
12. 11. СНиП 2.02.02 – 85. Основания гидротехнических сооружений. Утвержден и введен в действие Государственным комитетом СССР по делам строительства 01 января 1987 г.
13. Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности / ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Стройиздат, 1986. – 128 с.
14. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах: утв. Госгортехнадзором РФ 16.03.98. – СПб.: ГосНИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела, 1998. – 208 с.
15. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров / ВНИМИ. – Л., 1972.
16. Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии / МЦМ СССР. – М., 1989. – 128 с.
17. Пустовойтова Т.К. Совершенствование методов расчета устойчивости откосов / Т.К. Пустовойтова, А.М. Мочалов, А.Н. Гурин // Сб. научных трудов “70 лет ВНИМИ”. – М.: ВНИМИ, 1999.
18. Зотеев В.Г. О необходимости совершенствования нормативно-методической базы по геомеханическому обеспечению открытых горных работ / В.Г. Зотеев, О.В. Зотеев // Горный журнал. - 2010. – № 1. - С. 66 – 68.
19. Жабко А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Общая теория расчета устойчивости однородных откосов / А.В. Жабко // Известия УГГУ. – 2016. – № 1(41). – С. 72 – 83.
20. Жабко А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Расчет анизотропных, неоднородных и подработанных откосов / А.В. Жабко // Известия УГГУ. – 2016. – № 2 (42). – С. 42 – 46.
21. Жабко А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Устойчивость отвалов / А.В. Жабко // Известия УГГУ. – 2016. – № 3(43). – С. 4–6.
22. Жабко А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Устойчивость откосов в поле тектонических, сейсмических и гидростатических напряжений / А.В. Жабко // Известия УГГУ. – 2016. – № 4 (44). – С. 47 – 50.
23. Жабко А.В. Аналитическая геомеханика: научная монография / А.В. Жабко; Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. – 224 с.