

УДК 622.258.3

С.Г. Страданченко, А.Ю. Прокопов, К.Э. Ткачева

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ЖЕСТКУЮ АРМИРОВКУ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

Предложен вероятностный подход к расчету параметров жесткой армировки вертикальных стволов, учитывающий действие дополнительных временных нагрузок. Рассмотрены нагрузки от силы Кориолиса, аэродинамического удара в месте встречи подъемных сосудов, нагрузки вследствие кручения подъемного каната; нагрузки вследствие одновременного влияния эксцентриситета загрузки и отклонения подъемного сосуда от вертикали. Разработана методика вероятностной оценки возможных сочетаний этих нагрузок, а также возможности их одновременного возникновения на одном участке ствола.

Ключевые слова: сила Кориолиса, аэродинамический удар, подъемный канат.

В настоящее время расчет параметров жесткой армировки производится на действие основных динамических нагрузок, возникающих вследствие горизонтальных колебаний сосуда, движущегося с постоянной скоростью по проводникам с периодически изменяющейся поперечной жесткостью. Остальные нагрузки считаются второстепенными и их величиной пренебрегают или учитывают некоторым коэффициентом запаса. Такой подход является формальным и может привести к ошибкам при определении параметров жесткой армировки глубоких стволов, характеризующихся сложным взаимодействием системы «подъемный сосуд — армировка — крепь ствола».

В диссертационных исследованиях А.Ю. Прокопова [1] предлагается новый подход к проектированию жесткой армировки глубоких стволов, согласно которому эксплуатационные (лобовая и боковая) нагрузки на армировку рассчитываются по формулам, учитывающим действие ряда дополнительных факторов (силы Кориолиса, аэродинамический удар в

месте встречи подъемных сосудов, нагрузку вследствие кручения подъемного каната; нагрузку вследствие одновременного влияния эксцентриситета загрузки и отклонения подъемного сосуда от вертикали и др.)

Предложенный подход, несмотря на определенные достоинства, связанные с появлением возможности учета целого ряда дополнительных факторов, действующих в системе «подъемный сосуд — армировка — крепь ствола», обладает недостатком, заключающимся в допущении одновременного влияния на армировку всех вышеперечисленных факторов, при чем в варианте их наиболее неблагоприятного сочетания. Такая формализация при проектировании в ряде случаев приводит к чрезмерно завышенным коэффициентам запаса при подборе профилей расстрелов, проводников, узлов крепления и других параметров жесткой армировки, так как условно считается, что все дополнительные нагрузки возникнут на одном ярусе в один и тот же момент времени и при этом их векторы

будут однонаправлены, т.е. нагрузки суммируются по модулю. Несмотря на то, что теоретически такое сложение нагрузок на одном ярусе возможно, вероятность возникновения такой ситуации на практике очень низка, поэтому предлагается усовершенствовать указанную методику на основе вероятностной оценки возможных сочетаний вышеуказанных нагрузок [2].

Для этого произведем оценку вероятности появления каждой из временных динамических нагрузок, а затем вероятность их одновременного возникновения на одном ярусе или участке движения подъемного сосуда.

Сила Кориолиса на разных участках ствола зависит от кинематики подъема, при этом наибольшее ее значение наблюдается в точке, соответствующей моменту окончания равноускоренного движения после набора грузным подъемным сосудом максимальной скорости своего движения. Данный момент времени от начала движения скипа определится формулой:

$$t_{\max}^{\text{кор}} = \frac{V'}{a_1} + \frac{V_{\max} - V'}{a_2},$$

где $t_{\max}^{\text{кор}}$ — момент времени от начала движения грузного скипа, на который приходится максимальное значение силы Кориолиса, с; V', V_{\max} — скорость грузного скипа при выходе из загрузочных кривых и максимальная скорость его движения соответственно, м/с; a_1, a_2 — ускорение скипа при выходе из загрузочных кривых и ускорение скипа до набора максимальной скорости соответственно, м/с².

Координата точки относительно начала движения грузного скипа, на которую приходится максимальное значение силы Кориолиса, определится из выражения

$$h_{\max}^{\text{кор}} = \frac{V'^2}{2a_1} + \frac{V_{\max}^2 - V'^2}{2a_2}.$$

Проведенные исследования позволяют заключить, что учет влияния силы Кориолиса на армировку целесообразен только для среднего интервала ствола ($h_{\text{н}}, h_{\text{в}}$), по которому подъемный сосуд движется с максимальной скоростью. Границы этого интервала по глубине:

- нижняя $h_{\text{н}} = h_{\max}^{\text{кор}} = \frac{V'^2}{2a_1} + \frac{V_{\max}^2 - V'^2}{2a_2}$;
- верхняя $h_{\text{в}} = H_{\text{п}} - \left(\frac{V''^2}{2a_4} + \frac{V_{\max}^2 - V''^2}{2a_3} \right)$,

где $H_{\text{п}}$ — полная высота подъема, м; V'' — скорость грузного скипа при входе в разгрузочные кривые, м/с; a_4, a_3 — замедление скипа при входе в разгрузочные кривые и замедление скипа от максимальной скорости до V'' соответственно, м/с².

Для интервалов подъема $(0, h_{\text{н}})$ и $(h_{\text{в}}, H_{\text{п}})$ влиянием силы Кориолиса можно пренебречь.

Аэродинамический удар в месте встречи сосудов. В случае применения в стволе одной подъемной установки место встречи подъемных сосудов и соответственно аэродинамической ударной нагрузки на армировку ограничится коротким средним по глубине участком ствола. Найдем координаты возможной встречи подъемных сосудов и номера ярусов армировки, на которые придется аэродинамический удар.

Расчетная схема к определению этих координат приведена на рис. 1, из которого следует, что координата точки максимальной нагрузки на армировку вследствие аэродинамического удара в месте встречи подъемных сосудов определится из выражения

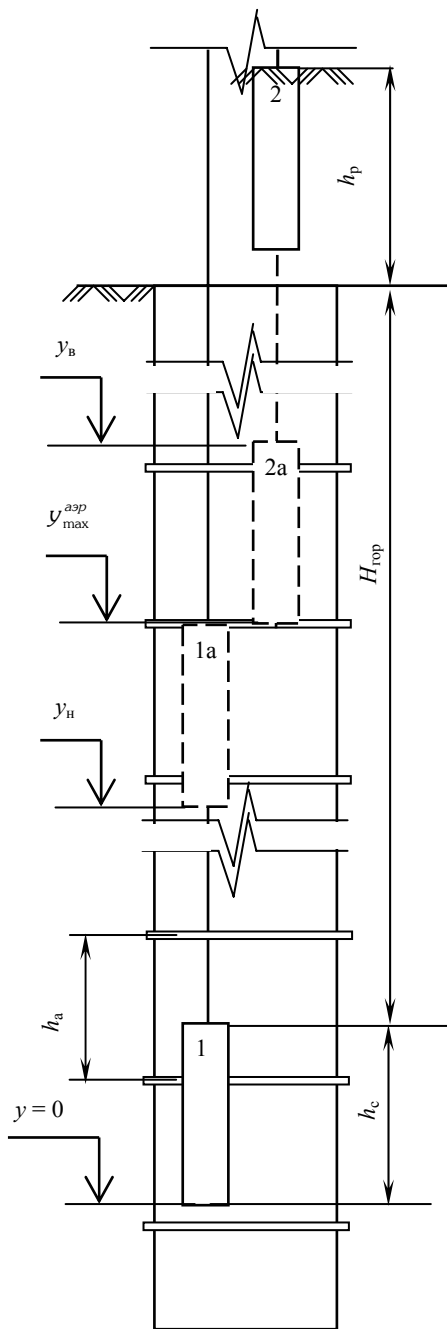


Рис. 1. Схема к определению координат участка действия на армировку ударных аэродинамических нагрузок от встречного движения подъемных сосудов: h_p — высота разгрузки скипа от-

носительно нулевой рамы, м, (характеризует верхнюю точку возможного нахождения скипов); $H_{гор}$ — глубина загрузки скипа относительно нулевой рамы, м, (определяет положение нижней точки возможного нахождения скипов, имеющей координату $y = 0$); h_c — высота скипа (по раме), м; h_a — шаг армировки, м; y_{max}^{aep} — координата точки максимальной нагрузки на армировку вследствие аэродинамического удара в месте встречи подъемных сосудов; $y_в, y_н$ — координаты, определяющие соответственно верхнюю и нижнюю границы участка аэродинамического взаимодействия подъемных сосудов; 1, 2 — положения скипов в крайних нижней и верхней точках системы подъема; 1a, 2a — положения скипов в момент начала аэродинамического взаимодействия

$$y_{max}^{aep} = \frac{H_{гор} + h_p}{2}.$$

Эта координата будет соответствовать той точке, в которой точно совпадет положение скипов по глубине. Однако, учитывая высоту подъемных сосудов, которая для большегрузных скипов достигает 14 — 16 м и более, необходимо выделить не точку, а интервал их взаимодействия, который будет занимать в зависимости от шага армировки, несколько ее ярусов. Именно эти ярусы при проектировании армировки и будет необходимо рассчитывать на ударную аэродинамическую нагрузку.

Верхняя $y_в$ и нижняя координаты, ограничивающие интервал аэродинамического взаимодействия скипов, определяются по формулам

$$y_в = \frac{H_{гор} + h_p}{2} + h_c$$

$$\text{и } y_н = \frac{H_{гор} + h_p}{2} - h_c.$$

Определим номера ярусов армировки n (считая вниз от нулевой рамы), которые должны рассчитываться на аэродинамические нагрузки. Номера этих ярусов должны удовлетворять условию

$$n_{\text{яр.в}} \leq n_{\text{яр}} \leq n_{\text{яр.н}},$$

где $n_{\text{яр.в}}$, $n_{\text{яр.н}}$ — номера соответственно верхнего и нижнего ярусов, ограничивающих интервал ($y_{\text{в}}$, $y_{\text{н}}$),

$$n_{\text{яр.в}} = \frac{\frac{H_{\text{гор}}}{2} - h_{\text{с}}}{h_{\text{а}}} = \frac{H_{\text{гор}} - 2h_{\text{с}}}{2h_{\text{а}}};$$

$$n_{\text{яр.н}} = \frac{\frac{H_{\text{гор}}}{2} + h_{\text{с}}}{h_{\text{а}}} = \frac{H_{\text{гор}} + 2h_{\text{с}}}{2h_{\text{а}}}.$$

Общее количество ярусов $N_{\text{яр}}$, приходящихся на интервал аэродинамического взаимодействия скипов, будет зависеть от высоты скипов и шага армировки и определяться из соотношения $N_{\text{яр}} = \frac{2h_{\text{с}}}{h_{\text{а}}} + 1$. Количество ярусов армировки, подвергаемых аэродинамическому воздействию колеблется от 3 — 5 при использовании скипов малых типоразмеров (10—12 т) до 7 — 13 (в зависимости от шага армировки) — при более грузных скипах (60 — 100 т).

В случае использования в одном стволе двух подъемных установок, работающих на загрузку, выдачу и разгрузку горной массы независимо друг от друга, место (участок) их встречи будет случайным, и может быть охарактеризован только с помощью понятий, теорем и аксиом теории вероятностей.

Вероятности нахождения скипа в конкретный момент времени на каждом из характерных участков движения равны:

- на загрузке (разгрузке) $P_{\text{загр}} = \frac{t_{\text{загр}}}{t_{\text{общ}}}$;

- на выходе или на входе в разгрузочные кривые $P_{\text{вых(вх)}} = \frac{t_{\text{вых}} + t_{\text{вх}}}{t_{\text{общ}}}$;

- на участках ускоренного или замедленного движения $P_{\text{уск(зам)}} = \frac{t_{\text{уск}} + t_{\text{зам}}}{t_{\text{общ}}}$;

- на участке движения с максимальной скоростью $P_{\text{равн}} = \frac{t_{\text{равн}}}{t_{\text{общ}}}$.

Максимальное влияние на перераспределение вероятностей нахождения скипа на том или ином периоде цикла подъема оказывают (в порядке убывания значимости влияния):

- глубина подъема (в рассматриваемых пределах от 400 до 1200 м);
- вместимость скипа (в пределах от 5 до 60 м³);
- максимальная скорость (в пределах от 6 до 20 м/с).

Ускорение сосудов существенно не влияет, так как при его увеличении в глубоких стволах более чем в 3 раза, происходит небольшое изменение (в пределах 10 %) вероятности нахождения скипа в ускоренном и равномерном периодах движения, вероятность же остальных периодов не изменяется.

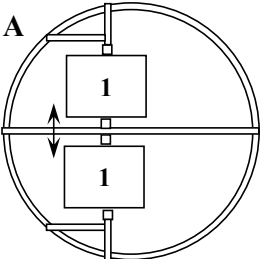
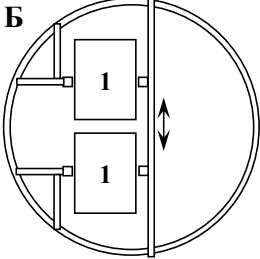
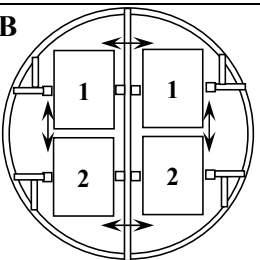
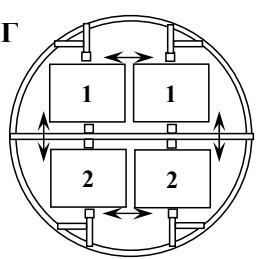
С учетом вышеизложенного были построены номограммы (для различных максимальных скоростей подъема — 10, 12, 15 и 20 м/с), определяющие вероятности нахождения скипов на каждом из периодов подъема, при этом в качестве входных параметров номограмм приняты глубина подъема по стволам и вместимость скипов. Из номограмм, кроме искомым вероятностей, вытекают следующие рекомендуемые минимальные глубины подъема $H_{\text{мин}}$ для соответствующих максимальных скоростей V_{max} :

- для $V_{\text{max}} = 10$ м/с — $H_{\text{мин}} = 250$ м;
- для $V_{\text{max}} = 12$ м/с — $H_{\text{мин}} = 350$ м;
- для $V_{\text{max}} = 15$ м/с — $H_{\text{мин}} = 500$ м;
- для $V_{\text{max}} = 20$ м/с — $H_{\text{мин}} = 900$ м.

В зависимости от схемы армировки, количества и взаимного расположения

Таблица 1

Координаты возникновения аэродинамического удара и его вероятность в лобовом и боковом направлениях при различном расположении скипов

Схема армировки	Координаты границ участка возникновения максимального аэродинамического удара ¹ , м	Вероятность возникновения аэродинамического удара на участке с максимальной скоростью движения скипов	
		В лобовом направлении	В боковом направлении
Для одной подъемной установки с двумя взаимосвязанными скипами			
<p>А</p> 	$y_{\text{в}} = \frac{H_{\text{гор}} + h_{\text{п}}}{2} + h_{\text{с}}$ $y_{\text{н}} = \frac{H_{\text{гор}} + h_{\text{п}}}{2} - h_{\text{с}}$	1	0
<p>Б</p> 	$y_{\text{в}} = \frac{H_{\text{гор}} + h_{\text{п}}}{2} + h_{\text{с}}$ и $y_{\text{н}} = \frac{H_{\text{гор}} + h_{\text{п}}}{2} - h_{\text{с}}$	0	1
Для двух независимых подъемных установок			
<p>В</p> 	<p>Взаимодействие скипов 1-1 и 2-2 аналогично схеме А Взаимодействие каждой пары скипов 1-2</p> $y_{\text{в}} = H - h_{\text{п}} - \frac{V_{\text{max}}^2 - (V'')^2}{a_3}$ $y_{\text{н}} = h_{\text{п}} + \frac{V_{\text{max}}^2 - (V')^2}{a_2}$	1 0	0 Определяется по номограммам в зависимости от глубины H , скорости V_{max} и вместимости скипа $W_{\text{с}}$
<p>Г</p> 	<p>Взаимодействие скипов 1-1 и 2-2 аналогично схеме Б Взаимодействие каждой пары скипов 1-2</p> $y_{\text{в}} = H - h_{\text{п}} - \frac{V_{\text{max}}^2 - (V'')^2}{a_3}$ $y_{\text{н}} = h_{\text{п}} + \frac{V_{\text{max}}^2 - (V')^2}{a_2}$	0 0	1 0 Определяется по номограммам в зависимости от глубины H , скорости V_{max} и вместимости скипа $W_{\text{с}}$
<p><i>Примечания.</i> ¹ — координата относительно нижней приемной площадки. Номера скипов соответствуют номеру подъемной установки. Двусторонними стрелками на сечениях стволов показаны возможные направления аэродинамических ударов при встрече сосудов.</p>			

подъемных установок возможны различные варианты аэродинамического взаимодействия скипов в стволе. В табл. 1 приведены возможные сочетания схем армировки с вариантами расположения подъемных сосудов, а также указаны формулы для определения координат максимального аэродинамического удара в местах возможной встречи сосудов и приведена вероятность возникновения лобовых и боковых нагрузок для каждого из сочетаний.

Моменты, передаваемые от кручения подъемных канатов. Наибольшая нагрузка на армировку вследствие вращающего момента от кручения подъемного каната будет возникать на участке движения груженого скипа с ускорением. Координаты этого участка определяются по формулам:

- нижняя граница $y_n = h_c$;
- верхняя граница

$$y_{\text{в}} = h_{\text{вск}} = \frac{V_{\text{max}}^2 - (V')^2}{a_2}.$$

Вероятность того, что из n канатов многоканатной подъемной установки будут передавать при растягивании вращающий момент на подъемный сосуд по часовой стрелке k канатов, а против часовой стрелки соответственно $n - k$ канатов, по теореме умножения вероятностей независимых событий равна $p^k q^{n-k}$, где p и q — соответственно вероятности кручения канатов по и против часовой стрелки, в рассматриваемом случае $p = q = 0,5$.

Таких вариантов может быть столько, сколько можно составить сочетаний из n элементов по k элементов, т.е. C_n^k . Так как рассматриваемые события (кручение каждого из канатов) независимы, то по теореме сложения вероятностей независимых событий искомая вероятность равна

сумме вероятностей всех возможных событий. Поскольку же вероятности этих событий одинаковы, то искомая вероятность (появления k раз события A в n испытаниях) равна вероятности одного события, умноженной на их число, т.е. для рассматриваемого случая применима формула Бернулли

$$P_n(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k}.$$

Исходя из рассчитанных вероятностей возможных сочетаний направленностей вращающих моментов канатов и значений результирующих моментов при каждом возможном сочетании, определим значение коэффициента результирующего момента c_p для разного числа (от 1 до 8) подъемных канатов по формуле:

$$c_{pn} = \sum_{i=1}^n M_i P_n(i),$$

где n — количество канатов в многоканатной подъемной установке; M_i — относительный результирующий вращающий момент, возникаемый при i -том сочетании направленностей кручения канатов (является безразмерной величиной и показывает какая доля вращающего момента передается на скип при данном сочетании. За единицу принимается момент, создаваемый при однонаправленном кручении всех канатов подъемной установки); $P_n(i)$ — вероятность появления i -го сочетания направленностей кручения n канатов.

Коэффициент результирующего момента при увеличении числа подъемных канатов от 1 до 8 изменяется от 1 до 0,273.

Вертикальная нагрузка на проводники вследствие отклонения подъемного сосуда от проектной траектории движения обусловлена неизбежными отклонениями элементов армировки от проектного положения. Фактически

Таблица 2

Показатели вариации по вариационным рядам отклонений проводников

Показатель вариации	Значения показателя для вариационного ряда	
	Абсолютных отклонений проводников	Отклонений проводников на смежных ярусах
Размах вариации, мм	75	22
Среднее арифметическое, мм	30,8	6,8
Дисперсия, мм ²	330,6	15,9
Среднее квадратическое отклонение, мм	18,2	4,0
Коэффициент вариации	59,1	58,8

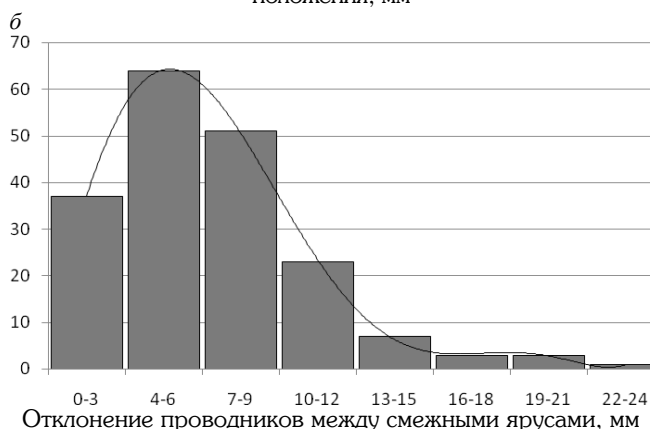


Рис. 2. Гистограммы и теоретические кривые распределения: а — абсолютных отклонений проводников от проектного положения; б — отклонений проводников между смежными ярусами

с увеличением продолжительности эксплуатации проводников средняя

величина их отклонения от вертикали значительно увеличивается и в ряде случаев превышает нормативную.

В результате статистической обработки результатов 190 измерений были получены гистограммы распределения абсолютных отклонений проводников от вертикали (рис. 2, а) и отклонений проводников между смежными ярусами (рис. 2, б), показатели вариации по этим вариационным рядам представлены в табл. 2.

Обработка результатов профилировок армировки стволов Донбасса свидетельствует о том, что в 22 случаях из 190 замеров (11,6 %) отклонения проводников на соседних ярусах превышали нормативную величину (10 мм), допускаемую на период длительной эксплуатации.

В связи с этим при расчете дополнительных вертикальных сил на проводники жесткой армировки необходимо учитывать фактическое, а не нормативное отклонение проводников от проектного

положения, которое увеличивается со временем эксплуатации подъема. Исходя из вышеприведенных исследований, предлагается расчет возможного угла отклонения скипа от вертикали α производить после профилировки проводников на основе их среднего фактического отклонения между смежными ярусами с учетом доверительного интервала для заданной доверительной вероятности.

Таким образом, предложенный подход к проектированию жесткой армировки позволяет на основе вероятностной оценки временных нагрузок на конструкции, в результате изучения особенностей взаимодействия системы «подъемный сосуд — армировка — крепь ствола» научно обосновывать параметры армировки и разрабатывать технологию армирования глубоких вертикальных стволов шахт и рудников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопов А.Ю. Обоснование технологических и конструктивных решений по армированию глубоких вертикальных стволов: Дисс... д-ра техн. наук. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. — 345 с.

2. Страданченко С.Г., Прокопов А.Ю., Басакевич С.В. Вероятностная оценка соче-

таний эксплуатационных нагрузок на жесткую армировку глубоких стволов// Перспективные технологии добычи и использования углей Донбасса: материалы Междунар. науч. — практ. семинара. — Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2009. — С. 108 — 113. **ПДАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Страданченко Сергей Георгиевич — доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАЕН, директор Шахтинского института (филиала) Южно-Российский государственный технический университет, заведующий кафедрой «Подземное, промышленное, гражданское строительство и строительные материалы», e-mail: ssg72@mail.ru,

Прокопов Альберт Юрьевич — доктор технических наук, заместитель директора Шахтинского института (филиала) Южно-Российский государственный технический университет по образовательной деятельности, профессор, иностранный член Академии строительства Украины, e-mail: prokоров72@rambler.ru,

Ткачева Карина Эдуардовна — аспирант, ассистент кафедры «Подземное, промышленное, гражданское строительство и строительные материалы» Шахтинского института (филиала) Южно-Российский государственный технический университет, e-mail: karinatkacheva@mail.ru.



ПРЕСС-СЛУЖБЫ ПРЕДПРИЯТИЙ СООБЩАЮТ

Специалистами ООО «Уралмаш НГО Холдинг» и ОАО «НОВАТЭК» разработана буровая установка «Уралмаш 6000/400 ЭК-БМЧ» («Арктика»). Она представляет собой двухэшелонный буровой комплекс, предназначенный для кустового бурения скважин глубиной до 6000 м.