

УДК 622.258.3

К вопросу о методике расчета жестких армировок вертикальных стволов, оборудованных высокопроизводительным скиповым подъемом

Прокопов А. Ю.¹, Борщевский С. В.², Формос В. Ф.², Суржко И. А.²

¹Шахтинский институт (филиал) ЮРГТУ (НПИ), Шахты, Россия

²Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Аннотация

Приведен алгоритм расчета жестких армировок вертикальных стволов, принятый в действующих нормативных документах. Исследовано увеличение нагрузок на армировку при использовании высокопроизводительных подъемных установок. Предложены дополнения к действующей методике, учитывающие режим работы армировки в стволах с высокой интенсивностью подъема.

В настоящее время проектирование жестких армировок вертикальных стволов осуществляется в соответствии с «Методикой расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт» [1], и разработанного на его основе приложения к СНиП II-94-80 – «Пособия по проектированию и монтажу жесткой армировки вертикальных стволов шахт и рудников» [2]. Эти нормативные документы действуют до настоящего времени.

В соответствии с указанными документами основными нагрузками на армировку являются горизонтальные лобовая и боковая силы, действующие со стороны движущегося подъемного сосуда. Остальные же нагрузки и воздействия считаются второстепенными и их величиной пренебрегают, так как они учитываются коэффициентами запаса при определении нагрузок от подъемных сосудов.

Расчет армировки на горизонтальные эксплуатационные нагрузки заключается в определении сечений основных элементов (проводников, расстрелов) и шага армировки, которые рассчитывается по двум предельным состояниям:

а) *первой группы*, наступающим в результате потери несущей способности элементов армировки из-за разрушения при силовом воздействии с учетом неблагоприятного влияния внешней среды (коррозионного и механического износа) или потери устойчивости движения подъемных сосудов при возникновении резонансных колебаний;

б) *второй группы*, наступающими в результате непригодности конструкций к нормальной эксплуатации по технологическим условиям, из-за появления недопустимых прогибов армировки и колебаний подъемного сосуда.

В соответствии с действующими нормативными документами [1, 2] горизонтальная сила на проводник в лобовом (боковом) направлении со стороны движущегося подъемного сосуда определяется формулой

$$P^{л(б)} = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot \delta \cdot K_p^2 \cdot (m \cdot V^2)}{h^2} \cdot n^{л(б)}, \quad (1)$$

где δ – зазор на сторону между рабочими или предохранительными направляющими скольжения и проводником; K_p – коэффициент влияния типа рабочих направляющих подъемного сосуда, $K_p = 1,0$ при жестких направляющих скольжения, $K_p = 0,85$ – при упругих роликовых направляющих; mV^2 – интенсивность подъема, Дж; m и V – соответственно масса, кг, и скорость, м/с, грузевого подъемного сосуда; h – шаг армировки, м; $n^{л(б)}$ – коэффициент, определяемый по [1] в зависимости от значений эксцентриситета центра масс грузевого сосуда, искривления и логарифма жесткости проводников.

Как следует из формулы (1), решающее значение в формировании нагрузки на армировку, а следовательно и ее параметров (схемы, конструкции, профилей), играет интенсивность подъема, которая, как правило, не превышает для типовых схем скиповых подъемов 6–8 МДж.

В настоящее время в связи с необходимостью интенсификации добычных работ прогнозируется увеличение скоростей подъема до 20 м/с, концевых нагрузок до 100 т, глубины и диаметра стволов. В связи с этим интенсивность подъема, а следовательно и нагрузка на армировку возрастает в 4–6 раз относительно ныне действующих [3]. Кроме того, следует ожидать значительное возрастание влияния статических нагрузок от собственного веса конструкции армировки и временных нагрузок, связанных с аэродинамическими воздействиями на подъемные сосуды, эксцентриситетом загрузки сосудов, качеством монтажа конструкций, заделки концов расстрелов в крепь, влияния активного горного давления и др.

В результате прогнозируемого увеличения интенсивности скиповых подъемов в среднем от 6–10 МДж до 40 МДж и более потребуются совершенствование действующей методики расчета жесткой армировки [1] путем включения в расчет ряда дополнительных усилий и воздействий на армировку.

Оценим изменение дополнительных нагрузок на армировку, которые в действующей нормативной базе считаются второстепенными и не учитываются, при увеличении интенсивности подъема. К таким нагрузкам относятся нижеперечисленные силы.

1. *Кориолисова сила* P_k . Она является результатом сложного движения подъемного сосуда по стволу, состоящего из движения относительно собственно ствола с некоторой скоростью V_c и переносного движения, возникающего вследствие суточного вращения Земли с угловой скоростью $\omega = \frac{2\pi}{24 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{1}{13700}$, 1/с.

При таком движении подъемный сосуд испытывает дополнительное (кориолисово) ускорение, которое определяется по формуле

$$\bar{\omega}_c = 2 \cdot \bar{\omega} \cdot \bar{V}_c,$$

где $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли, направленный вдоль ее оси в сторону северного полюса; \bar{V}_c – вектор скорости движения подъемного сосуда относительно ствола.

Вектор $\bar{\omega}$ направлен по касательной, соответствующей параллели Земли на запад и его абсолютная величина может быть определена по формуле

$$|\bar{\omega}'| = \omega_c = 2\omega V_c \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) = 2\omega V_c \cos\varphi,$$

где φ – географическая широта места расположения ствола.

Кориолисова сила инерции направлена по касательной к параллели на восток. Величина этой силы определяется по формуле

$$P_k = \frac{2Q_k \omega V_c}{g} \cos\varphi.$$

Обозначив $k_k = \frac{2\omega}{g} \cos\varphi$, получим

$$P_k = k_k Q_k V_c,$$

где k_k – коэффициент, учитывающий географическую широту места расположения шахты, угловую скорость вращения Земли и ускорение силы тяжести, с/м, для условий Российского Донбасса (географическая широта 48°) $k_k = 1 \cdot 10^{-5}$ с/м;

Q_k – концевая нагрузка, кН.

Определим величину P_k для стволов с различной интенсивностью подъема. Графики зависимости кориолисовой силы инерции от массы и скорости движения скипа показаны на рис. 1. Как видно, при максимальной интенсивности подъема возникает дополнительная сила на армировку величиной 2 кН, что сравнимо с действующими в настоящее время основными нагрузками на армировку, и пренебрегать такой величиной будет недопустимо.

2. *Аэродинамическая сила* P_a , действующая на подъемный сосуд в результате его взаимодействия с воздушной струей. Ее величина зависит от скорости движения подъемного сосуда, скорости движения воздушной струи, расположения подъемного сосуда в стволе и др.

факторов. Схема к определению горизонтальной составляющей аэродинамических сил на подъемный сосуд и армировку приведена на рис. 2.

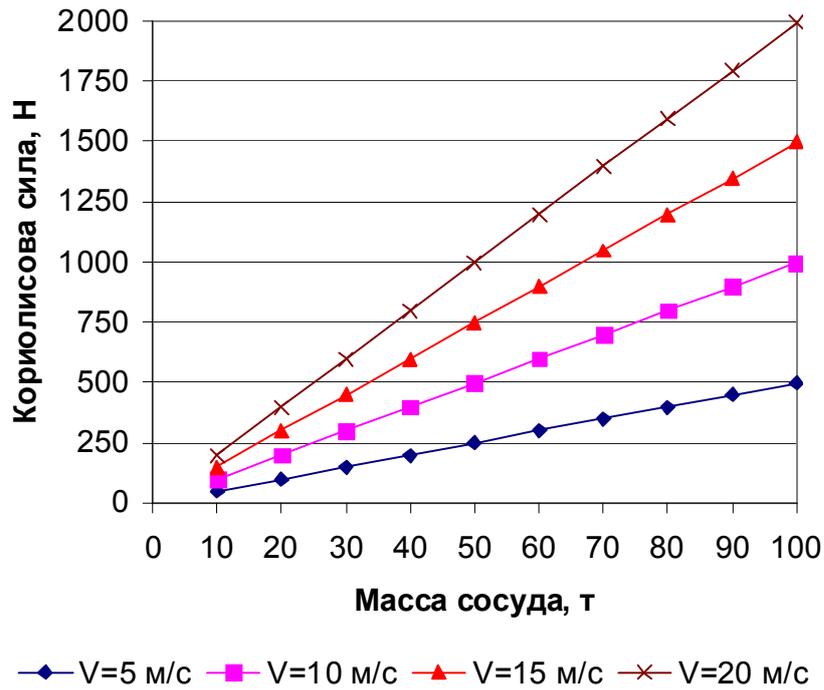


Рис. 1. Графики зависимости кориолисовой силы инерции от массы и скорости движения скипа (для условий Российского Донбасса)

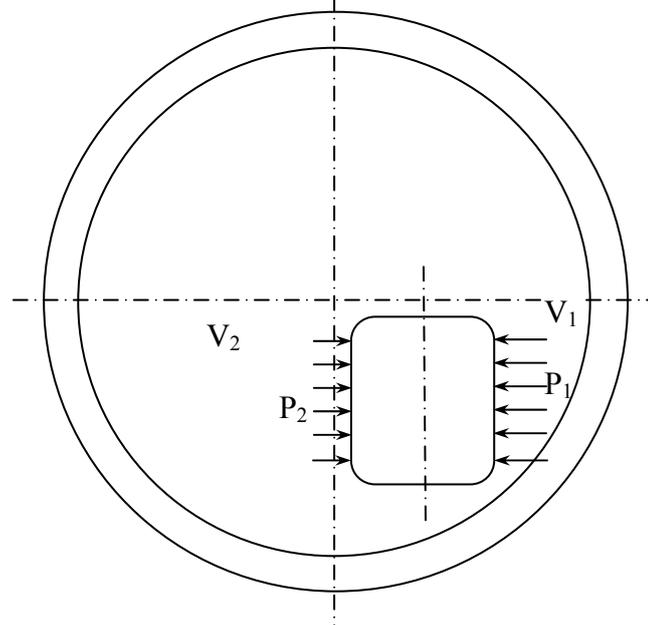


Рис. 2. Схема к определению действия аэродинамических сил на подъемный сосуд в результате его взаимодействия с воздушной струей

Исследованиями [4, 5] доказано, что скорость движения воздуха в промежутках между скипом и крепью ствола будет неодинаковой в отдельных частях поперечного сечения. Так как, например, правый скип (рис. 2) расположен несимметрично по отношению к оси шахтного ствола, то слева и справа от этого скипа скорости воздушного потока V_2 и V_1 будут различными по величине, причем $V_1 > V_2$.

Давление воздуха на боковые стенки сосуда в соответствии с уравнением Бернулли составит

$$p = p_2 - p_1 = \frac{\gamma}{2g} (V_1^2 - V_2^2), \quad (2)$$

где γ – удельный вес воздуха при нормальных условиях.

С учетом коэффициента неравномерности распределения скоростей $\eta = \frac{V_1 - V_2}{V_2}$ формула (2)

примет вид
$$p = \frac{\gamma V_1^2}{2g} \left(1 - \frac{1}{(\eta + 1)^2} \right).$$

С учетом $\eta = 0,015 - 0,017$ (считая ее малой величиной) будем иметь

$$p = \frac{\eta \gamma V_1^2}{2g}.$$

Аэродинамическая сила за счет неравномерности распределения воздушных потоков в сечении ствола, передаваемая на стенку подъемного сосуда, равна

$$P_a = \frac{\eta \gamma V_1^2}{2g} S_{бок} = \frac{\eta \rho V_1^2}{2} S_{бок}. \quad (3)$$

где $S_{бок}$ – площадь боковой поверхности подъемного сосуда, м².

Кроме найденной аэродинамической силы, на подъемный сосуд может действовать дополнительная сила, вызванная отклонением скипа при движении от вертикального положения. В этом появляется горизонтальная составляющая аэродинамической силы от встречного движения скипа и вентиляционной струи (рис. 3).

Эта сила зависит от угла атаки α вентиляционного потока, который ограничивается возможным отклонением скипа, движущегося в проводниках, от вертикального положения.

Максимально возможное отклонение стенки сосуда от вертикали

$$\Delta = 2\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3,$$

где Δ_1 – максимальный зазор между направляющим устройством и проводником, мм (10 мм – для рельсовых, 15 мм – для корбчатых);

Δ_2 – отклонение ширины колеи от проектного положения (макс. – 24 мм);

Δ_3 – допустимое отклонение проводников на двух смежных ярусах от вертикальной плоскости (макс. – 3 мм)

Угол атаки вентиляционного потока равен

$$\alpha_a = \arctg \left(\frac{2\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{h} \right)$$

Дополнительная аэродинамическая сила на подъемный сосуд

$$P_d = c \rho V^2 S_{бок} \sin \alpha_a,$$

где c – коэффициент сопротивления, определяемый опытным путем в зависимости от формы тела; для скипа, как параллелепипеда $c = 0,36$ [4];

ρ – плотность воздуха, кг/м³.

С учетом уравнения (3) суммарная аэродинамическая сила от перераспределения воздушных потоков и отклонения движения скипа от вертикали при наиболее неблагоприятном сочетании составит

$$\Sigma P = \rho S_{бок} \left(c V^2 \sin \alpha_a + \frac{\eta V_1^2}{2} \right).$$

Рассчитанные по этой формуле нагрузки в зависимости от массы и скорости скипа показаны на рис. 4.

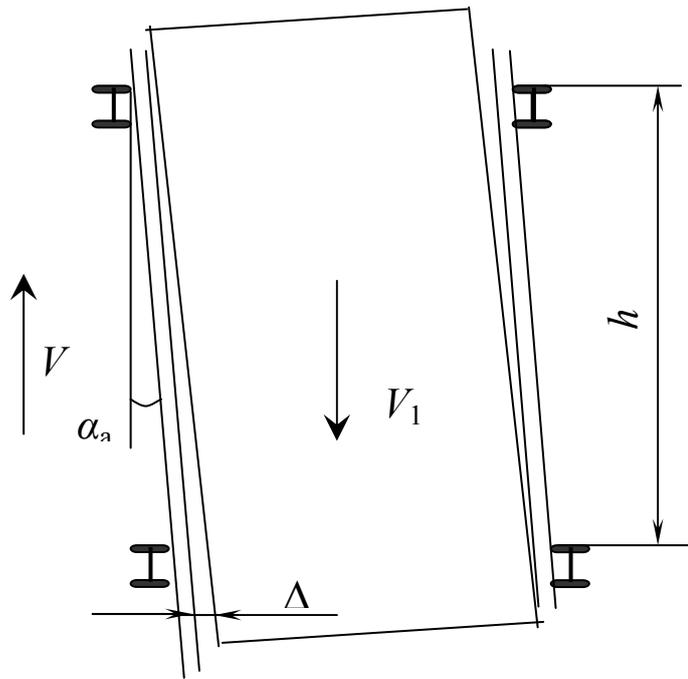


Рис. 3. Схема к определению дополнительной аэродинамической силы на подъемный сосуд в результате отклонения его движения от вертикали

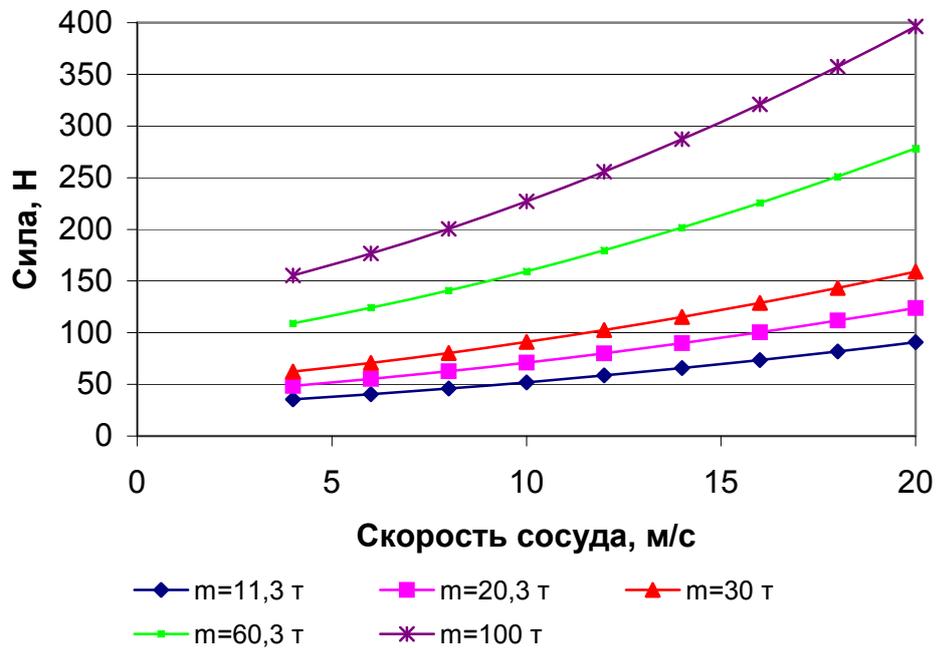


Рис. 4. Зависимость горизонтальной аэродинамической силы на скип от его массы и скорости движения

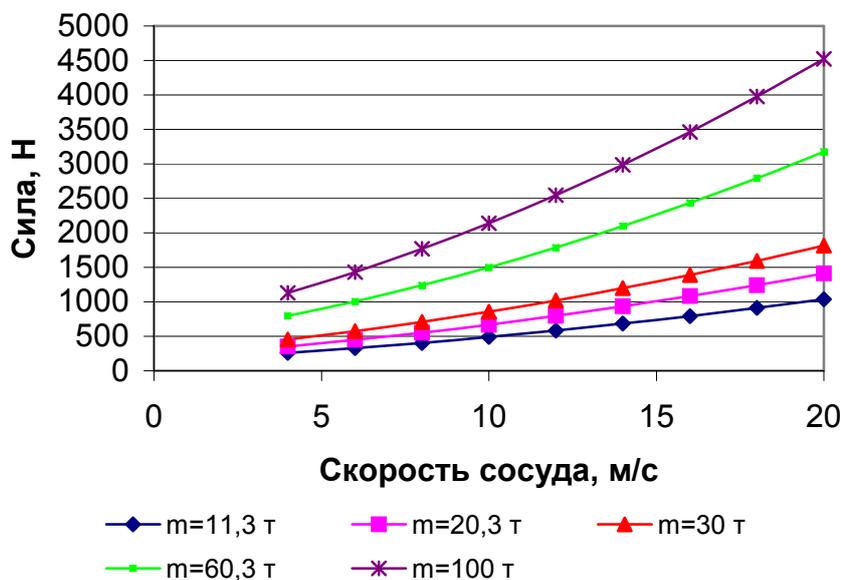


Рис. 5. Зависимость горизонтальной аэродинамической силы на скипы в местах их встречи от массы и скорости движения

3. Аэродинамический удар в месте встречи подъемных сосудов.

Горизонтальная составляющая силы P_a существенно (на порядок) возрастает в месте встречи подъемных сосудов (рис. 5), где возникает подпор воздуха, который стремится расширить пропускное сечение воздушной струи между сосудами. Затем часть воздуха проходит с повышенной скоростью между подъемным сосудами, его статическое давление падает, вследствие этого возникает толчкообразное ускорение подъемного сосуда, направленное к середине ствола и вызываемое более высоким статическим давлением воздуха в крайних сегментах сечения ствола.

Кроме рассмотренных сил, на армировку при увеличении интенсивности подъема, возрастут и ряд других дополнительных нагрузок:

- силы от крутящего момента, возникающего в головном канате;
- силы, возникающие от эксцентриситета загрузки подъемного сосуда
- силы, возникающие от неточности установки проводников (удары на стыках, участках искривлений и т. п.);
- силы, действующие на проводник в вертикальной плоскости.

В настоящее время автором ведется разработка методики расчета жесткой армировки с учетом всех вышерассмотренных факторов.

Выводы

1. В связи с интенсификацией добычи углей и руд прогнозируется увеличение масс и скоростей подъемных сосудов, что вызовет многократное увеличение нагрузок на армировку вертикальных стволов.

2. Действующая нормативная база по проектированию жестких армировок рассчитана на средние и малые интенсивности подъема и не учитывает ряда факторов, формирующих нагрузку на армировку.

3. При увеличении интенсивности подъема резко возрастает роль дополнительных («второстепенных») нагрузок и воздействий на армировку, прежде всего, аэродинамических сил, кориолисовой силы, силы кручения каната и др.

4. Только учет всех вышеперечисленных воздействий на армировку позволит произвести корректный расчет параметров схем и конструкций армировки для стволов, оборудованных высокопроизводительными подъемными установками

Библиографический список

1. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт.– ВНИИГМ им. М.М. Федорова.– Донецк, 1985.– 170 с.
2. Пособие по проектированию и монтажу жесткой армировки вертикальных стволов шахт и рудников (к СНиП II-94-80). Гос. ком. СССР по народн. образ., Моск. горн. ин-т / Под ред. И.В. Баклашова. – М.: Недра, 1989. – 160 с.
3. Прокопов А.Ю., Клименко А.П., Поздняков М.В. Направления совершенствования жесткой армировки стволов, оборудованных высокопроизводительными подъемными установками// Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: Сб. науч. тр. – Донецк: Норд-пресс, вып. №11, 2005. – С. 30-31.
4. Белый В.Д. Канатные проводники шахтных подъемных установок. – М.: Углетехиздат, 1959. – 212 с.
5. Шафранов Н.К., Ягодкин Ф.И. Канатная армировка вертикальных стволов. – М.: Недра, 1976. – 144 с.

© Прокопов А. Ю., Борщевский С. В., Формос В. Ф., Суржко И. А., 2009 г.