

УДК 622.674

## ОСНОВЫ РАСЧЕТА АРМИРОВКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

Гаркуша Н.Г. докт. техн. наук, проф.,

Донецкий государственный технический университет

*Описаны случаи внезапных разрушений жёстких армировок в стволах шахт-новостроек при вводе в эксплуатацию подъёмных установок. Изложены научные основы расчёта армировок вертикальных стволов.*

*The sudden destruction cases of hard armourings in the newly-erected mines shafts when putting into operation of lifting devices are described. The scientific fundamentals of vertical shafts armourings calculation are stated.*

Разнообразными известными случаями заполнена чёрная книга ошибок и неудач в мировой истории техники, которые собою стимулировали развитие прикладных и фундаментальных наук. Случается такое и в наше время, но реже. Видимо простые доступные загадки уже обнаружались и разгаданы. Теперь встречаются лишь редкие, но крепкие орешки, расколоть какие удаётся непросто. Один из таких орешков посчастливилось встретить автору в 60<sup>х</sup> годах, когда на многих крупных шахтах-новостройках попытка ввода в эксплуатацию подъёмных установок на первом же цикле заканчивалась грандиозной аварией – разрушением армировки ствола и подъёмного сосуда. Причины были неизвестны. Можно было лишь предположить, что это результат поспешно принятых проектных решений для строительства значительно более мощных, чем прежде, подъёмных установок. В мировой практике того времени не существовало ни соответствующей научно – теоретической базы, ни обоснованного инженерного расчёта армировок на заданные параметры подъёмной установки и ствола шахты.

Пострадавшим шахтам требовалась неотложная действенная помощь науки, за которой и обратились проектанты в Донецкий научно-исследовательский институт горной механики им. Фёдорова. Заняться этим вопросом пришлось автору, возглавлявшему в то время соответствующее профильное подразделение по шахтному подъёму.

Определённый исторический интерес представляет ретроспективный взгляд на обстоятельства того времени вокруг рассматриваемой проблемы.

Послевоенное развитие промышленности в передовых странах Европы и Азии обусловило необходимость резко увеличить добычу угля и других полезных ископаемых. Для этого потребовались новые крупные шахты с высокопроизводительными подъёмными установками. Проекты предусматривали увеличение скоростей движения в два – три раза, конечных нагрузок на канат до 250-500 МН, увеличения сечений стволов с 4-6 м до 8,5 – 10 м.

В этих условиях отсутствие научно обоснованной методики расчёта положение дел усугублялось распространившимся среди проектировщиков мнением о том, что проводники армировки для сосуда являются лишь геометрической связью, не испытывающей от вертикального движения сосуда динамического воздействия.

Такое мнение возникло на том основании, что в то время проводники армировки уже не использовались в качестве опоры при улавливании подъёмного сосуда парашютами, как было прежде:

- на заложенных в проектах многоканатных подъёмах парашюты на сосудах не требовались;
- на одноканатных подъёмниках установках клетки оборудовались парашютами новых систем, улавливающими сосуд при помощи специальных тормозных канатов.

Следовательно, проводники армировки освобождались от ранее учитываемой вертикальной динамической нагрузки.

По иронии судьбы так уже случилось, что когда по условиям возросших параметров подъёмных установок надо было подумать об усилении конструкций армировок их не только не усилили, а наоборот - стали принимать более лёгкие типоразмеры проката для проводников и расстрелов, увеличив при этом шаг ярусов армировки с 2-3 м до 4-5 м. Это ложное мнение в условиях отсутствия инженерного расчёта у проектировщиков вызвало увлечение переделкой проектов с целью облегчения конструкций армировки в стволах увеличенных диаметров. По стране намечался громадный экономический эффект. Переделка проектов приобрела масштабы кампании по всей стране.

До чего привела такая техническая политика ясно стало позднее, в 60<sup>х</sup> годах, - одна за другой начали происходить неожиданные грандиозные аварии, когда при первой попытке пуска подъёмных установок на проектных режимах разрушались металлоконструкции арми-

ровок на всей протяжённости ствола. Картина разрушений производила потрясающее впечатление. Погибли десятки стволов.

Реконструкции требовали, как разрушенные армировки, так и недостроенные, но также потенциально непригодные.

Промышленность несла громадные убытки. Что делать – ответа не было. Из-за массового характера и громадных убытков проблема приобретала государственные масштабы. Тревога дошла до правительственных органов. В Донецке непрерывно проводились выездные специальные совещания, организуемые «Госстроем» СССР. Проблема требовала своего срочного решения.

Начав с поисков способов оказания практической помощи Донецкий институт горной механики стал научным центром по проблеме исследований динамики системы «сосуд-армировка ствола».

Оказание помощи по ликвидации последствий аварий переросло в организацию фундаментальных исследований, положенных в дальнейшем в основу разработки инженерной методики расчёта.

Как для разработки способов реконструкции, так и для постановки задачи теоретических исследований были спланированы и проведены лабораторные и натурные эксперименты. Для этого были созданы специальные средства электротензометрии для сложных условий шахтного ствола.

Большой опыт выполненных реконструкций в стволах, а так же комплекс проведенных экспериментов по строительной механике и динамике системы позволили обосновать корректную математическую модель системы «сосуд-армировка» сначала в линейной детерминистической постановке, а затем, и с учётом основных статистических нелинейностей (искривления проводников, зазоры, трение, нелинейные упругие направляющие устройства сосуда):

- подъёмный сосуд представляет собой дискретное твёрдое тело с пятью степенями свободы малых перемещений, совершающее при этом генеральное движение по вертикали ( $z=vt$ );
- проводники – невесомые многопролётные упругие балки на упруго смещающихся и упруго поворачивающихся, регулярно чередующихся опорах – расстрелах.

Из теории колебаний упругих систем известно, что качественные особенности движения и превалирующие амплитудно частотные параметры определяются детерминистической линеаризованной моделью. Нелинейные и случайные коэффициенты в уравнениях лишь уточняют некоторые количественные поправки решения.

Расчётная схема (рис. 1) и соответствующие дифференциальные уравнения (1) записываются для случая движения сосуда в двухсторонних проводниках при помощи уравнения Лагранжа II рода [1]:

$$\begin{aligned}
 & m\ddot{x} + C_1(z + A)(x + \psi A - \theta s) + C_2(z + A)(x + \psi A + \theta s) + \\
 & + C_1(z - B)(x - \psi B - \theta s) + C_2(z - B)(x - \psi B + \theta s) = 0, \\
 & I_\psi \ddot{\psi} + [C_1(z + A)(x + \psi A - \theta s) + C_2(z + A)(x + \psi A + \theta s)]A + \\
 & + [C_1(z - B)(x - \psi B - \theta s) + C_2(z - B)(x - \psi B + \theta s)]B + mgd\psi = 0, \\
 & m\ddot{y} + C_3(z - B)(y - \varphi B) + C_3(z + A)(y + \varphi A) = 0, \\
 & I_\varphi \ddot{\varphi} + C_3(z + A)(y + \varphi A)A - C_3(z - B)(y - \varphi B)B + mgd\varphi - I_{\varphi\theta} \ddot{\theta} = 0, \\
 & I_\theta \ddot{\theta} - C_1(z + A)(x + \psi A - \theta s)s + C_2(z + A)(x + \psi A + \theta s)s - \\
 & - C_1(z - B)(x - \psi B - \theta s)s + C_2(z - B)(x - \psi B + \theta s)s - I_{\varphi\theta} \ddot{\theta} = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где:  $m$  – масса сосуда с грузом;

$I_\varphi, I_\theta, I_\psi, I_{\varphi\theta}$  – центральные моменты инерции сосуда;

$C_1(z), C_2(z)$  – функции боковой поперечной жёсткости проводников;

$C_3(z)$  – функции лобовой поперечной жёсткости проводников;

$A, B$  – координаты расположения направляющих устройств сосуда относительно центра тяжести;

$2s$  – ширина колеи проводников;

$x, y$  – координаты линейных перемещений центра тяжести в горизонтальной плоскости;

$z$  – координата вертикального перемещения центра тяжести ( $z=vt$ );

$\varphi, \psi, \theta$  – углы координат Крылова.

Периодичность поперечной жёсткости проводников играет доминирующую роль в характере движения сосуда в проводниках; это основной функциональный параметр для дифференциальных уравнений (1) с переменными коэффициентами, которые известны уже более 150 лет под названием уравнений Матье-Хилла. Решение этого уравнения имеют периодический характер с чередующимися зонами неустойчивого движения. Этот вид неустойчивого движения с неограниченным ростом амплитуд колебаний носит название параметрического резонанса и известен в матанализе как диаграммы устойчивости решений Айнса-Стрэтта.

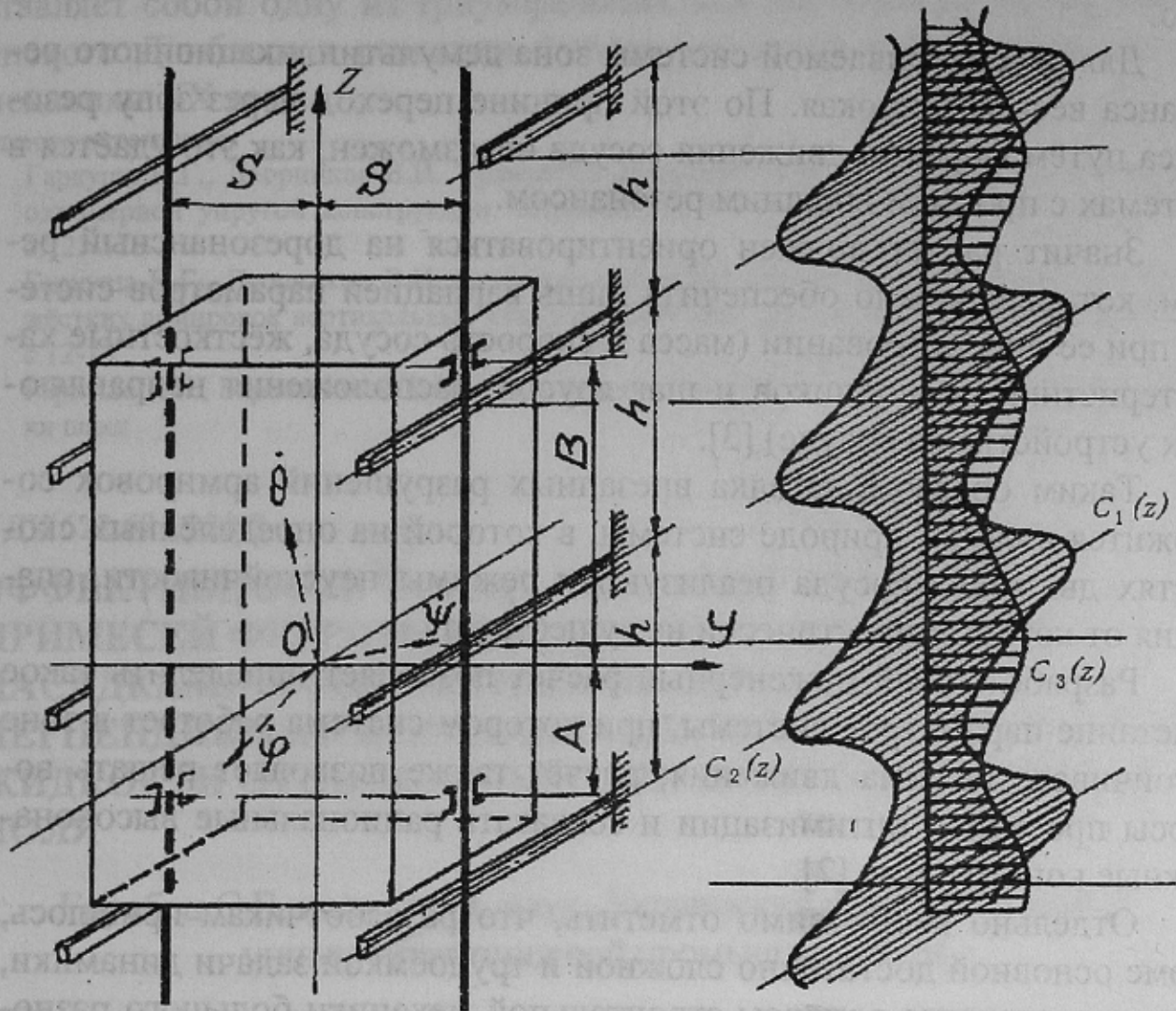


Рис.1 – Расчётная схема подъёмного сосуда в двухсторонних проводниках, система координат, графики функций жёсткости проводника

Так как общих решений система уравнений данного класса в аналитическом виде не существует, то задачу удалось решить благодаря появлению к тому времени быстродействующих вычислительных средств.

Полученные количественные результаты были положены в основу разработки инженерного метода расчёта системы «сосуд-армировка» на устойчивость движения, базирующегося на нормировании амплитуд колебаний сосуда при приближении к границе зоны демумльтипликационного резонанса [2], [3].

Необходимо отметить, что параметрический резонанс более грозен чем обычный внешний резонанс, так как в параметрический резонанс система «втягивается» весьма активно с использованием энер-

гии внешнего источника, а выходит из состояния резонанса весьма вяло.

Для рассматриваемой системы зона демультипликационного резонанса весьма широкая. По этой причине переход через зону резонанса путём форсажа движения сосуда невозможен, как это удаётся в системах с простым внешним резонансом.

Значит расчёт должен ориентироваться на дорезонансный режим, который можно обеспечить лишь вариацией параметров системы при её проектировании (масса и скорость сосуда, жёсткостные характеристики проводников и шаг ярусов, расположения направляющих устройства на сосуде) [3].

Таким образом, загадка внезапных разрушений армировок содержится в самой природе системы, в которой на определённых скоростях движения сосуда реализуются режимы неустойчивости, спасения от которых практически не существует.

Разработанный инженерный расчёт позволяет определить такое сочетание параметров системы, при котором система работает в зоне устойчивого режима движения; расчёт также позволяет решать вопросы проектной оптимизации и создавать рациональные высоконадёжные конструкции [2].

Отдельно необходимо отметить, что разработчикам пришлось, кроме основной достаточно сложной и трудоёмкой задачи динамики, решать и сложные вопросы строительной механики большого разнообразия схем армировок, необходимых для определения жёсткостных характеристик конструкции, а также разработать методику расчёта инерционных характеристик подъёмных сосудов.

Несмотря на то, что упомянутые характеристики являются всего лишь исходными данными для основной задачи, их определение заслуживает самостоятельного исследования.

К настоящему времени в течении 2<sup>х</sup> десятков лет накоплен опыт успешной эксплуатации армировок стволов с мощными подъёмными установками, где концевые массы на канате достигают 50-100 т, скорость равномерного хода 12-16 м/с, а армировка имеет шаг ярусов 4-6,25 м.

Решение изложенной проблемы по научно-теоретической глубине и народно-хозяйственной значимости является крупным достижением современной теории не только в вопросах динамики шахтного подъёма, но и в современной прикладной механике.

Решение этой важной народно-хозяйственной проблемы представляет собой одну из триумфальных вех достижений науки Украинского Донбасса в развитии фундаментальной теории прикладной механики XX века.

Список источников

1. Гаркуша Н.Г., Дворников В.И. Уравнения движения шахтного подъемного сосуда, как одномерной упругой конструкции. «Прикладная механика», т.V, вып.12, Киев, 1969., с.125-128.
2. Гаркуша Н.Г., Дворников В.И. Рациональный выбор параметров подъемных сосудов и жестких армировок вертикальных стволов. «Шахтное строительство», №1, Москва 1968, с.12-16.
3. Гаркуша Н.Г., Бережинский В.И. и др. (под ред Б.Ф. Братченко). Стационарные установки шахт

УДК 622.621.928.8

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАХВАТА ПАРАМАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ШАРИКОВЫМИ НАСАДКАМИ В МАГНИТНЫХ ФИЛЬТРАХ ПРИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПОТОКА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Горобец С.В. канд. техн. наук, Украинский государственный университет пищевой промышленности

В настоящее время широкое распространение получили магнитные фильтры (сепараторы) с различными ферромагнитными насадками (шары, стружка, вата из приволоки и т.п.) [1, 2]. При конструировании магнитных фильтров с ферромагнитными насадками направление внешнего магнитного поля фильтра ( $\vec{H}_0$ ) обычно выбирают перпендикулярным либо параллельным по отношению к потоку рабочей жидкости ( $\vec{V}_0$ ).

Многочисленные эксперименты [3] показали, что при направлении потока модельной жидкости перпендикулярно направлению внешнего магнитного поля ( $\vec{H}_0 \perp \vec{V}_0$ ) примеси оседают на высокоградиентную насадку с двух сторон, вытягиваясь по направлению внешнего магнитного поля. Сначала, оседающие на насадку парамагнитные примеси образуют конус, затем цилиндр. Когда процесс улавливания прекращается, на ферромагнитной насадке образуются вытянутые по направлению внешнего магнитного поля кластеры в виде трапеции со сглаженными углами (рис.1). Та же картина наблю-