

Оптимизация параметров сечения укосины для стальных укосных копров многофункционального назначения

Parameter optimization of the jib cross-section for the multi-purpose steel head frames

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-4-92-97>

КАССИХИНА Е.Г.

Канд. техн. наук, доцент кафедры
физических процессов
и строительной геотехнологии
освоения недр
Горного института ФГБОУ ВПО
«Кузбасский государственный
технический университет
им. Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: kalena-07@mail.ru

СИРОТА Д.Ю.

Канд. техн. наук, доцент кафедры
физических процессов
и строительной геотехнологии
освоения недр
Горного института ФГБОУ ВПО
«Кузбасский государственный
технический университет
им. Т.Ф. Горбачева»,
650000, г. Кемерово, Россия

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. Так как изгибающие моменты обычно меняются по длине укосины неравномерно, подбирая ее сечение по наибольшему изгибающему моменту, получают излишний запас материала во всех сечениях укосины, которому соответствует максимальное значение момента. 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 по возможности наибольший объем материала работал при напряжениях, равных допускаемым или близким к ним. В предложенной укосине переменного по высоте сечения эффективность достигается оптимизацией его размеров в соответствии с эпюрами внутренних усилий. Для расчета таких конструкций используется метод разбиения всего элемента на более мелкие стержневые элементы постоянной жесткости. Большинство программных комплексов по расчету конструкций не обладает возможностью автоматизированного ввода для таких сечений. Необходимо обосновать выбор различных вариантов проектных решений для формирования блока входных параметров для автоматизированного расчета для укосин переменного сечения. Научное значение предложенного технического решения заключается в том, что сформировано пространство взаимно влияющих переменных проектирования применительно к задаче минимизации веса конструкции укосины копра многофункционального назначения. Получена формула для определения множества пар оптимальных значений независимых проектных переменных, применимая для формирования блока входных параметров для автоматизированного расчета укосин переменного сечения.

Практическая значимость заключается в реализации упрощенного поиска оптимальных параметров сечения укосины путем визуального анализа полученных графиков, позволяющих получить множество приемлемых альтернативных проектов в рамках установленных проектных критериев.

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

Для цитирования: Кассихина Е.Г., Сирота Д.Ю. Оптимизация параметров сечения укосины для стальных укосных копров многофункционального назначения // Уголь. 2024;(4):92-97. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-92-97.

Abstract

The existing calculations of the structural elements of steel headframes include the calculation of the headframe, which is reduced to the determination of internal forces with subsequent checks for limit states by analogy with beams of constant cross section. Since bending moments usually vary unevenly along the length of the jib, selecting its cross section according to the largest bending moment, an excess supply of material is obtained in all sections of the jib, except for the one that corresponds to the maximum value of the moment. This approach does not make it possible to obtain a design with a minimum material consumption, since the cross section is constant along the entire length of the jib and is designed for maximum efforts characteristic of only a small area.

To obtain a rational cross section of the jib, it is necessary to strive to ensure that, if possible, the largest volume of material works at stresses equal to or close to the allowable ones. In the proposed jib with a section variable in height, efficiency is achieved by optimizing its dimensions in accordance with the diagrams of internal forces. To calculate such structures, the method of splitting the entire element into smaller rod elements of constant stiffness is used. Most of the software packages for structural analysis do not have the possibility of automated input for such sections. It is necessary to justify the choice of various options for design solutions for the formation of a block of input parameters for automated calculation for jibs of variable cross section.

The scientific significance of the proposed technical solution lies in the fact that a space of mutually influencing design variables has been formed in relation to the problem of minimizing the weight of the multifunctional pile driver jib structure. A formula is obtained for determining the set of pairs of optimal values of independent design variables, applicable for the formation of a block of input parameters for automated calculation of jibs of variable cross section.

The practical significance lies in the implementation of a simplified search for the optimal parameters of the jib cross section by visual analysis of the obtained graphs, which makes it possible to obtain a variety of acceptable alternative designs within the established design criteria. The main stimulus for the study of the jib was the calculation of significant characteristics for a variety of combinations of sec-

tion parameters in order to minimize its weight. The results of the study are used to assess the adequacy of design alternatives and their relative merits based on established design criteria.

Keywords

Steel angle headframe, multifunctional steel angle headframe, jib variable cross-section height.

For citation

Kassikhina E.G., Sirota D.Yu. Parameter optimization of the jib cross-section for the multi-purpose steel head frames. *Ugol'*. 2024;(4):92-97. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-92-97.

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре «Физические процессы и строительная геотехнология освоения недр» КузГТУ развивается научное направление по разработке инновационных подходов к проектированию горнотехнических зданий и сооружений, включая проектирование стальных укосных копров многофункционального назначения для вертикальных стволов угольных и рудных шахт на основе рациональных конструктивных решений [1, 2].

Надшахтный копер предназначен для размещения направляющих шкивов подъемной установки, обеспечивающей транспортировку полезного ископаемого из забоя на поверхность [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. На конструкции копра действуют значительные усилия натяжения канатов подъемной машины, для восприятия которых предназначена укосина – наклонный конструктивный элемент либо в виде фермы, либо в виде рамы постоянного сечения (рис. 1, а и рис. 1, б).

Особенность конструктивного решения стального копра многофункционального назначения (рис. 2, а) состоит в том, что вся нагрузка от натяжения канатов подъемной машины S передается на укосину 1, так как отдельно стоящий станок 2 связи с укосиной не имеет.

Существующие методики расчета конструктивных элементов укосных стальных надшахтных копров включают в себя расчет укосины, аналогичный расчетам балок

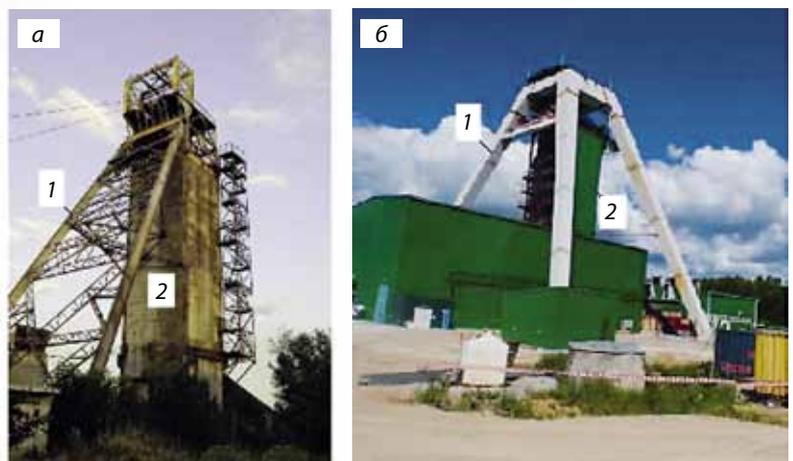


Рис. 1. Надшахтные копры с укосиной в виде рамы постоянного сечения: а – одноукосный; б – двухукосный

Fig. 1. The headframe with the frame of constant cross-section jib: а – one-jib; б – two-jib

постоянного сечения. Расчет предусматривает определение внутренних усилий $M_x(l)$ и $M_y(l)$ в сечениях укосины с последующими проверками по предельным состояниям в соответствии с нормативными документами, СНиПами и СП [1, 2].

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

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

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

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

где $M_x(l)$ и $M_y(l)$ – расчетные изгибающие моменты, W_x и W_y – моменты сопротивления сечения, $[\sigma]$ – допускаемое нормальное напряжение стали, R_y – расчетное сопротивление стали.

В результате получим конструкцию максимальной материалоемкости с одинаковыми сечениями по всей длине укосины, рассчитанными с учетом максимального усилия, характерного лишь для небольшого участка.

Применение сварных сечений дает возможность формировать сечения с оптимальными соотношениями размеров на любом участке l_i , в том числе в местах снижения усилий $M_x(l) < M_x^{\max}$ и $M_y(l) < M_y^{\max}$. 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 [16]. 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 рис. 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 .

Возможность изменять размеры поперечного сечения по длине укосины в соответствии с распределением внутренних усилий (см. рис. 2, б) 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 (см. рис. 4).

Диапазоны изменения исследуемых параметров: $h_w = 40-250$ см; $t_w = 0,40-3$ см; $b_f = 40-50$ см; $t_f = 0,40-3$ см.

За целевую функцию был принят показатель экономичности сечения $Q = W/A$, где W – момент сопротивления профиля, см³; A – площадь сечения профиля, см². Чем выше это отношение, тем меньшая масса металла необходима для увеличения сопротивления на изгиб.

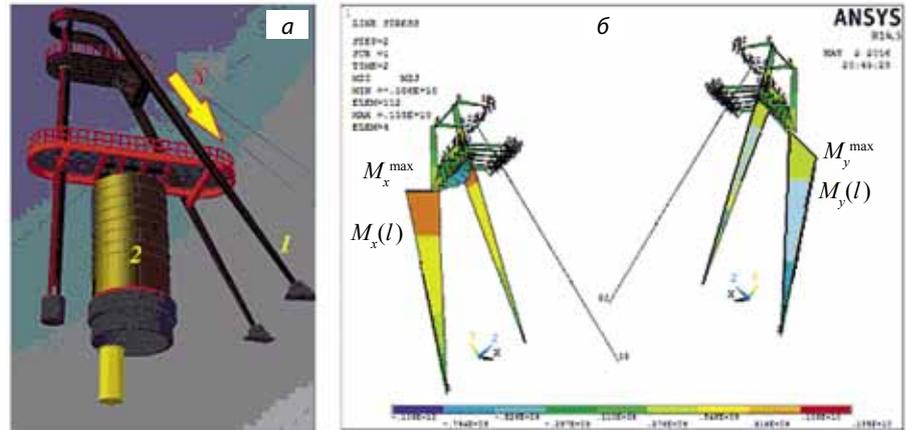


Рис. 2. Копер многофункционального назначения: а – конструктивная схема; б – эпюра моментов от усилия S (натяжение канатов подъемной машины); 1 – укосина копра; 2 – станок

Fig. 2. Multi-purpose steel headframe: а – design diagram; б – diagram of moments from force R (tension of ropes of the winding machine); 1 – jib; 2 – rig

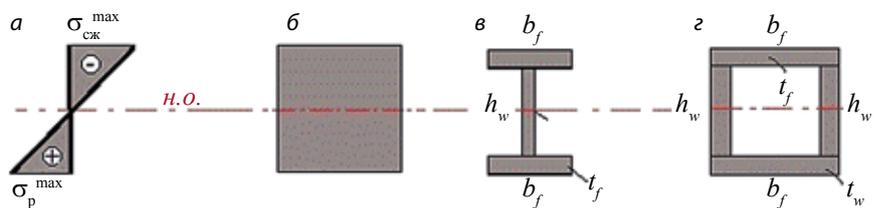


Рис. 3. Варианты сечений укосины: а – эпюра напряжений; б – прямоугольное сечение; в – двутавровое сечение; г – коробчатое сечение

Fig. 3. Options for the jib cross-sections: а – stress diagram; б – rectangular cross-section; в – H-beam cross-section; г – box cross-section

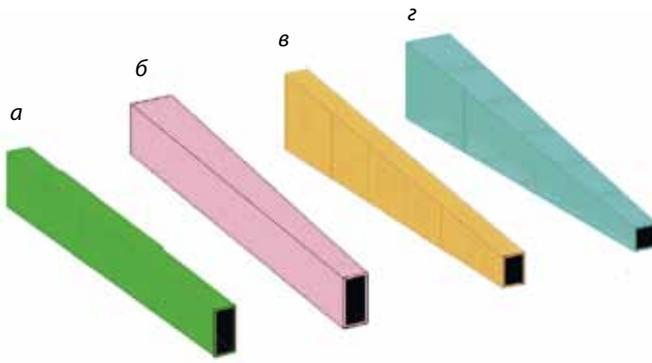


Рис. 4. Конструктивные решения возможных изменений сечения укосины по длине: а – сечение с переменной толщиной полки и стенки; б – сечение с переменной шириной полки; в – сечение с переменной высотой стенки; г – сечение с переменной высотой стенки и переменной шириной полки

Fig. 4. Constructive solutions for possible changes in the cross-section of the jib along the length: a – section with a variable thickness of the shelf and wall; б – section with a variable width of the shelf; в – section with variable wall height; г – section with variable wall height and variable flange width

Расчетные моменты сопротивления элементов укосины:

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

где моменты инерции:

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

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

Расчетная площадь;

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

Таким образом, первостепенная задача состоит в определении параметров, изменение которых приводит 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 [17, 18]. 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 φ_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 .

Приведем графики эластичностей указанных трех функций по всем четырем переменным (рис. 5). Значения остальных неактивных переменных примем равными начальным значениям указанных выше диапазонов.

Можно заметить, что наиболее влиятельными оказываются две взаимосвязи: влияние переменной h_w (рис. 5, а) на функцию I_x (2,6%) и влияние переменной b_f (рис. 5, б) на функцию I_y (2,2%).

Дополнительно вычислим коэффициенты эластичности для всех функций, когда параметры имеют медианные по диапазону значения (см. табл. 1) и максимальные значения (см. табл. 2).

Сравнение графиков и полученных табличных данных показывает, что на функцию I_x значительное влияние оказывает параметр h_w (2,53% 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 , но при этом имеет место сильная зависимость (до 2,01%) функции I_y от данного параметра. Исходя из условия нагружения укосины, M_y^{\max} на порядок ниже, чем M_x^{\max} .

В этом случае задача оптимизации упрощается до отыскания максимальных значений функции I_x (6) при постоянных медианных значениях $b_f = 45$ см, $t_f = 1,7$ см и описы-

Таблица 1

Медианные коэффициенты эластичности для медианных значений параметров

Median elasticity coefficients for median parameter values

I_x				I_y				A			
$E(b_f)$	$E(t_f)$	$E(t_w)$	$E(h_w)$	$E(b_f)$	$E(t_f)$	$E(t_w)$	$E(h_w)$	$E(b_f)$	$E(t_f)$	$E(t_w)$	$E(h_w)$
0,48	0,42	0,52	2,53	2,01	0,09	0,98	0,91	0,24	0,24	0,76	0,76

Таблица 2

Максимальные коэффициенты эластичности для максимальных значений параметров

Maximum elasticity coefficients for maximum parameter values

I_x				I_y				A			
$E(b_f)$	$E(t_f)$	$E(t_w)$	$E(h_w)$	$E(b_f)$	$E(t_f)$	$E(t_w)$	$E(h_w)$	$E(b_f)$	$E(t_f)$	$E(t_w)$	$E(h_w)$
0,36	0,29	0,63	2,64	1,92	0,06	1,07	0,95	0,17	0,17	0,83	0,83

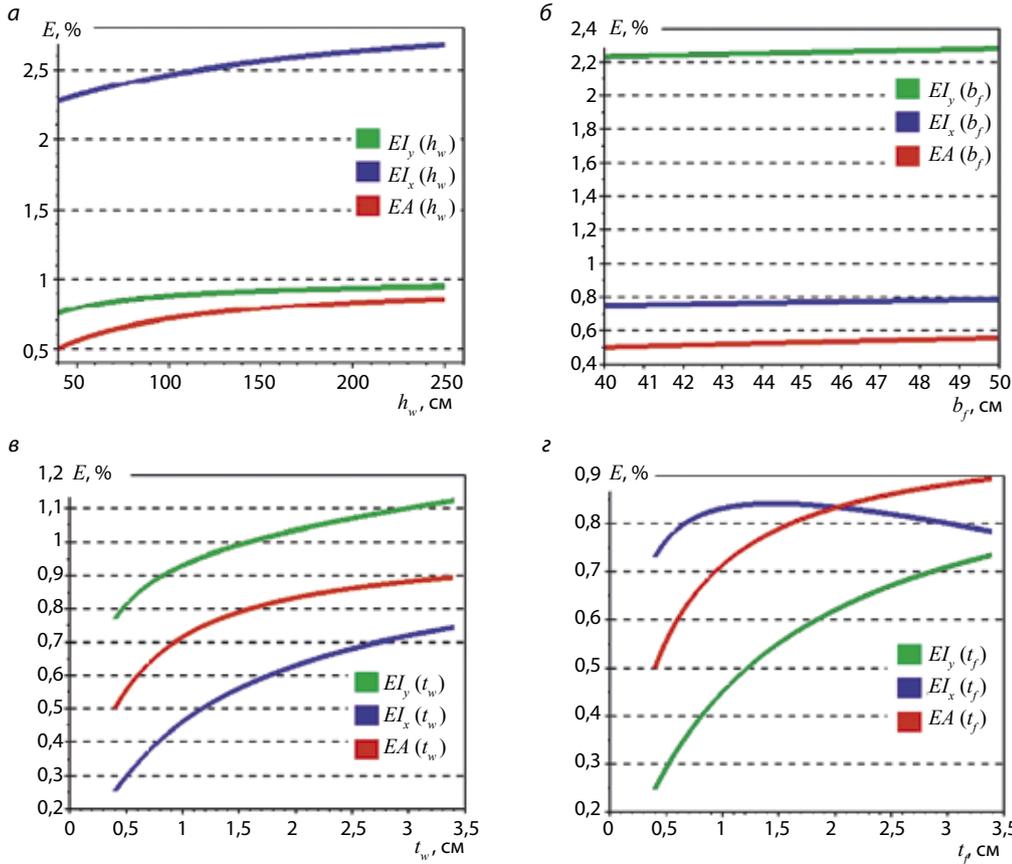


Рис. 5. Графики эластичности функций
Fig. 5. The function elasticity diagrams

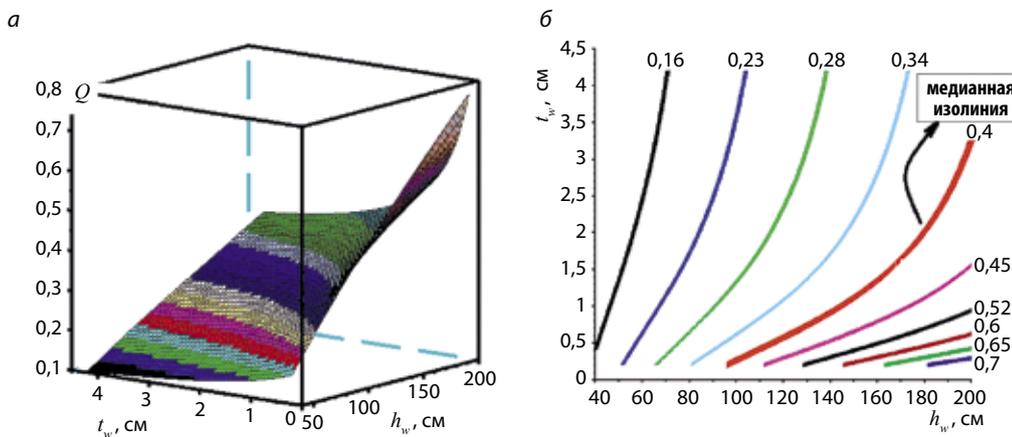


Рис. 6. Графики целевой функции $Q(h_w, t_w)$:
а – в виде поверхности;
б – в виде изолиний
Fig. 6. The plots of goal function $Q(h_w, t_w)$:
а – as the surface;
б – as the contours

вається лишь парой переменных проектирования h_w и t_w . Выбор t_w в качестве влияющей переменной обусловлен тем, что переменная t_f имеет тенденцию к убыванию в исследуемом диапазоне.

Тогда указанный выше показатель экономичности сечения $Q = W_x/A$ будет являться функцией только двух переменных: $Q = Q(h_w, t_w)$. Область возможных положительных значений целевой функции $Q(h_w, t_w)$ построим в виде поверхности двух переменных проектирования h_w и t_w (рис. 6, а). Кроме того, если выражение W_x последовательно приравнять к конкретным конечным значениям, то можно построить кривые постоянного показателя экономичности сечения – изолинии Q (рис. 6, б). При этом мы видим, что имеет место монотонное уменьшение высоты стенки h_w^{\max} до h_w^{\min} при неоднократном уменьшении толщины стенки t_w .

Для более гибкого регулирования размеров укосины возьмем медианное значение величины $Q = 0,5 \cdot (0,1 + 0,7) = 0,4$, которому соответствует бесконечный набор решений – пар значений h_w и t_w . Для их поиска поступим следующим образом. Сформируем равномерную сетку значений одной из переменных, например $h_w = [100 : 2 : 200]$ см. Решим уравнение $Q(h_w, t_w) = 0,4$ для каждого фиксированного значения h_w с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [19]. Для этого сформируем целевую функцию: $D = [Q - 0,4]^2$, минимальное значение которой будем искать для каждого фиксированного h_w . Так как из анализа изолиний функции $Q(h_w, t_w)$ ясно, что область изменения переменной $0,2 \leq t_w \leq 3,5$ см, то для поиска минимума целевой функции можно использовать метод золотого сечения [20]. В результате получим медианную изолинию (рис. 6, б).

Применяя опять МНК к этому набору точек, подберем наилучшую аппроксимирующую формулу вида:

$$t_w = 4 \cdot 10^{-6} \cdot t_w^3 - 0,0014 \cdot h_w^2 + 0,1891 \cdot h_w - 8,5512$$

с индексом детерминации $R = 0,993$.

Полученная медианная изолиния (см. рис. 6, б) делит пространство проектирования на области допустимых проектов и недопустимых проектов с точки зрения устойчивости сечения. Так, для высот $h_w > 100$ см область ниже изолинии $Q = 0,4$ является областью недопустимых решений. Все соотношения h_w и t_w , полученные путем визуального анализа изолиний, лежащих выше медианной изолинии, могут быть использованы для оценки адекватности пробных вариантов проекта и их относительных достоинств на основе установленных проектных критериев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Практическая значимость заключается в реализации упрощенного поиска оптимальных параметров сечения укосины путем визуального анализа полученных графиков, позволяющих получить множество приемлемых альтернативных проектов. Полученная формула для определения множества пар значений независимых проектных переменных применима для формирования блока параметров сечений для реализации программы автоматизированного проектирования копра многофункционального назначения.

Список литературы • References

- Kassikhina E.G., Pershin V.V., Glazkov J.F. New Technical Solution for Vertical Shaft Equipping Using Steel Headframe of Multifunction Purpose. E3S Web of Conferences, 11nd International Innovative Mining Symposium, 1, Russian Federation Year of Environment, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101007>.
- Кассихина Е.Г. Новая конструктивная форма надшахтного копра многофункционального назначения // Горный журнал. 2017. № 8. С. 56-60.
Kassikhina E.G. New structural form of a multi-purpose mine head gear. *Gornyj zhurnal*. 2017;(8):56-60. (In Russ.).
- Русских А.Г. Практические аспекты обследования надшахтных копров // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 9. Часть 4. С. 17-20. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.103>.
Russkikh A.G. Practical aspects of inspection mine headgear. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2016;(9) Part 4:17-20. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.103>.
- Butler D.W., Schneyderberg A.C. Headframe selection – steel vs. concrete [J]. *Mining Congress Journal*. 1982;7:1,15.
- Edwards F.A. Hoisting systems. SME Mining engineering handbook Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 1992;(2).
- Rojas-Sola J.I., Montalvo-Gil J.M., Castro-Garcia M. 3D modeling and functional analysis of a headframe for mineral extraction. *Dyna*. 2013;80(181):118-125.
- Nechytailo A.Ye., Horokhov Ye.V., Kushchenko V.N. Analysis of the mode of deformation of the sub-pulley structures on shaft sloping headgear structures. 18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering 1, Weimar, 2009.
- Hartman H.L., Mutmanský J.M. Introductory Mining Engineering, John Wiley and Sons. 2002, 592 p.
- Hartman H.L., Britton S.G., Mutmanský J.M. SME Mining Engineering Handbook, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1992.
- Ross I. Goldcorp going electric with Chapleau gold mine. Northern Ontario Business, 2016. <http://www.mining.com/web/goldcorp-going-electric-with-chapleau-gold-mine>.
- Rojas-Sola J.I., Palomares-Muñoz I. 3D modelling and static analysis of a Spanish articulated metal headframe for mineral extraction. *Dyna*. November 2015.
- Kelly L. Historical end. Northern Ontario business. 34:3, 31. 2014.
- Ernst-Ulrich Reuther. Einführung in den Bergbau, 1, 34 Auflage, Verlag Glückauf GmbH. Essen, 1992.
- Ernst-Ulrich Reuther. Lehrbuch der Bergbaukunde. Erster Band, 12, 37 Auflage, VGE Verlag GmbH, Essen, 2010.
- Ernst Richard. Wörterbuch der Industriellen Technik. Wiesbaden, Oscar Brandstetter, 1989.
- Кассихина Е.Г., Русакова Н.А. Определение рациональной формы укосины для стальных укосных копров многофункционального назначения // Уголь. 2022. № 10. С. 55-59 DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-55-59.
Kassikhina E.G., Rusakova N.A. Rational jib form determining for the multi-purpose steel headframes. *Ugol'*. 2022;(10):55-59. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-10-55-59.
- Пиндайк Р., Рабинфельд Д. Микроэкономика. СПб.: Питер, 2011. 608 с.
- Зорич В.А. Математический анализ. М.: МЦНМО, 2012. 720 с.
- Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2005. 544 с.
- Аттетков А.В., Зарубин В.С., Канатников А.Н. Введение в методы оптимизации. М.: Финансы и статистика, 2008. 270 с.

Authors Information

Kassikhina E.G. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Physical processes and construction geotechnology of subsurface development, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail kalena-07@mail.ru

Sirota D.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Physical processes and construction geotechnology of subsurface development, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.11.2023

Поступила после рецензирования: 28.02.2024

Принята к публикации: 26.03.2024

Paper info

Received November 22, 2023

Reviewed February 28, 2024

Accepted March 26, 2024