

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК МЕТОДОМ МНОГОУГОЛЬНИКА СИЛ

БАРУЛИН А. И.

Выполнена формализация инженерного расчетно-графического метода оценки устойчивости откосов посредством использования математического аппарата аналитической геометрии. Описана техника аналитического решения расчетно-графической задачи. Разработан алгоритм итеративного поиска состояния предельного равновесия в откосе. Представлен интерфейс пользователя компьютерной программы оценки устойчивости откосов методом многоугольника сил. Обоснована достоверность результатов программных расчетов альтернативными методами конечных элементов и алгебраического сложения сил. Представлен вариант исходных данных, опровергающий положение о том, что погрешность инженерного метода алгебраического сложения сил всегда идет в запас. Обосновано, что метод многоугольника сил предпочтительнее метода алгебраического сложения сил. Показана эффективность выполненной автоматизации оценки устойчивости откосов. Производительность оценки устойчивости откоса методом многоугольника сил увеличилась при использовании разработанного способа решения в тысячу раз. Доказано, что удовлетворительная точность оценки устойчивости достигается при делении оползневого тела откоса всего на пять расчетных блоков. Предложенный способ реализации метода позволил повысить точность и производительность оценки устойчивости открытых горных выработок.

Ключевые слова: карьер; откос; устойчивость; многоугольник сил; расчетная модель; формализация метода; автоматизация; сходимости; точность; эффективность.

Для оценки устойчивости карьерных откосов используются методы: предельного напряженного состояния; алгебраического сложения сил; круглоцилиндрической поверхности скольжения; многоугольника сил; конечных элементов; граничных интегральных уравнений; функции комплексного переменного и некоторые другие. Среди относительно небольшого количества методов оценки устойчивости открытых горных выработок наибольшее распространение вследствие его простоты получил инженерный метод алгебраического сложения сил [1]. Однако этот метод применим только к круглоцилиндрическим поверхностям скольжения оползневого тела, так как из трех условий статического равновесия в нем выполняется только одно – сумма моментов сил равна нулю. Кроме того, вертикальные границы расчетных блоков, на которые разделяется оползневое тело, не совпадают с направлением линий действия главных напряжений, а действующие вдоль них межблочные силы в методе алгебраического сложения сил вообще не учитываются. В связи с этим погрешность метода, даже в условиях, для которых он был разработан (изотропные породы, круглоцилиндрическая поверхность скольжения), достигает $\pm(2-5) \%$.

На рис. 1 показаны зависимости изменения коэффициента запаса устойчивости откоса от величины угла внутреннего трения φ горной породы, полученные для борта карьера высотой $H = 100$ м с углом наклона $\alpha = 45^\circ$ при величине объемной плотности $\gamma = 1,9 \times 10^3$ кг/м³ и сцеплении изотропной горной породы $k = 975$ кПа. Наибольшая погрешность результата, рассчитанного методом алге-

браического сложения сил, в рассмотренном интервале изменения угла внутреннего трения изотропной породы по отношению к значению, полученному методом многоугольника сил, составила +5,1 %. Эту погрешность можно считать абсолютной, так как методами конечных элементов и многоугольника сил получены результаты, отличающиеся в пределах только $\pm 0,9$ %.

Методы многоугольника сил и конечных элементов отличает то, что в сравнении с методом алгебраического сложения сил они являются строгими в механико-математическом отношении, так как в каждом из них выполняются все три условия статического равновесия, и хотя оба этих метода приближенные, но управление точностью результата в методе конечных элементов может быть достигнуто уменьшением размеров конечных элементов в областях концентрации напряжений, совершенствованием цифровых моделей объектов посредством введения элементов разрывов сплошности, подбором наиболее адекватной модели среды и критерия потери устойчивости откосом.

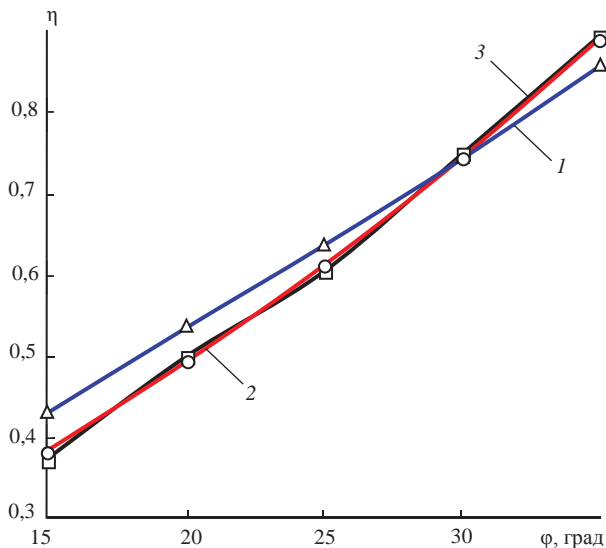


Рис. 1. Исследование точности оценки устойчивости откоса методами:

1 – алгебраического сложения сил; 2 – многоугольника сил; 3 – конечных элементов

В расчетной модели метода многоугольника сил управление точностью решения задачи устойчивости откоса осуществляется увеличением числа расчетных блоков, на которое разделяется возможное оползневое тело. В отличие от метода алгебраического сложения сил, границы расчетных блоков его математической модели совпадают с линиями действия наибольших и наименьших главных напряжений в массиве горных пород, и производится учет взаимодействия расчетных блоков друг с другом в процессе деформирования откоса.

И метод конечных элементов, и метод многоугольника сил обладают неоспоримым преимуществом перед методом алгебраического сложения сил, так как они применимы к любым формам поверхностей скольжения оползневого тела в откосе, в том числе и не монотонным. Оба эти метода применимы к любым толщам пород, а не только к массивам изотропных горных пород, как это имеет место в методе алгебраического сложения сил.

К недостаткам точных в механико-математическом отношении методов оценки устойчивости откосов следует отнести только их трудоемкость. Хотя метод

конечных элементов является исключительно компьютерным методом, для получения качественного решения по оценке устойчивости открытых горных выработок следует разработать сложную индивидуальную математическую модель, отвечающую основным элементам подобия и использовать соответствующую ей модель среды. Без знаний геомеханики, высшей математики и программирования получение качественных решений возможно только для относительно простых стандартных физических сред и объектов. Метод конечных элементов является мощным инструментом исследователя, поэтому для решения стандартных инженерных задач на открытых горных разработках не может быть рекомендован.

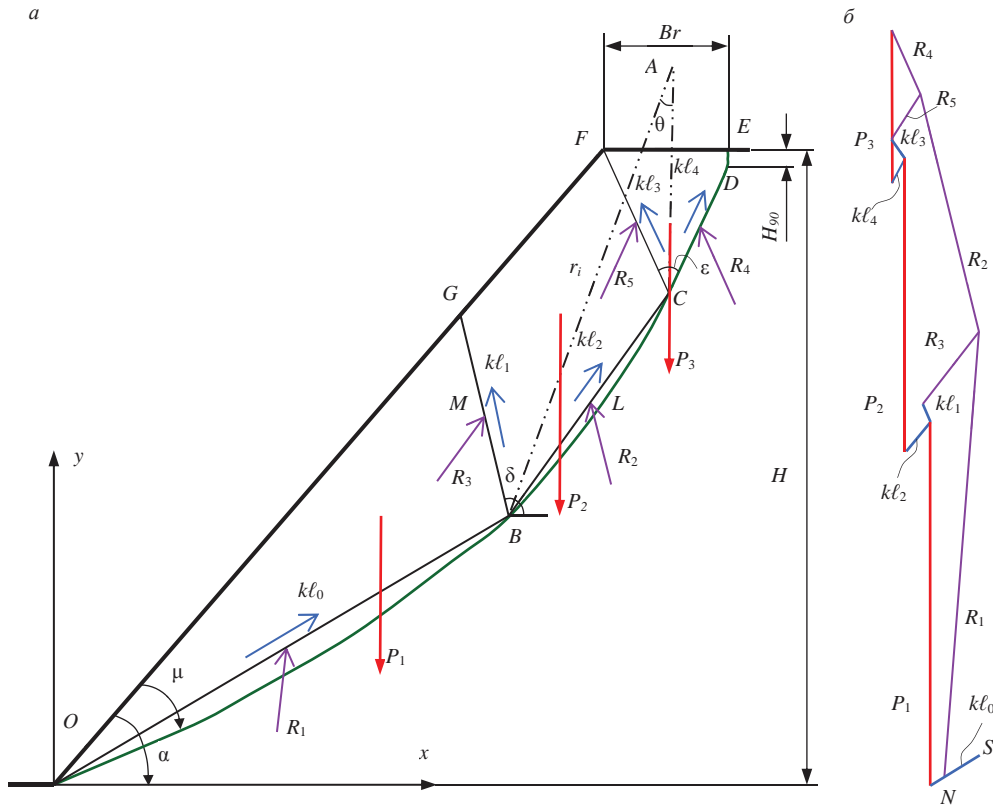


Рис. 2. Расчетная схема оценки устойчивости откоса методом многоугольника сил:
 kl_0, kl_2, kl_4 – силы сцепления блоков с массивом; kl_1, kl_3 – межблочные силы сцепления; R_0, R_2, R_4 – реакции опоры породного массива; R_1, R_3 – реакции межблочного взаимодействия; $\varepsilon = (90^\circ - \varphi)$ – угол между поверхностями скольжения 1-го и 2-го семейств скольжения

Метод многоугольника сил разработал советский ученый Г. М. Шахунянд в 1948 г. [2] как исключительно графический метод, в котором возможное оползневое тело откоса делится на взаимодействующие друг с другом вертикальные расчетные блоки. Г. Л. Фисенко [1] усовершенствовал этот метод, изменив направление боковых границ расчетных блоков в соответствии с направлением действия главных сил, действующих в откосе (рис. 2, а). На полученную расчетную схему наносятся силы и реакции, действующие на каждый из расчетных блоков. Силы веса P_1-P_3 направлены сверху вниз, а сцепления kl_0-kl_4 – вдоль взаимодействующих друг с другом или с нетронутым массивом граней расчетных блоков, противоположно сдвигу оползневого тела $OFEDCBO$. Реакции изображены под углом внутреннего трения горной породы φ к нормали грани расчетного блока в направлении, препятствующем его сдвигу R_0-R_4 .

Многоугольник сил строят для каждого расчетного блока, но с таким расчетом, чтобы многоугольники соседних блоков примыкали друг к другу по общей для них обоим силе сцепления и реакции межблочного взаимодействия (рис. 2, б).

Силы известной величины (веса P_3 , сцепления kl_3 и kl_4), действующие на самый верхний расчетный блок, в масштабе наносятся на чертеж по их величинам и направлениям действия одна за другой. В многоугольник сил этого расчетного блока необходимо добавить действующие на верхний блок реакции межблочного взаимодействия R_3 и опоры R_4 . Если блок находится в состоянии предельного равновесия, то многоугольник сил должен быть замкнут. Поэтому замыкают верхний многоугольник реакциями, для которых известны точки приложения и направления их действия. На общей для верхнего и среднего расчетных блоков силе kl_3 и реакции межблочного взаимодействия R_3 идентичным образом строят многоугольник следующего блока.

Последний расчетный блок имеет одну общую силу сцепления kl_1 и реакцию межблочного взаимодействия R_1 с соседним средним расчетным блоком. Из начала силы сцепления kl_1 среднего блока откладывается вертикально вниз сила веса последнего блока P_1 , из конца которой откладывается в направлении ее действия сила сцепления kl_0 . Из конца реакции R_1 среднего блока откладываем в направлении ее действия реакцию опоры R_0 . Если эта реакция пересекла силу сцепления kl_0 , то откос имеет запас устойчивости, многоугольник разомкнут – откос неустойчив, замкнулся – откос находится в состоянии предельного равновесия. Чтобы найти состояние предельного равновесия откоса после первой итерации решения, необходимо интуитивно уменьшить или увеличить величину коэффициента запаса устойчивости откоса η и изменить величины сцепления k и угла внутреннего трения φ пород по формулам [1]:

$$k' = \frac{k}{\eta}; \quad \varphi' = \operatorname{atg} \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\eta} \right). \quad (1)$$

После этого вновь построить расчетную схему и новое, соответствующее ей, очертание многоугольника сил в откосе. Если на очередном этапе итеративного подбора величины коэффициента запаса устойчивости откоса многоугольник последнего расчетного блока замкнулся, то откос находится в состоянии предельного равновесия, и искомое значение коэффициента запаса устойчивости найдено. Разумеется, что в приближенном решении идеальное замыкание многоугольника сил является случайным, поэтому необходимо ограничиться разумной его точностью. Предельно напряженный многоугольник сил откоса рис. 2, б построен для схемы с тремя расчетными блоками, что удобно для пояснения метода, но сопряжено с потерей точности, так как аппроксимация оползневой массы при малом числе расчетных блоков неудовлетворительная.

Метод многоугольника сил отличается хорошей точностью оценки устойчивости откосов в любых горно-геологических условиях, но его широкое применение сдерживается высокой степенью трудоемкости. Так, например, на определение пяти точек зависимости коэффициента запаса устойчивости откоса η от угла внутреннего трения слагающих его пород φ было затрачено 32 ч. суммарного времени (рис. 1). На идентичные пять точек, рассчитанных вручную методом алгебраического сложения сил, было затрачено только 4 ч., хотя для оценки устойчивости откоса обоими методами использовались средства автоматизации в виде графического редактора *AutoCAD* и вычислительной программы в среде электронных таблиц *Microsoft Office Excel*. Компьютерная автоматизация расчетов устойчивости откосов методом алгебраического сложения сил выполнена посредством

использования способа интегрирования достаточно давно [3], в настоящем исследовании расчеты обеими методами выполнены вручную только в целях обеспечения объективного сопоставления трудозатрат. Из сопоставления следует, что метод многоугольника сил при всех его неоспоримых достоинствах приблизительно в восемь раз по производительности уступает методу алгебраического сложения сил. Конечно, это приближенный показатель, так как он определяется индивидуальными способностями конкретного исполнителя.

Первые попытки формализации метода многоугольника сил были выполнены еще во второй половине XX в., например в работе [4]. Однако метод использовался в аналитическом виде, когда рассматриваемое оползневое тело разделялось всего на два взаимодействующих друг с другом расчетных блока для частного случая устойчивости отвала на слабом основании. Значение этой разработки трудно переоценить, так как был создан мощный инструмент для решения часто встречаемой в практике открытых горных разработок задачи, ведь внешние отвалы при проектировании горных предприятий стремятся располагать на заболоченных, непригодных для земледелия территориях.

В настоящем исследовании для разработки аналитического способа оценки устойчивости открытых горных выработок методом многоугольника сил были применены координатные математические положения аналитической геометрии [5]. В качестве наиболее напряженной поверхности скольжения в разработанном алгоритме применена логарифмическая поверхность, но может использоваться и любая другая форма поверхности скольжения.

В математической системе плоских прямоугольных координат xOy для откоса заданной высоты H и угла наклона α несложно определить координаты основных характерных точек расчетной схемы (рис. 2) по формулам:

$$\begin{aligned}x_O &= 0, & y_O &= 0; \\x_F &= H \operatorname{ctg} \alpha, & y_F &= H; \\x_E &= H \operatorname{ctg} \alpha + Br, & y_E &= H; \\x_D &= H \operatorname{ctg} \alpha + Br, & y_D &= H - H_{90}; \\x_C &= H \operatorname{ctg} \alpha + Br/2, & y_C &= H - H_{90} - Br \cdot \operatorname{ctg} \alpha / 2,\end{aligned}$$

где Br – ширина бермы безопасности, м, $Br = 2(r_0 \exp((90^\circ - \alpha) \operatorname{ctg} \mu) - H / \sin \alpha) \cos \alpha$; μ – угол выхода наиболее напряженной поверхности скольжения в нижнюю бровку откоса, град, $\mu = 45^\circ - \varphi/2$; r_0 – радиус-вектор логарифмической поверхности

скольжения при угле $\theta = 0^\circ$, м, $r_0 = \frac{H \cos(\alpha - \mu) / \sin \alpha - H_{90} \sin \mu}{\exp(k_0) \cos(\alpha - \mu) - \sin \mu}$; H_{90} – предельная

высота вертикального откоса, м, $H_{90} = \frac{2k}{\gamma} \operatorname{ctg} \mu$; k_0 – безразмерный коэффициент,

$$k_0 = \frac{\pi(90^\circ - \alpha) \operatorname{ctg} \mu}{180^\circ}.$$

Координаты угловых точек расчетных блоков, располагающихся на логарифмической поверхности скольжения, можно вычислить по формулам:

$$x_B = x_A - r_i \sin \theta_i; \quad y_B = y_A - r_i \cos \theta_i,$$

где

$$x_A = H \operatorname{ctg} \alpha + Br/2, \quad y_A = H + Br \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2, \quad r_i = r_0 \exp(\theta_i \operatorname{ctg} \mu).$$

Величина угла θ_i для верхнего расчетного блока определяется как отношение угла $(90^\circ - \alpha)$ к числу расчетных блоков n , приходящихся на абсциссу криволинейной части поверхности скольжения между точками O и C . В предлагаемом аналитическом способе углы между соседними точками расчетных блоков (OAB и BAC) выбраны одинаковыми.

Координаты углов расчетных блоков на поверхности откоса определяются (например, для точки G) посредством совместного решения системы двух уравнений пересекающихся линий (OF и BG), проведенных под известными углами α и δ соответственно:

$$\begin{cases} y = y_O + (x - x_O) \operatorname{tg} \alpha; \\ y = y_B + (x - x_B) \operatorname{tg} \delta, \end{cases} \quad (2)$$

где δ – угол наклона межблочной границы среднего и нижнего расчетных блоков, град, $\delta = \arctg \left(\frac{y_C - y_B}{x_C - x_B} \right) + \frac{\pi}{2} - \varphi$.

Вычисление силы веса расчетных блоков производится по координатам их углов методом определителей второго порядка. Например, для среднего расчетного блока скалярное значение силы веса определится как половина суммы значений двух модулей определителей Δ_1 и Δ_2 , составляющих площадь его треугольников, умноженную на объемную плотность γ по формуле:

$$P_2 = \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2|}{2} \gamma,$$

где

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} x_C - x_F & y_C - y_F \\ x_B - x_F & y_B - y_F \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} x_B - x_F & y_B - y_F \\ x_G - x_F & y_G - y_F \end{vmatrix}.$$

Многоугольник сил при аналитическом решении задачи можно не строить, достаточно определить прямоугольные координаты всех концов составляющих его сил. Тогда в каждом многоугольнике сил расчетного блока координаты точки его замыкания можно вычислить посредством решения системы уравнений пересекающихся линий реакций (2) по координатам точек их приложения и направлениям действия. Координаты точек приложения реакций, например L и M для расчетного блока, и направления их действия можно определить через координаты его углов.

После завершения обработки последнего многоугольника выполняется вычисление линейной невязки между точкой пересечения реакции R_1 с направлением силы сцепления $k\ell_1$ последнего блока (точка N) и концом вектора этой же силы S по формуле:

$$\operatorname{Nev} = \sqrt{(x_N - x_S)^2 + (y_N - y_S)^2}.$$

Если многоугольник сил откоса замкнулся (рис. 2, б), то коэффициент его запаса увеличивается на интуитивную величину (например, 10 %), затем выполняется повторное построение расчетной схемы для новых значений свойств горной породы, вычисленных по формулам (1), и повторное построение много-

угольника сил. Как только получается разомкнутый многоугольник сил, очередное значение изменения коэффициента запаса $\Delta\eta$ находят, решив пропорцию:

$$\Delta\eta = Nev_i \frac{\eta_i - \eta_{i-1}}{Nev_i - Nev_{i-1}},$$

где i – номер итерации приближения к искомому результату.

Когда величина рассчитанной невязки после очередного шага итеративного приближения i станет меньше допустимой величины, задача считается решенной.

Частный случай решения задачи оценки устойчивости нагруженного отвала методом многоугольника сил был представлен в работе [6], но он относился только к случаю оценки устойчивости нагруженного отвала, применялся всего для четырех расчетных блоков, и поиск коэффициента запаса устойчивости откоса возлагался на пользователя программы. Такой полуавтоматический подход ухудшал показатели точности и производительности процесса оценки устойчивости отвала. В предлагаемом решении использован программный поиск коэффициента запаса устойчивости откоса описанным ранее методом последовательных приближений, блок-схема алгоритма которого представлена на рис. 3.

По описанному алгоритму была составлена компьютерная программа на языке объектно-ориентированного программирования *Microsoft Visual Basic 6*, позволившая достичь полной автоматизации процесса оценки устойчивости откосов методом многоугольника сил. Разработанная программа, интерфейс пользователя которой показан на рис. 4, представляет собой автомат с конечным числом состояний, применимый к широкой комбинации значений входных параметров, и управляемым пользователем параметром количества расчетных блоков в призме возможного обрушения.

Чтобы обозначения сил и реакций не ухудшали наглядность изображения выводимой на монитор компьютера расчетной схемы при делении призмы обрушения на большое количество расчетных блоков, программа содержит инструмент блокирования их вывода на экран по желанию пользователя. Интерфейс содержит также опцию блокирования автоматического поиска предельного равновесного состояния пород открытой горной выработки, что дает возможность самостоятельного определения его с большим или меньшим уровнем погрешности по отношению к значению, заданному в программе (± 10 кг). Этот инструмент необходим и для того, чтобы оценить эффективность и скорость предложенного здесь алгоритма поиска решения задачи.

Программа имеет модуль диагностики состояния вычислительного процесса, обеспечивающий вывод на панель интерфейса текстовых сообщений, предупреждающих «зависание» программы при делении на нулевое значение, извлечение корня из отрицательного числа, попытке выполнения расчетов с недопустимыми значениями исходных параметров и т. п. Программа позволяет ввести исходные данные с клавиатуры или из файла на жестком диске. На экран компьютера кроме поясняющей расчетной схемы выводится схема рассчитанного в ней многоугольника сил. Вертикальный и горизонтальный масштабы многоугольника сил для обеспечения лучшей наглядности могут быть выбраны неодинаковыми.

Проверка достоверности результатов программных расчетов была выполнена сопоставлением с данными, рассчитанными вручную (рис.1) методом многоугольника сил. Выполненная проверка показала, что отклонение результатов программных расчетов не превысило $\pm 0,7$ %. Этот уровень является хорошим показателем точности, так как существенно меньше погрешности определения параметров прочности горных пород, использованных для получения искомого

результатов ($\pm 1\%$). На расчет значений пяти точек по разработанной компьютерной программе было затрачено 2 мин. Таким образом, выполненная формализация инженерного решения позволила существенно повысить производительность оценки устойчивости открытых горных выработок методом многоугольника сил.

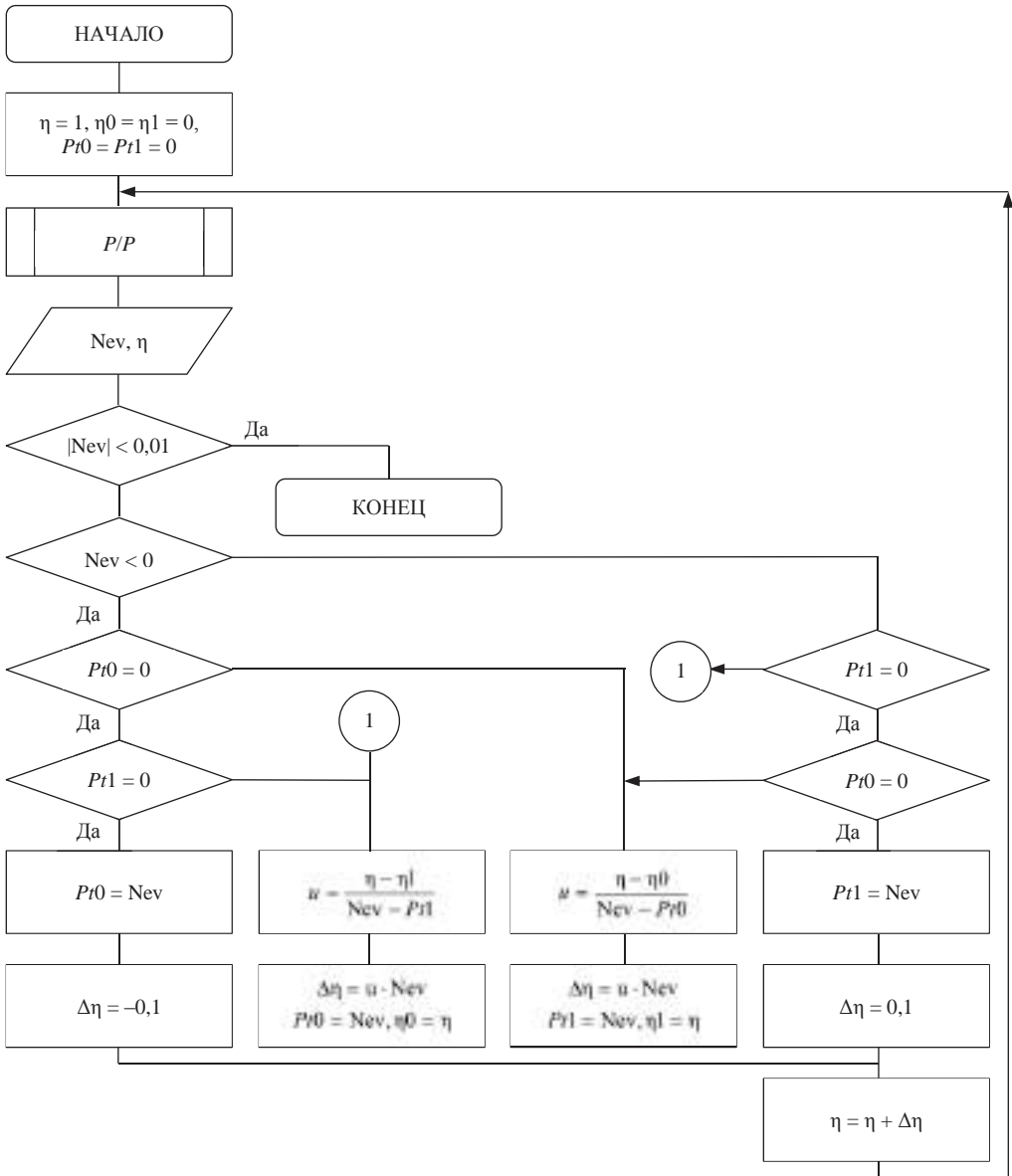


Рис. 3. Блок-схема алгоритма поиска состояния предельного равновесия в откосе методом многоугольника сил:

Pt_0 , Pt_1 – величины полученных последних отрицательных и положительных невязок Nev ; η_0 , η_1 – значения последних коэффициентов запаса устойчивости откоса для отрицательной и положительной невязок соответственно; P/P – подпрограмма оценки устойчивости откоса методом многоугольника сил

В процессе оценки устойчивости откосов методом многоугольника сил предложенным аналитическим способом выполнено исследование минимального количества расчетных блоков, на которое должна делиться призма обрушения

с таким расчетом, чтобы обеспечивалась надлежащая точность определения коэффициента запаса устойчивости откоса. Расчеты выполнены для откоса изотропных горных пород с объемной плотностью $\gamma = 2,12 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, сцеплением $k = 3,7 \text{ МПа}$ и углом внутреннего трения $\varphi = 21^\circ$, имеющего высоту $H = 350 \text{ м}$ и угол наклона $\alpha = 27^\circ$.

Результаты расчетов сведены в таблицу, из которой следует, что при требованиях к определению коэффициента запаса устойчивости откоса с объективной погрешностью, соответствующей точности определения исходных параметров прочности горной породы, удовлетворительные результаты получены при разделении призмы обрушения всего на пять расчетных блоков. Однако при более детальном исследовании установлено, что количество блоков при малых углах внутреннего трения слагающих откос горных пород ($\varphi < 15^\circ$) для достижения приемлемой точности оценки устойчивости откоса должно быть удвоено.

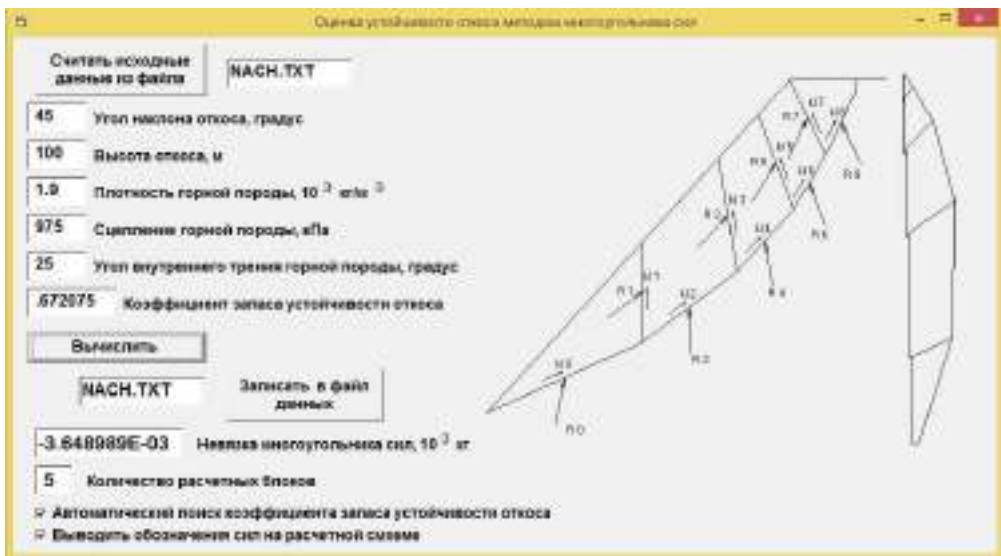


Рис. 4. Интерфейс пользователя программы оценки устойчивости откоса методом многоугольника сил

Для оценки устойчивости открытых горных выработок в реальном массиве анизотропных горных пород предварительно необходимо вычислить средневзвешенные значения физико-механических свойств подсеченной оползневым телом толщи горных пород [7].

Применение числовых методов оценки устойчивости открытых горных выработок, таких как метод граничных интегральных уравнений или метод конечных элементов, позволило решить сложный класс задач, включая объективный прогноз деформирования откосов в сложных горно-геологических условиях, но они не смогли вытеснить хорошо зарекомендовавший себя инженерный метод многоугольника сил. Этот метод отличается простотой, достоверностью получаемых результатов и доступностью для каждого инженера. Автоматизация рутинных графических построений и расчетов при помощи разработанного аналитического способа позволяет улучшить технико-экономические показатели его применения на открытых горных разработках примерно в тысячу раз.

Предложенный аналитический способ оценки устойчивости открытых горных выработок методом многоугольника сил позволяет не только повысить точ-

ность оценки устойчивости откосов по сравнению с инженерным графическим способом, но и исключить ошибки, объединяемые термином «человеческий фактор».

Определение минимального уровня дискретности расчетной модели

Количество расчетных блоков n	2	3	4	5	6	7
Коэффициент запаса устойчивости откоса η	1,205	1,159	1,135	1,128	1,126	1,125
Количество расчетных блоков n	8	9	10	25	50	100
Коэффициент запаса устойчивости откоса η	1,124	1,124	1,124	1,123	1,123	1,123

Доминирование в оценке устойчивости откосов метода алгебраического сложения сил обосновывается только тем, что его погрешность всегда идет в запас [1], т. е. рассчитанная величина коэффициента запаса устойчивости откоса несколько ниже реального значения. Представленный на рис. 1 пример расчета демонстрирует обратное, так как до величины угла внутреннего трения 30° имеют место существенно завышенные значения коэффициента запаса устойчивости. Это является доказательством того, что повсеместное применение метода алгебраического сложения сил способно нанести серьезный ущерб вследствие недооценки уровня его погрешности [8].

Разработанный аналитический способ оценки устойчивости открытых горных выработок может быть применен для любых форм наиболее напряженных поверхностей скольжения, например заданных совокупностью дискретных точек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.
2. Шахуняц Г. М. Основы практического расчета свободных и подпертых откосов // Труды МИИТ. 1948. Вып. 71. 339 с.
3. Попов И. И., Шпаков П. С., Поклад Г. Г. Устойчивость породных отвалов. Алма-Ата: Наука, 1987. 224 с.
4. Мочалов А. М., Хашин В. Н. Развитие оползневой процесса контактных подошвенных оползней // Труды ВНИМИ. 1974. Сб. 92. С. 89–97.
5. Умнов А. Е. Аналитическая геометрия и линейная алгебра. М.: МФТИ, 2011. 544 с.
6. Барулин А. И. Оценка устойчивости отвала вскрышных пород при его формировании с наклонной поверхности // ФТПРПИ. 2015. № 3. С. 105–112.
7. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л.: ВНИМИ, 1972. 166 с.
8. Барулин А. И., Моисеев В. А. Оценка устойчивости нагруженного насыпным конвейерным съездом борта карьера // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 1. С. 53–61.

Поступила в редакцию 5 марта 2018 года

ANALYTICAL METHOD OF ESTIMATING THE STABILITY OF MINING WORKINGS WITH THE POLYGON OF FORCES METHOD

Barulin A. I. – Rudny State Industrial Institute, Rudny, Republic of Kazakhstan. E-mail: BarulinAI@mail.ru

The formalization of engineering calculation-pictorial estimation of the stability of slopes is fulfilled by means of analytical geometry mathematical tool. The technique of analytical solution of calculation-pictorial task is described. The algorithm of interactive search of the condition of ultimate rock equilibrium at the slope is worked out. User interface is introduced for a computer program on slopes stability estimation with the polygon of forces method. The article substantiates results credibility of software calculation by alternative finite elements methods and algebraic addition of forces. The variant of basic data is introduced, which refutes the statement that the error of algebraic addition of forces engineering method is always transferred to the reserve. It is substantiated that the polygon of forces method is more preferable than algebraic addition of forces method. Efficiency of the fulfilled automated estimation of slopes stability is revealed. Capacity of estimation of slopes stability by the polygon of forces method increased hundred times with the use of the developed

method of solution. It is proved that satisfactory accuracy of stability estimation is achieved through dividing landslide body of a slope into five estimated blocks only. The suggested way of the method realization has made it possible to increase accuracy and capacity of open-pit mine workings stability estimation.

Key words: open-pit; slope; stability; polygon of forces; calculation model; method formalization; automation; convergence; accuracy; efficiency.

REFERENCES

1. Fisenko G. L. *Ustoichivost' bortov kar'erov i otvalov* [Stability of pit and dump edges]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 378 p.
 2. Shakhuniants G. M. [The fundamentals of practical calculation of free and supported slopes]. *Trudy MIIT – Proceedings of the Russian University of Transport*, 1948, issue 71. 339 p. (In Russ.)
 3. Popov I. I., Shpakov P. S., Poklad G. G. *Ustoichivost' porodnykh otvalov* [Stability of waste dumps]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1987. 224 p.
 4. Mochalov A. M., Khashin V. N. [Development of landslide process of contact toe landslides]. *Trudy VNIMI – Proceedings of the All-Russian Research Institute of Mining Geomechanics and Survey*, 1974, collection 92, pp. 89–97. (In Russ.)
 5. Umnov A. E. *Analiticheskaya geometriya i lineinaya algebra* [Analytical geometry and linear algebra]. Moscow, MIPT Publ., 2011. 544 p.
 6. Barulin A. I. [Estimation of stripping waste dump stability under its formation from the inclined surface]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Physical and Technical Problems of Mining*, 2015, no. 3, pp. 105–112. (In Russ.)
 7. Methodology guidelines over the determination of the angles of edges inclination, benches slopes, and dumps of operating open-pits and open-pits under construction. Leningrad, VNIMI Publ., 1972. 166 p. (In Russ.)
 8. Barulin A. I., Moiseev V. A. [Estimation of the stability of the open-pit slope loaded by the bulk conveyor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2015, no. 1, pp. 53–61. (In Russ.)
-