

УДК 622.673.2

## **РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ УКОСИНЫ КОПРА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Кассихина Е.Г., к.т.н. доцент кафедры ФПиСГ КузГТУ  
Александров И.А., студент группы ГСс-221, II курс

Научный руководитель: Кассихина Е.Г., к.т.н., доцент.  
Кузбасский государственный технический университет им Т.Ф. Горбачёва  
г. Кемерово.

### **Аннотация**

Существующие расчеты конструктивных элементов укосных стальных надшахтных копров включают в себя расчет укосины, который сводится к определению внутренних усилий с последующими проверками по предельным состояниям по аналогии с балками постоянного сечения. Такой подход не позволяет получить конструкцию минимальной материалоемкости, так как сечение постоянно по всей длине укосины и рассчитано на максимальные усилия, характерные лишь для небольшого участка.

Для получения рационального сечения укосины нужно стремиться к тому, чтобы распределение объема материала по всей длине конструкции соответствовало эпюрам внутренних усилий. Для таких целей применяют балки переменного сечения, то есть на разных участках укосины сечения будут иметь неодинаковые размеры. Возможность изменять размеры поперечного сечения по длине укосины в соответствии с распределением внутренних усилий значительно снизит расход материала и сделает конструкцию более экономичной по сравнению с укосинами постоянного сечения.

**Ключевые слова:** стальные укосные копры, стальные укосные копры многофункционального назначения, сварные конструкции переменного сечения.

### **Введение**

На кафедре «Физические процессы и строительная геотехнология освоения недр» КузГТУ развивается научное направление по разработке инновационных подходов в проектировании стальных укосных копров многофункционального назначения для вертикальных стволов угольных и рудных шахт на основе рациональных конструктивных решений [1].

В связи с этим разрабатывается математическая модель копра многофункционального назначения (рис. 1) и на ее основе – программа для подбора сечений элементов копра многофункционального назначения и вычисления собственного веса его металлоконструкций в зависимости от характеристик и оборудования шахтного подъема. Программный комплекс представляет три крупных блока функций: для ввода и выбора данных; для численных расчетов параметров по построенной математической модели; для пошагово-

го построения конструкции и формирования документации для последующего изготовления.

Алгоритм построения блока вводных параметров сечений элементов копра должен содержать перечень ограничений с учетом степени влияния вводимых данных на вычисляемые значения характеристик, участвующих в дальнейших расчетах элементов копра.

Надшахтный копер предназначен для размещения направляющих шкивов подъемной установки, обеспечивающей транспортировку полезного ископаемого из забоя на поверхность [2, 3]. Поэтому на конструкции копра действуют значительные усилия от натяжения канатов подъемной машины  $S$ , для восприятия которых предназначена укосина  $1$  – наклонный конструктивный элемент (см. рис. 1).



Рис. 1. Копер многофункционального назначения:

1 – укосина копра; 2 – станок;  $S$  – усилие от натяжения канатов подъемной машины

### Цель исследования

Определение области допустимых значений входных данных в вычислительный блок по расчету параметров сечения укосины копра многофункционального назначения (МФН) минимальной материалоемкости при соблюдении условий прочности.

### Основной текст

Расчеты конструктивных элементов укосных стальных надшахтных копров прежде всего включают в себя расчет укосины, который сводится к определению внутренних усилий (рис. 2) с последующими проверками по

предельным состояниям по аналогии с балками постоянного сечения, работающими на изгиб с осевым сжатием.

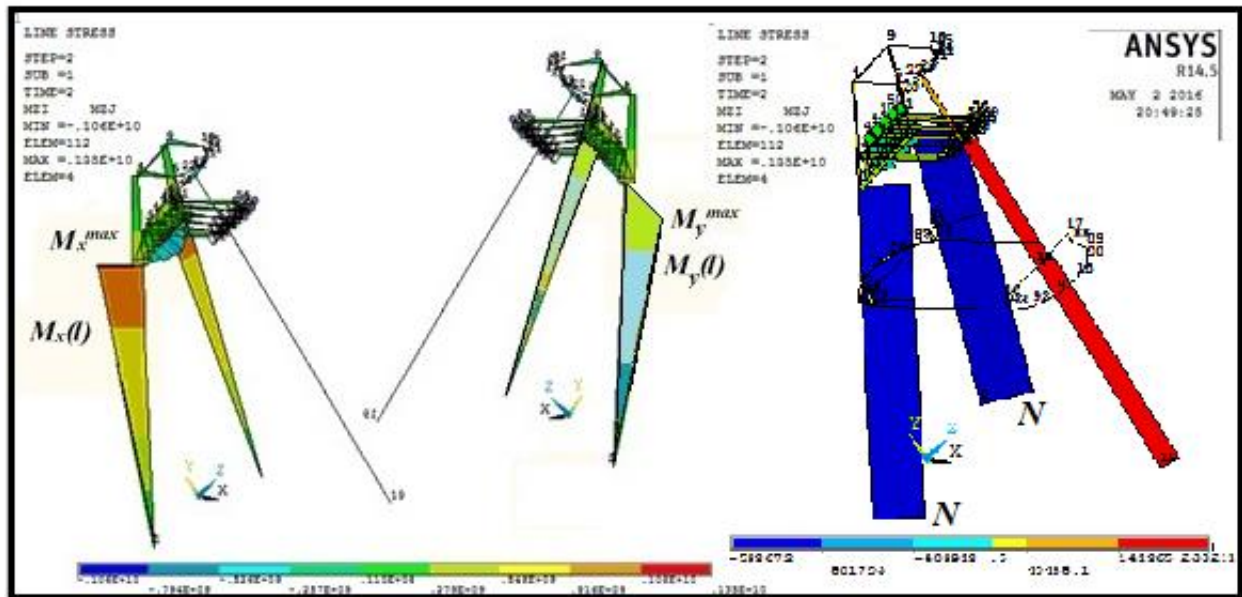


Рис. 2. Эпюры моментов  $M$  и продольного усилия  $N$  от натяжения канатов подъемной машины  $S$

Для того, чтобы выяснить, какие именно параметры сечения следует изменять в первую очередь, необходимо определиться с выбором переменных проектирования. Переменные проектирования – это те описывающие конструкцию величины, которые изменяются с помощью процедуры преобразования конструкции в процессе ее проектирования. В нашем случае это переменные, описывающие тип и размеры сечения укосины (рис. 3), а также ее топологию (рис. 4).

Для исследуемой конструкции были рассмотрены варианты сечений, в которых большая часть материала сосредоточена в зонах, максимально удаленных от нейтральной оси [1]. К ним относятся: прямоугольное сечение (рис 3,б), сечение в форме симметричного двутавра (рис 3,в), коробчатое сечение (рис 3,г). В результате было принято коробчатое сечение, которое более надежно с точки зрения устойчивости и имеет лучшие показатели при работе на кручение. Таким образом, в соответствии с рисунком 3,г, исследуемое пространство переменных проектирования ограничено следующими параметрами сечения: высота стенки  $h_w$ , толщина стенки  $t_w$ , ширина полки  $b_f$ , толщина полки  $t_f$ .

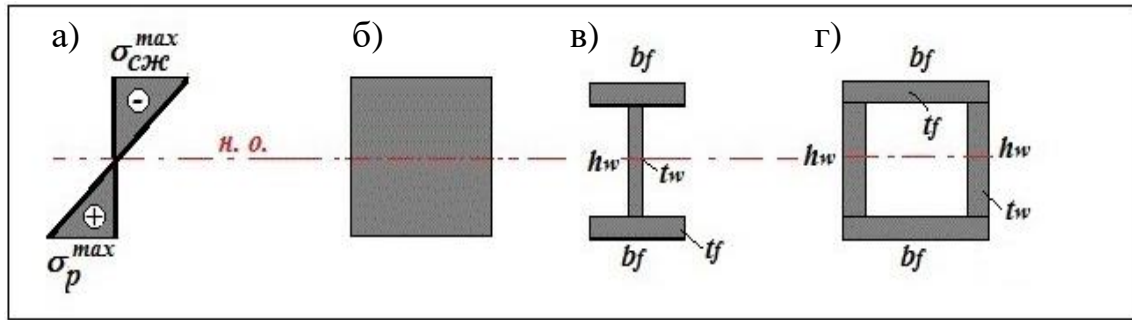


Рис. 3. Варианты сечений укосины: а) – эпюра напряжений; б) – прямоугольное сечение; в) – двутавровое сечение; г) – коробчатое сечение

Так как изгибающие моменты  $M_x(l)$  и  $M_y(l)$  обычно меняются по длине  $l$  укосины неравномерно (рис. 2), подбирая ее сечение по наиболее неблагоприятному сочетанию изгибающих моментов  $M_x^{max}(l)$  и  $M_y^{max}(l)$  (ф. 1, 2), получают излишний запас материала в сечениях укосины с меньшими значениями внутренних усилий (ф. 3).

$$\frac{N}{A} + \frac{M_x^{max}(l)}{W_x^{max}} + \frac{M_y^{соед}(l)}{W_y} = [\sigma], \quad (1)$$

$$\frac{N}{A} + \frac{M_y^{max}(l)}{W_y^{max}} + \frac{M_x^{соед}(l)}{W_x} = [\sigma], \quad (2)$$

$$\frac{N}{A} + \frac{M_x(l)}{W_x} + \frac{M_y(l)}{W_y} \leq R_y \gamma_c, \quad (3)$$

где  $M_x(l)$  и  $M_y(l)$  – расчетные изгибающие моменты в рассматриваемом сечении,  $M_x^{max}(l)$  и  $M_y^{max}(l)$  – максимальные изгибающие моменты,  $W_x$  и  $W_y$  – моменты сопротивления расчетного сечения,  $[\sigma]$  – допускаемое нормальное напряжение стали,  $R_y \gamma_c$  – расчетное сопротивление стали.

Расчетные моменты сопротивления сечения элементов укосины

$$W_x = \frac{2I_x}{h_w}, \quad W_y = \frac{2I_y}{b_f}, \quad (4, 5)$$

где моменты инерции

$$I_x = 2 \frac{b_f t_f^3}{12} + 2 \frac{t_w h_w^3}{12} + 2(b_f t_f) \left( \frac{h_w}{2} + \frac{t_f}{2} \right)^2, \quad (6)$$

$$I_y = 2 \frac{t_f b_f^3}{12} + 2 \frac{h_w t_w^3}{12} + 2(h_w t_w) \left( \frac{b_f}{2} - \frac{t_w}{2} \right)^2. \quad (7)$$

Расчетная площадь 
$$A = 2b_f t_f + 2t_w h_w \quad (8).$$

Возможность изменять размеры поперечного сечения по длине укосины в соответствии с распределением внутренних усилий (см. рис. 2,) значительно снизит расход металла и сделает конструкцию более экономичной по сравнению с укосинами постоянного сечения.

Для решения задачи по отысканию рациональной формы укосины минимальной материалоемкости были исследованы варианты конструкции в виде сварных балок коробчатого сечения с плавным изменением параметров сечений  $h_w$ ,  $t_w$ ,  $b_f$ ,  $t_f$  вдоль ее длины  $l$  (рис. 4).

Диапазоны изменения исследуемых параметров:

$$h_w = 40 \div 250 \text{ см}; t_w = 0,40 \div 3 \text{ см}; b_f = 40 \div 50 \text{ см}; t_f = 0,40 \div 3 \text{ см}.$$

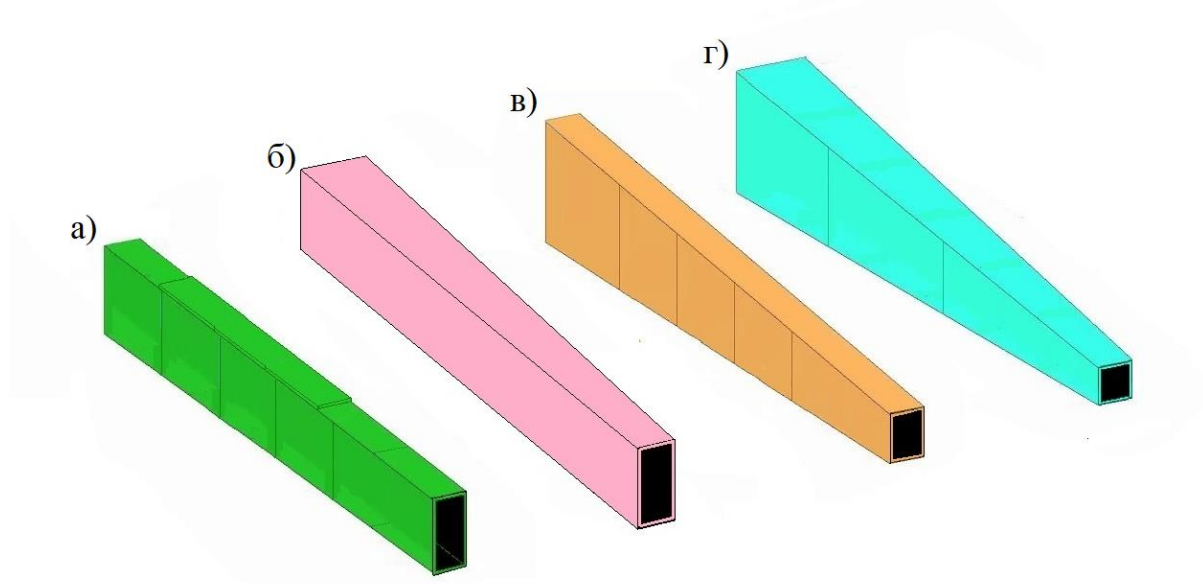


Рис. 4. Конструктивные решения возможных изменений сечения укосины по длине: а) – сечение с переменной толщиной полки  $t_f$  и стенки  $t_w$ ; б) – сечение с переменной шириной полки  $b_f$ ; в) – сечение с переменной высотой стенки  $h_w$ ; г) – сечение с переменной высотой стенки  $h_w$  и переменной шириной полки  $b_f$

Показателем экономичности сечения балки служит параметр  $Q = W/A$ , где  $W$  – момент сопротивления профиля,  $A$  – площадь сечения. Чем выше это отношение, тем меньшая масса металла необходима для увеличения сопротивления профиля на изгиб.

Таким образом, первостепенная задача состоит в определении параметров  $h_w$ ,  $t_w$ ,  $b_f$ ,  $t_f$ , изменение которых приводят к наибольшему увеличению функций  $I_x$ ,  $I_y$  при минимальном изменении функции  $A$ .

## Методика выбора оптимального соотношения параметров сечения укосины

Степень зависимости функции от аргументов можно оценить с помощью коэффициента эластичности [4, 5]. Этот коэффициент показывает, на сколько процентов изменится значение функции, если величина аргумента изменится на 1 %.

В случае функции многих переменных  $z = z(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$  коэффициент эластичности для переменной  $\varphi_i$  определяется следующим образом

$$Ez(\varphi_i) = \frac{\partial z}{\partial \varphi_i} \cdot \frac{\varphi_i}{z}.$$

В нашем случае функции – это  $I_x, I_y, A$ , а аргументы –  $b_f, t_f, h_w, t_w$ .

Приведём графики эластичностей указанных трёх функций по всем четырём переменным (рис. 5). Значения остальных неактивных переменных примем равными начальным значениям указанных выше диапазонов.

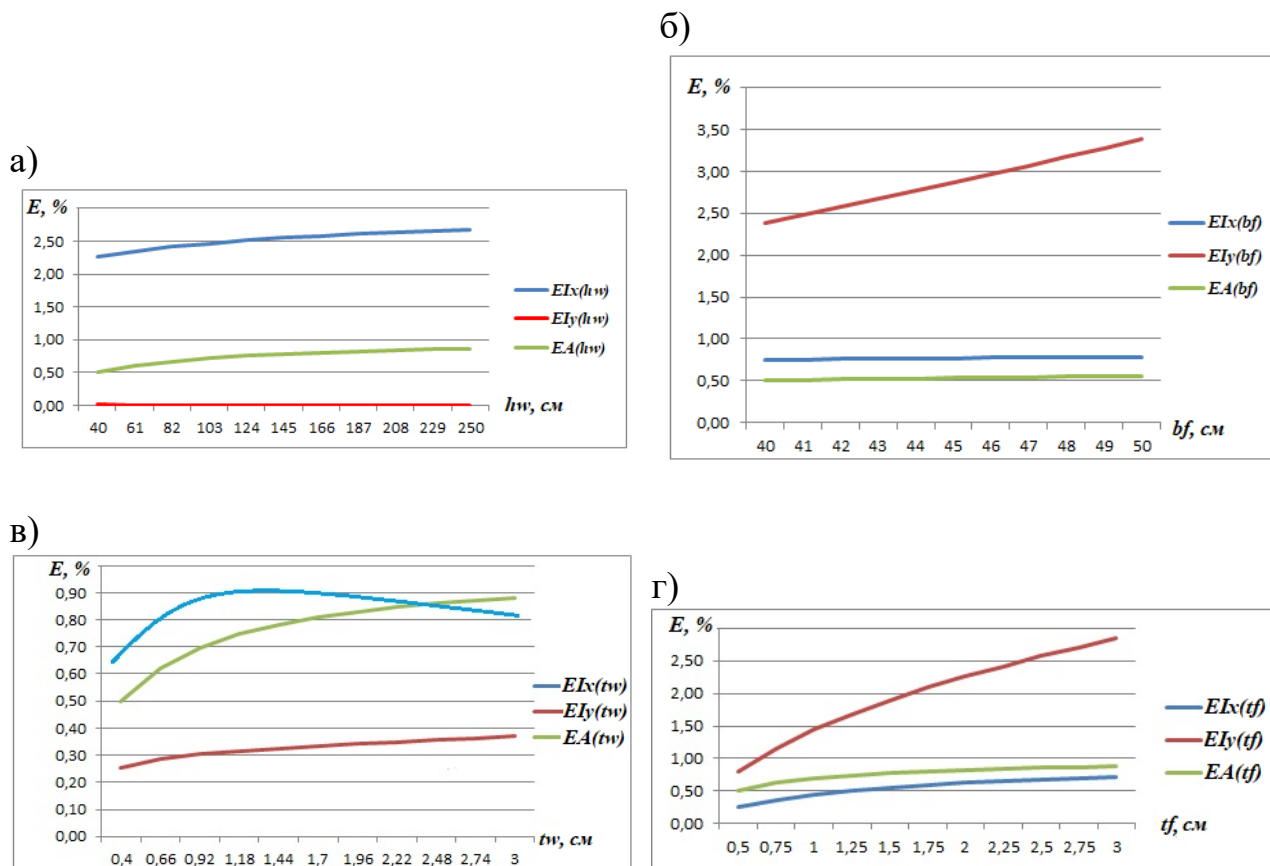


Рис. 5. Графики эластичности функций



Сравнение графиков и полученных табличных данных показывает, что на функцию  $I_x$  значительное влияние оказывает параметр  $h_w$  (2,43% и 2,64%). При этом функция  $A$  имеет тенденцию к росту, однако коэффициент эластичности остается меньше 1%, что говорит о том, что мера реагирования относительного изменения этой функции относительно выбранного параметра невелика. Изменение параметра  $b_f$  незначительно влияет на изменение значений функций  $I_x$ . При этом имеет место сильная зависимость (до 3,5%) функции  $I_y$  от данного параметра, однако исходя из условия нагружения укосины,  $M_y^{max}$  на порядок ниже, чем  $M_x^{max}$ , следовательно влияние параметра  $b_f$  не учитываем.

Также необходимо учесть влияние на  $I_x$  параметра  $t_w$  (0,93%), но при этом следует учесть, что при значениях  $t_w$  свыше 20 мм,  $I_x$  имеет тенденцию к убыванию значений до 0,73% при значениях  $t_w$  свыше 20 мм. При этом резко увеличивается площадь  $A$  (0,83% и 0,94%), а следовательно возрастает и масса конструкции.

Тогда указанный выше показатель экономичности сечения  $Q = W_x/A$  будет являться функцией только двух влияющих переменных:  $Q = Q(h_w, t_w)$ . Область возможных положительных значений функции  $Q(h_w, t_w)$  построим в виде поверхности двух переменных проектирования  $h_w$  и  $t_w$  (рис. 6).

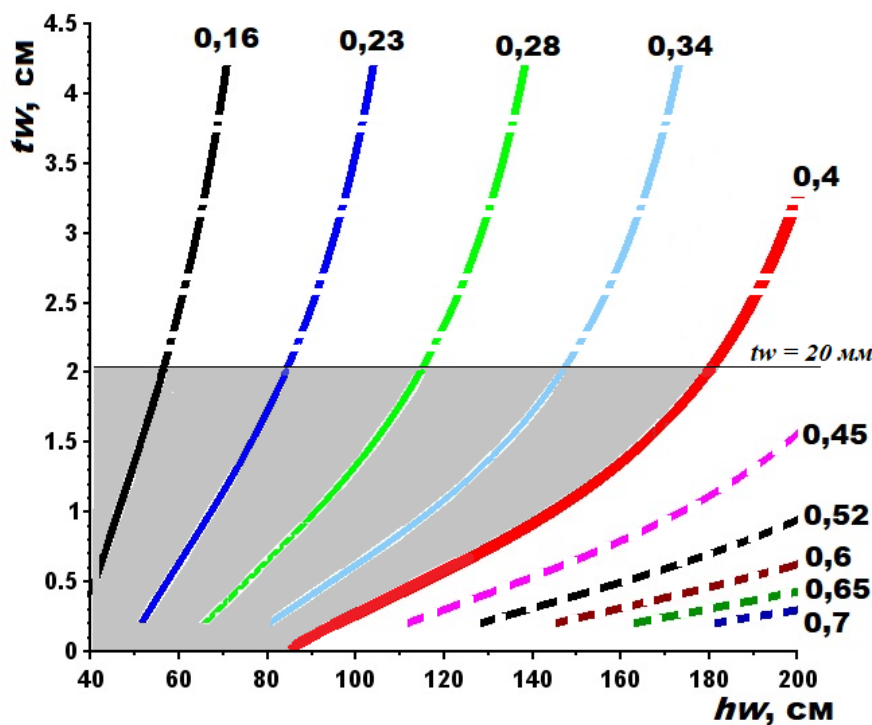


Рис. 6. График показателя экономичности  $Q(h_w, t_w)$  в виде изолиний

Полученное пространство проектирования делится на области допустимых решений (на рисунке 6 отображается серым цветом) и недопустимых решений с точки зрения устойчивости стенки сечения. Так для высот  $h_w > 100$  см, область ниже изолинии  $Q=0,4$  является областью недопустимых решений. Все допустимые соотношения  $h_w$  и  $t_w$ , полученные путем визуального анализа изолиний, лежат в серой зоне и могут быть использованы для ввода данных при формировании расчетного блока копра. При  $h_w > 100$  см, следует наращивать показатель  $t_f$ , так как при значениях  $t_w$  свыше 20 мм резко снижается показатель экономичности сечения  $Q$ .

**Результаты исследований.** Выполнен анализ значимых характеристик для множества комбинаций параметров сечений укосины с целью минимизации ее веса. Предложен подход к оптимизации параметров укосины переменного сечения, позволяющий получить эффективную конструкцию с оптимальным соотношением геометрических характеристик сечения при заданной нагрузке. Возможность изменять размеры поперечного сечения по длине укосины в соответствии с распределением внутренних усилий значительно снизит расход материала и сделает конструкцию более экономичной по сравнению с укосинами постоянного сечения.

Полученные графики позволяют путем визуального анализа определить множество пар значений независимых проектных переменных при формировании блока параметров сечений для реализации программы автоматизированного проектирования копра многофункционального назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кассихина Е. Г., Русакова Н. А. Определение рациональной формы укосины для стальных укосных копров многофункционального назначения // Уголь. 2022. № 10. С. 55-59 DOI: <https://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-10-55-59>.
2. Бровман Я. В. Надшахтные копры / Я. В. Бровман, –М. Госгортехиздат, 1961. – 235 с.
3. Розенблит, Г. Л. Стальные конструкции зданий и сооружений угольной промышленности / Г. Л. . Розенблит, – Москва, Ленинград : Углетехиздат, 1953. – 273 с.



4. Пиндайк, Р. Микроэкономика. / Р. Пиндайк, Д. Рабинфельд // – СПб.: Питер, 2011 г. – 608 с.
5. Зорич, В.А. Математический анализ / В. А. Зорич. // – М.: МЦНМО, 2012 г. – 720 стр.