

УДК 624.96

**ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
УЗЛОВ ОПИРАНИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ШКИВОВ
РАМНЫХ ШАХТНЫХ КОПРОВ**

д.т.н. проф. В.Н. Кушенко, асп. А.Е. Нечитайло

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры***Актуальность**

Укосные шахтные копры являются наиболее ответственными сооружениями шахтной поверхности. Аварии шахтных копров имеют катастрофические последствия и приводят к длительным остановкам производства. Обследования металлических копров Донецкой области это более 110 копров, из-за выявленных нарушений запрещена эксплуатация 62 копров. Причинами аварий являются: а) тяжелые условия эксплуатации; б) интенсивные динамические нагрузки; в) изменение технических характеристик подъемных канатов без должного инженерного обоснования и т.д. [7].

В проектной практике расчёт копров производится по условной схеме, так как при расчёте подшивные балки аппроксимируют стержневыми элементами, а равнодействующую от натяжения канатов представляют в виде горизонтальной и вертикальной составляющих в месте опирания шкива [1, 2, 3, 4]. Такой подход вносит существенные неточности при определении напряжённого состояния конструкций шахтных копров [11]. Вследствие этого параметры напряжённого состояния несущих конструкций шахтных копров рассчитываются не достаточно точно [10, 11], например, в узлах опирания направляющих шкивов на подшивные конструкции, а так же в местах резкого изменения сечений конструктивных элементов.

Таким образом, анализ напряжённого состояния элементов подшивных конструкций и факторов на них влияющих, является актуальной научной задачей.

Объектом исследования являются подшивные конструкции рамных укосных копров.

Подшивные конструкции рамных укосных копров служат для опирания направляющих шкивов [6,13]. В данном исследовании рассмотрены подшивные конструкции копров: полупатрового (одноканатного и многоканатного подъёмов), патрового и комбинированного см. рис. 1.

Рассматриваемые подшивные конструкции по конструктивной схеме представляют собой пространственные пластинчатые конструктивные системы. Характеристики подшивных конструкций представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Из вышеприведенной таблицы видно, что для подшивных балок отношение высоты сечения к длине составляет диапазон 0.21-7.78, к тому же в местах опирания подшивника присутствует резкое изменение сечения, поэтому аппроксимация этих элементов в виде стержней не позволяет достаточно точно выполнить проверки прочности. При проверке плоского напряженного состояния данных конструкций отсутствуют данные, в каких точках выполнять проверки прочности.

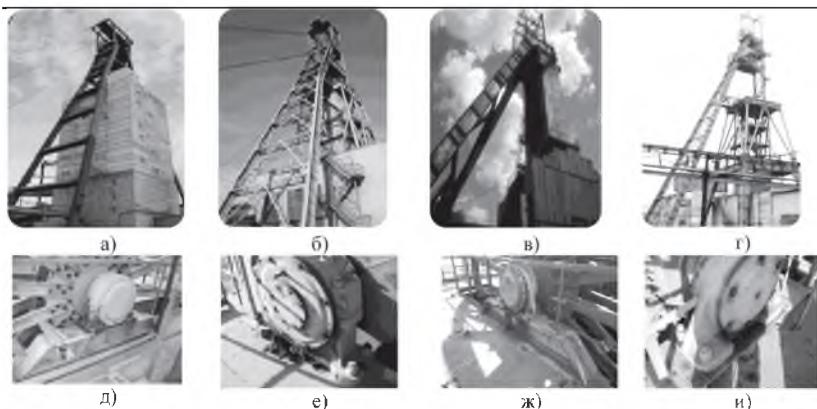


Рис. 1. Общий вид копра: шатровый скиповый копер (а); полushатровый скиповый копер (б); комбинированный полushатровый копер (в); полushатровый клетьевой копер (г). Фотоиллюстрации узла опорения подшипника: шатровый скиповый копер (д); полushатровый скиповый копер (е); комбинированный полushатровый копер (ж); полushатровый клетьевой копер (и).

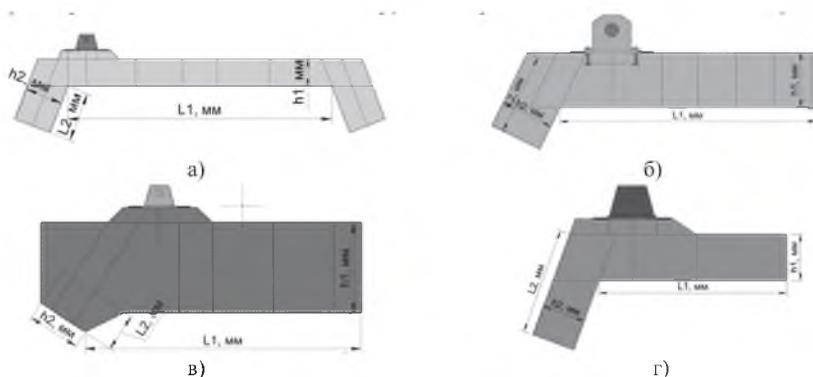


Рис. 2. Пространственные пластинчатые конструктивные системы подшипных балок: шатровый скиповый копер (а); полushатровый скиповый копер (б); комбинированный полushатровый копер (в); полushатровый клетьевой копер (г)

Цель исследования: факторный анализ напряжённого состояния узлов опорения направляющих шкивов.

Задачи исследования:

а) выявление областей распределения местных напряжений в стенке подшипной балки в месте опорения направляющего шкива;

б) определение параметров плоского напряженного состояния подпквивных конструкций;

в) анализ влияния технологических и конструктивных факторов на напряженное состояние стенки узла опирания направляющего шкива.

Методика исследования

Анализ факторов влияющих на напряжённо-деформированное состояние конструкций производился в три этапа [9]:

1 этап. Моделирование напряженно-деформированного состояния подпквивных конструкций на пространственной расчетной схеме, аппроксимированной пластинчатыми и объемными конечными элементами в среде программно-вычислительного комплекса Ansys Workbench 14.0 [8].

2 этап. Моделирование нагрузок с учётом динамической составляющей усилия натяжения подъёмного каната при ускоренном движении подъёмной машины [9, 12].

3 этап. Факторный анализ напряженного состояния в стенке узла опирания шкива в зависимости от технологических факторов (изменение угла наклона струны каната к горизонту, величины равнодействующей) и конструктивных факторов (толщина полки узла опирания шкива, толщины стенки узла опирания шкива) [5].

Таблица 1.

Характеристики подпквивных конструкций

| Наименование копра | наклона угол к горизон ту, ° | Сечение горизон- тальной части  | Сечение наклонной части  | Опирание подпккви на шкива | h1/ L1 | h2/ L2 | Материал конструк ции | |
|--|--|--|--|----------------------------------|-----------|-----------|-----------------------------|------|
| Шатровый скиповой копер | 69° | h1=1000мм; b1=250мм; L1=4600мм | h2=1400мм; b2=250мм; L2=180мм | на узел опирания | 0.22 | 7.78 | | С255 |
| Полушатровый скиповой копер | 63° | h1=1400мм; b1=400мм; L1=6740мм | h2=1000мм; b2=400мм; L2=2110мм | на верхнюю полку ригеля | 0.21 | 0.47 | | |
| Комбинированный полушатровый копер | 57° | h1=2400мм; b1=300мм; L1=7400мм | h2=700мм; b2=300мм; L2=1020мм | на узел опирания | 0.32 | 0.69 | | |
| Полушатровый клетевой копер | 64° | h1=1000мм; b1=320мм; L1=3300мм | h2=800мм; b2=320мм; L2=1860мм | на верхнюю полку ригеля | 0.30 | 0.43 | | |

Диапазон изменения факторов влияющих на напряжённое состояние узла опирания шкива приведен в табл. 2.

Результаты исследования

В результате численного моделирования получены параметры напряжённого состояния элементов подпквивных конструкций: главные напряжения (σ_1 , σ_2), приведенные напряжения ($\sigma_{прив}$), нормальные напряжения (σ_x , σ_y), каса-

тельные напряжения (τ_{xy}) с учётом динамической составляющей нагрузки от натяжения подъёмного каната.

Полученные результаты для узлов опирания направляющих шкивов представлены в табл. 3.

Таблица 2.

Диапазон изменения факторов влияющих на напряженное состояние узла шкива

| Фактор | Нижний уровень | Верхний уровень |
|---|-------------------|---------------------|
| Технологические факторы | | |
| Угол наклона струны каната к горизонту | 35° | 65° |
| Величина равнодействующей, т | Рабочее натяжение | Разрывное натяжение |
| Смещен. подшипника шкива с оси ригеля, мм | 0 | 10 |
| Конструктивные факторы | | |
| Толщина полки узла опирания шкива, мм | 20 | 30 |
| Толщина стенки узла опирания шкива, мм | 12 | 25 |

Таблица 3.

Экстремальные значения местных напряжений в элементах узлов опирания направляющих шкивов.

| Элемент узла | $\sigma_{\text{min}1}$ МПа | $\sigma_{\text{min}2}$ МПа | $\sigma_{\text{прив}}$ МПа | $\sigma_{\text{нривмк}}$ МПа | $\tau_{\text{мк}}$ МПа | $\sigma_{\text{мк}1}/\sigma_{\text{мк}2}$ | $\sigma_{\text{нривмк}}/R_{\gamma_c}$ | $\sigma_{\text{прив}}/1,15 R_{\gamma_c}$ | $\tau_{\text{мк}}/0,58 R_{\gamma_c}$ |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------|---|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Полка | -22.6; -27.2 | 77.8; 91.39 | 62.5; 86.4 | 59.9; 84.3 | 32.8; 49.1 | -0.29; -0.4 | 0.26; 0.36 | 0.24; 0.32 | 0.25; 0.36 |
| Стенка | -50.9; -66.9 | 0.001; 0.001 | 58.56; 81.4 | -64.6; -87.4 | 33.8; 44.9 | 0.001; 0.001 | 0.28; 0.38 | 0.21; 0.30 | 0.25; 0.33 |
| Сварные швы упора подшипника | -29.1; -37.7 | 4.9; 6.9 | 1582; 2394 | 101.1; 1594 | 706; 1276 | -0.13; -0.24 | 0.43; 0.68 | 0.59; 0.89 | 0.52; 0.94 |

Примечание: в ячейках приведены min; max значения напряжений в наиболее напряженных точках элементов конструкции

В результате анализа напряжённого состояния конструкций подшипных рам, были установлены следующие характерные зоны местных напряжений: «А1» - полка узла опирания подшипника шкива (под передним торцом подшипника шкива); «А2» - стенка узла опирания подшипника шкива (под передней частью подошвы подшипника шкива); «А3» - сварные швы переднего упора подшипника шкива (см. рис. 3).

В соответствии с данными, напряжённое состояние в зоне «А2» близко к линейному напряжённому состоянию. В отличие от традиционных представлений, наиболее напряжённая точка в зоне «А2» находится не на пересечении

линии действия равнодействующей от натяжения подъёмного каната, а смещена к переднему упору см. рис. 4.

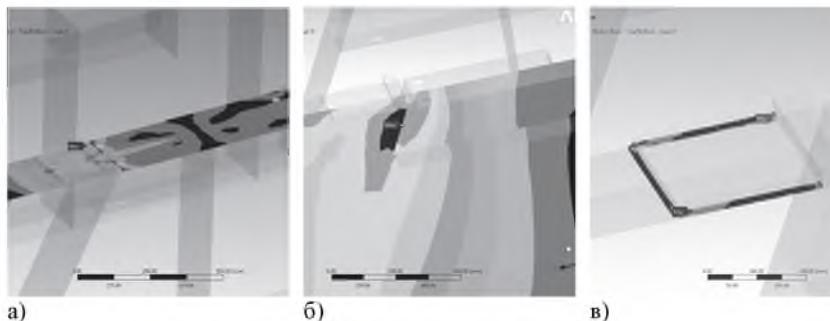


Рис. 3. Характерные области переменных напряжений: а) «А1» - полка узла опирания подшипника шкива, б) «А2» - стенка узла опирания подшипника шкива, в) «А3» - сварные швы переднего упора подшипника.

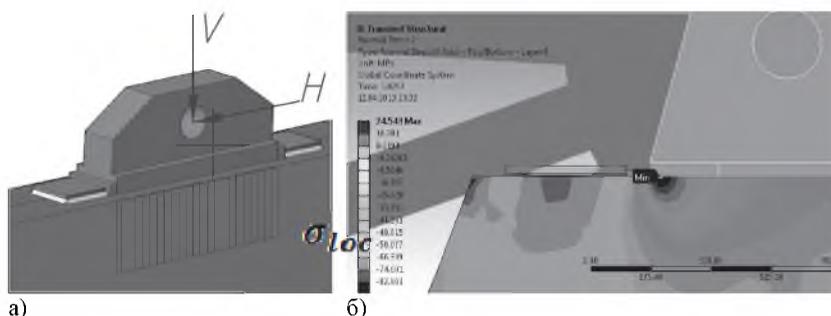


Рис. 4. Положение точки с максимальными напряжениями в зоне «А2»: а) традиционное представление распределения местных напряжений в стенке узла опирания шкива; б) результаты численного моделирования

Положение наиболее напряженной точки в зоне «А2» при изменении угла наклона каната к горизонту приведено на рис.5 и табл. 4.

Таблица 4.

Положение наиболее напряженной точки в зоне «А2» при изменении угла наклона каната к горизонту

| Угол наклона струны каната к горизонту, градусы | a, градусы | b, градусы |
|---|------------|------------|
| 35 | 17.5 | 44.8 |
| 45 | 22.5 | 44.9 |
| 55 | 27.5 | 45.1 |
| 65 | 32.5 | 45.1 |

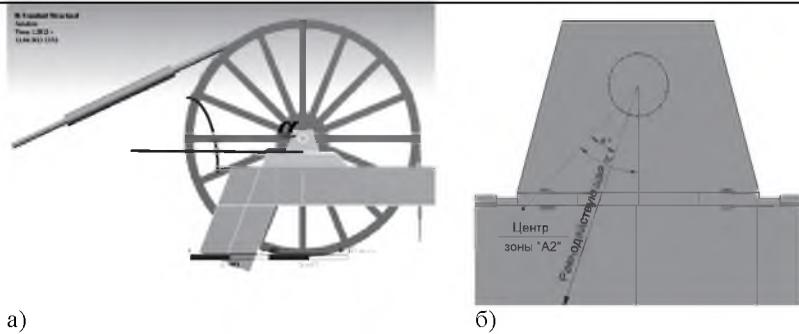


Рис. 5. Положение наиболее напряженной точки в зоне «A2» при изменении угла наклона каната к горизонту: а) общий вид моделирования шкива и наклонного каната; б) центр наиболее напряженной точки в зоне «A2».

Обобщая результаты таблицы 5 можно сделать вывод о том, что положение наиболее напряженной точки в зоне «A2» не зависит от угла наклона равнодействующей натяжения подъемного каната. Положение наиболее напряженной точки в зоне «A2» определяется точкой пересечения луча - проведенного из центра вала направляющего шкива под углом 45° - с линией опирания подошвы подшипника см. рис 5б.

Для зоны местных напряжений «A2» выполнена оценка степени влияния конструктивных и технологических факторов (см. табл.2) на параметры напряженного состояния в стенке узла опирания направляющего шкива приведенная в табл. 5.

Из вышеприведенной таблицы и графика видно, что наибольшее влияние на напряженное состояние зоны «A2» оказывают технологические факторы: величина равнодействующей – 270...293%, угол наклона струны каната к горизонту – 32...36% и конструктивный фактор толщина стенки узла опирания шкива – 19...26%. Технологический фактор смещение с оси подшипника шкива – 8...10% и конструктивный фактор толщина полки узла опирания шкива – 2.2...6.4% оказывают меньшее влияние.

Анализируя результаты влияния конструктивных и технологических факторов для зоны местных напряжений «A2» составлен план факторного эксперимента [6] и приведенный в табл. 6.

Таблица 5.

Степень влияния конструктивных и технологических факторов на напряжённое состояние в зоне «А2»

| Тип подшкивной конструкции | Фактор | Значение | Значение | $\frac{ \sigma_{\text{max}}^{\text{плк}} - \sigma_{\text{ос нижн}}^{\text{плк}} }{\sigma_{\text{ос верх}}^{\text{плк}} \times 100\% / \sigma_{\text{ос нижн}}^{\text{плк}}}$ |
|------------------------------------|---|--|---|--|
| | | $\sigma_{\text{ос нижн}}^{\text{плк}}$ МПа при нижнем уровне фактора | $\sigma_{\text{ос верх}}^{\text{плк}}$ МПа при верхнем уровне фактора | |
| Шагровой скиповый копер | Величина равнодействующей | 139.8 | 536.4 | 283.69 |
| | Угол наклона каната к горизонту, градус | 120.1 | 160.5 | 33.64 |
| | Толщина стенки | 97.9 | 76.2 | 22.17 |
| | Смещение оси подшипника | 110.92 | 121.9 | 9.90 |
| | Толщина полки | 112.1 | 106.5 | 5.00 |
| Полушагровой скиповый копер | Величина равнодействующей | 88.24 | 326.22 | 269.70 |
| | Угол наклона каната к горизонту | 88.24 | 118 | 33.73 |
| | Толщина стенки | 88.24 | 65.51 | 25.76 |
| | Смещение оси подшипника | 88.24 | 98.11 | 11.19 |
| | Толщина полки | 88.24 | 86.32 | 2.18 |
| Полушагровой клетевой копер | Величина равнодействующей | 72.37 | 278.22 | 284.44 |
| | Угол наклона каната к горизонту | 72.37 | 98.11 | 35.57 |
| | Толщина стенки | 72.37 | 55.51 | 23.30 |
| | Смещение оси подшипника | 72.37 | 79.1 | 9.30 |
| | Толщина полки | 72.37 | 69.3 | 4.24 |
| Комбинированный полушагровой копер | Величина равнодействующей | 40.4 | 158.6 | 292.57 |
| | Угол наклона каната к горизонту | 40.4 | 53.4 | 32.18 |
| | Толщина стенки | 40.4 | 32.9 | 18.56 |
| | Смещение оси подшипника | 40.4 | 43.43 | 7.50 |
| | Толщина полки | 40.4 | 37.8 | 6.44 |

Таблица 6.

План факторного эксперимента

| ФАКТОРЫ | Уровни факторов | | |
|--|-------------------|---------------------------|---------------|
| | -1 | 0 | 1 |
| x1 – Величина равнодействующей, т | Рабочее натяжение | Двойное рабочее натяжение | Разрыв каната |
| x2 – Угол наклона каната к горизонту, градус | 35.0 | 50.0 | 65.0 |
| x3 – Толщина стенки, мм | 12.0 | 18.5 | 25.0 |

Дробная матрица планирования 2^{5-2} приведена в табл. 7.

Таблица 7.

Дробная матрица планирования 2^{5-2}

| | i | x0 | x1 | x2 | x3 | x4=x1x3 | x5=x2x3 | Y |
|----------------------------------|----|----|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| Дробный факторный план 2^{5-2} | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 147.6 |
| | 2 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 541.3 |
| | 3 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 83.8 |
| | 4 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 255.8 |
| | 5 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 79.04 |
| | 6 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 510.1 |
| | 7 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 105.91 |
| | 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 321.62 |
| Звездные точки 2^n | 9 | 1 | -1.215 | 0 | 0 | 0 | 0 | 116.5 |
| | 10 | 1 | 1.215 | 0 | 0 | 0 | 0 | 451.6 |
| | 11 | 1 | 0 | -1.215 | 0 | 0 | 0 | 157.2 |
| | 12 | 1 | 0 | 1.215 | 0 | 0 | 0 | 388.7 |
| | 13 | 1 | 0 | 0 | -1.215 | 0 | 0 | 306.3 |
| | 14 | 1 | 0 | 0 | 1.215 | 0 | 0 | 147.8 |
| Ц. плана | 15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 174.6 |

По результатам факторного эксперимента получена регрессионная зависимость:

$$\sigma_{loc}(x_1, x_2, x_3) = 232.471 + 142.896 \frac{x_1 - 1796305}{1183695} + 39.531 \frac{x_2 - 50}{15} - 81.145 \frac{x_3 - 18.5}{6.5} + 22.032 \left(\frac{x_1 - 1796305}{1183695} \right)^2 +$$

$$+ 19.382 \left(\frac{x_2 - 50}{15} \right)^2 - 16.541 \left(\frac{x_3 - 18.5}{6.5} \right)^2 + 6.985 \left(\frac{x_1 - 1796305}{1183695} \right) \left(\frac{x_2 - 50}{15} \right) - 44.848 \left(\frac{x_1 - 1796305}{1183695} \right) \left(\frac{x_3 - 18.5}{6.5} \right) +$$

$$+ 8.265 \left(\frac{x_2 - 50}{15} \right) \left(\frac{x_3 - 18.5}{6.5} \right) - 8.572 \cdot 10^{-3} \left(\frac{x_1 - 1796305}{1183695} \right) \left(\frac{x_2 - 50}{15} \right) \left(\frac{x_3 - 18.5}{6.5} \right) [МПа]$$

где: x_1 – Величина равнодействующей от натяжения каната, Н; x_2 – Угол наклона каната к горизонту, градус; x_3 – Толщина стенки, мм

Сравнение результатов регрессионной зависимости $\sigma_{loc}(x_1, x_2, x_3)$ с результатами численного моделирования в среде программного комплекса «Ansys Workbench 14.0» представлены в табл. 8.

Таблица 8.

Сравнение результатов регрессионной зависимости $\sigma_{loc}(x_1, x_2, x_3)$ с результатами численного моделирования в среде программного комплекса «Ansys Workbench 14.0»

| № п/п | Результаты регрессионной зависимости $\sigma_{loc}(x_1, x_2, x_3)$, МПа | Результаты численного моделирования σ_{loc} , МПа | Расхождение, % |
|-------|--|--|----------------|
| 1 | 147.63 | 126.47 | 14 |
| 2 | 543.82 | 564.49 | 4 |
| 3 | 43.95 | 37.33 | 15 |
| 4 | 232.57 | 219.48 | 6 |
| 5 | 82.88 | 71.2768 | 14 |
| 6 | 510.01 | 487.97 | 4 |
| 7 | 147.87 | 175.02 | 18 |
| 8 | 293.81 | 329.02 | 12 |
| 9 | 116.45 | 111.61 | 4 |
| 10 | 451.58 | 397.4 | 12 |
| 11 | 157.16 | 152.34 | 3 |
| 12 | 403.04 | 346.6144 | 14 |
| 13 | 306.3 | 272.607 | 11 |
| 14 | 147.77 | 122.6491 | 17 |
| 15 | 174.58 | 169.15 | 3 |

Выводы:

1. В зоне местных напряжений в стенке узла опирания подшипника шкива «А2» напряжённое состояние близко к линейному ($\sigma_{max1}/\sigma_{max2}=0.001$).

2. В отличии от традиционных представлений, наиболее напряжённая точка в зоне «А2» находится не на пересечении линии действия равнодействующей от натяжения подъёмного каната, а смещена к переднему упору см. рис. 5б.

3. Положение наиболее напряженной точки зоны максимальных местных напряжений «А2» при различных параметрах равнодействующей не зависит от угла наклона равнодействующей натяжения подъёмного каната.

4. Наиболее напряжённая точка в зоне «А2» определяется следующим образом: а) из центра вала направляющего шкива опускается луч под углом 45 градусов к вертикали, б) точка максимальных местных напряжений определяется пересечением указанного луча с линией опирания подошвы подшипника см. рис. 5б.

5. Выявлено следующее влияние на напряжённое состояние зоны «А2» конструктивных и технологических факторов: величина равнодействующей – 270...293%; угол наклона струны каната к горизонту – 32...36%; толщина стенки узла опирания шкива – 19...26%; смещение с оси подшипника шкива – 8...10%; толщина полки узла опирания шкива – 2.2...6.4%.

6. Установлена зависимость локальных напряжений в стенке узла опирания шкива в зависимости от величины равнодействующей, угла наклона струны каната к горизонту и толщины стенки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ВСН 46-75. Инструкция по определению нагрузок на здания и сооружения угольной промышленности. Донецк 1977. - 89 с.
2. РД 12.005-94. Металлические конструкции шахтных копров. Требования к эксплуатации. К.: Госуглепром Украины, 1994. — 68с.
3. Инструкция по определению нагрузок на здания и сооружения угольной промышленности. Донецк 1977. - 89 с.
4. Указания по определению нормативных нагрузок и коэффициентов перегрузки для надшахтных зданий и сооружений предприятий угольной промышленности. К.: Будівельник, 1964. - 81с.
5. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1968. – 155с.
6. Бровман Я.В. Надшахтные копры. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 239 с.
7. Горохов Е. В. Анализ причин возникновения аварий на сооружениях шахтной поверхности / Е. В. Горохов, В. Н. Куценко, П. Е. Куличенко // Будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Київ, 2000. – Вип. 2000-1 (21). – 2000. – С. 3–11. ВСН 46-75.
8. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Буряка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. Гос. Техн. Ун-т, 2010. – 271 с.:ил.
9. Куценко В.Н., Нечитайло А.Е. Анализ усталостной прочности конструкций рамных шахтных копров//Металеві конструкції. — Т.18. — №3. — Київ, 2011. — С.171-183.
10. Куценко В.Н., Нечитайло А.Е. Анализ напряженно-деформированного состояния узлов опирания направляющих шкивов на подпквивные конструкции шахтного укосного копра//Металеві конструкції. — Т.18. — №2. — Київ, 2012. — С.97-109.
11. Куценко В.Н., Нечитайло А.Е. Анализ напряженно-деформированного состояния основных несущих элементов рамных укосных шахтных копров//Металеві конструкції. — Т.17. — №3. — Київ, 2011. — С.151-165.
12. Куценко В. Н., Кострицкий А. С. Экспериментальное исследование динамического поведения конструкций шахтных копров. Вісник ДДАБА 2003-2 (39). Том 2 Будівельні споруди: матеріали, конструкції, технологи - С. 46-52.
13. Розенблит, Г. Л. Стальные конструкции зданий и сооружений угольной промышленности [Текст] / Г. Л. Розенблит. – М. : Углетехиздат,