

**МЕТОД ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПРЕСС-ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ  
«ПОДЪЕМНЫЙ СОСУД-АРМИРОВКА» ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ  
ШАХТ И РУДНИКОВ**

У статті викладений метод динамічних "експрес-іспитів" системи "піднімальна судина - тверде армування" шахтних вертикальних стовбурів. Метод заснований на синхронній високошвидкісній багатоканальній реєстрації під час іспитів показань підземного портативного цифрового вимірювального комплексу апаратури, встановленого на піднімальній судині з динамічними датчиками горизонтальних прискорень напрямних судини, аналогового датчика його вертикальної швидкості і показань наземного вимірювального комплексу, що реєструє миттєву швидкість обертання піднімальної машини в розгорненні за часом руху судини з дискретною прив'язкою глибинної координати судини до характерних крапок зміни швидкості на діаграмі розгорнення. Приведено формули для розрахунку лобових контактних навантажень на провідники по вимірним миттєвим прискоренням напрямних і запропонований підхід для визначення максимально припустимих при експлуатації горизонтальних прискорень напрямних.

**METHOD OF DYNAMIC EXPRESS TRAINS - TESTS OF SYSTEMS  
"AN ELEVATING VESSEL - ARMING" OF VERTICAL TRUNKS  
OF MINES AND MINES**

In clause the method of dynamic "express trains - tests" of system "an elevating vessel - rigid arming" of mine vertical trunks is stated. The method is based on synchronous high-speed multichannel registration during tests of the indications of a underground portable digital measuring complex of the equipment established on an elevating vessel with dynamic gauges horizontal acceleration directing vessel, analog gauge of his(its) vertical speed and indications of a ground measuring complex recording instant speed of rotation of the elevating machine in development(display) on time of movement of a vessel with discrete binding of deep coordinate of a vessel to characteristic points of change of speed on the diagram of development(display). The formulas for account of frontal contact loadings on conductors on measured instant acceleration directing are given and the approach for definition as much as possible admitted(as much as possible allowed, as much as possible allowable) is offered at operation horizontal acceleration directing.

Современные условия эксплуатация шахтных подъемных комплексов требуют установления постоянного аппаратурного оперативного контроля за их безопасностью. Наиболее объективную картину работы подземной части подъемного комплекса дают аппаратурные динамические испытания, производимые на представительной выборке циклов спуска-подъема в рабочих режимах.

На рудниках Украины в течение последних 7 лет в наиболее широких масштабах такие измерения выполняла «Лаборатория проблем диагностики и испытаний оборудования шахтных подъемных комплексов» ИГТМ НАН Украины под руководством автора данной статьи с применением программно-аппаратного комплекса собственной разработки «ТЕХНО-МАК» и портативной цифровой аппаратуры (КССП «МАК»).

Задача оперативного получения информации о динамическом состоянии системы «сосуд-армировка» с целью определения степени потенциальной опасности работы шахтных подъемов издавна являлась одной из самых актуальных во время эксплуатации установок с жесткой армировкой вертикальных стволов.

Кинематический метод диагностики армировки, базирующийся на анализе измеренных аппаратурой горизонтальных ускорений точек подъемных сосудов, начал активно применяться в разных странах еще более полувека тому назад. Это объясняется тем, что для установки на подъемном сосуде нескольких навесных датчиков линейных ускорений и записи осциллограммы в развертке по времени не нужно демонтировать рабочее оборудование, закрепленное на сосуде (роликовые амортизаторы, башмаки скольжения). Монтаж нескольких акселерометров на сосуде может быть проведен в течение 2..3-х десятков минут. Для регистрации их показаний могут быть использованы стандартные записывающие устройства, применяемые на шахтном подъеме для других целей. В Германии, например, для этого применялся трехканальный блок регистрации от дефектоскопа стальных шахтных канатов [1, 2].

Однако, однозначная дешифровка записанной таким образом информации и ее правильная интерпретация с точки зрения оценки степени динамической нагруженности армировки, оказалась намного сложнее, чем представлялось в то время. Это зависело от множества причин, в частности, от суперпозиции записанных на бумажную ленту с малой скоростью развертки по времени аналоговых сигналов соответствующих колебаниям точек сосуда по нескольким плоскостям, собственных колебаний корпуса сосуда и многозначности возможных вариантов одновременного контакта направляющих с проводниками при наличии синхронных всплесков сигналов по нескольким акселерометрам, установленным на сосуде с ориентацией измерительных осей во взаимно перпендикулярных плоскостях.

При таком способе регистрации надежно можно было измерить только максимальные (пиковые) значения ускорений за один период без учета их относительного сдвига по фазе, который сам по себе является очень важным информативным параметром для расшифровки пространственной картины колебаний сосуда во времени при движении по системе проводников.

Следующим этапом развития этого направления было создание и отработка технологии промышленной реализации «силоизмерительного» метода, при котором информативными параметрами являются дискретно реализующиеся во времени контактные нагрузки на проводники со стороны башмаков скольжения сосудов. Определение степени аварийной опасности эксплуатационного состояния армировки проводилось на основании достаточно хорошо отработанных в строительной механике методов деформационно-прочностных расчетов стержневых систем. Однако практика показала, что в условиях интенсивной эксплуатации подъемов «силоизмерительный» метод, требующий установки взамен рабочих специальных тензометрических башмаков и их последующего демонтажа, оказался слишком громоздким и не нашел широкого практического применения. Кроме того, для рельсовых проводников, которые и до сих пор занимают основное место в угольных стволах, в отличие от коробчатых установка тензометров в лапах скольжения для промышленного применения достаточно проблематична.

Это вызвало необходимость разработки промежуточного направления, которое можно назвать «акселерометрическим-силорасчетным» или «кинематическим-силорасчетным» методом (терминология автора данной статьи). Оно состоит в том, чтобы по измеренным значениям горизонтальных ускорений точек корпуса

подъемного сосуда расчетным путем определить контактные усилия, а уже по ним провести деформационно-прочностной расчет армировки как при «силоизмерительном» методе. Проблема применения разработанных до настоящего времени вариантов данного метода состоит в том, что все известные его модификации используют модель одночленного представления зависимости максимальных значений контактных нагрузок  $F_{max}$  на проводники в форме произведения максимальных значений горизонтальных ускорений  $A_{max}$  на коэффициент пропорциональности  $Mu$ , называемый «массой, участвующей в ударе» (в модели Бэра  $Mu=0,3M$ )

$$F_{max} = Mu \cdot A_{max} \quad (1)$$

где  $M$  – масса сосуда.

Из зарубежных литературных источников известно, что модель Бэра дает завышенные по отношению к реально измеренным значения максимальных контактных нагрузок. В условиях стволов Германии, где в отношении отклонений проводников от вертикальности строго соблюдаются требования Правил безопасности, достаточно широко распространен данный метод оценки работы эксплуатационной безопасности стволов, обеспечивающий работу подъемов с большими фактическими запасами прочности армировки.

В условиях длительной эксплуатации стволов и большого коррозионного износа наиболее опасными для работы армировки являются лобовые нагрузки на проводники, через которые передаются большие горизонтальные нагрузки на опорные расстрелы. Большинство расстрелов выполнено из двутавровых балок, установленных в крепи так, что их наименьший момент сопротивления соответствует горизонтальной плоскости нагружения от расстрелов. Поэтому оперативная и объективная оценка уровня динамического нагружения армировки на основании экспресс-метода динамических испытаний с автоматическим расчетом горизонтальных нагрузок на систему «проводник-расстрел» позволит в короткие сроки получить максимально объективную картину состояния динамической нагруженности армировки большого количества стволов, даст основание для их сравнения между собой и объективного выбора стволов и подъемных отделений, требующих исследования методом сплошного обследования, применения расширенных динамических испытаний и диагностики с определением остаточного ресурса работы оборудования. Методика и порядок таких измерений, разработанные в ИГТМ НАН Украины, описаны в работе [4].

В отечественных условиях фактические отклонения проводников от вертикали за длительный период эксплуатации стволов достигают значительных величин, особенно в сложных горно-геологических условиях вызванных наличием мульды сдвижения или подвижкой горных пород околоствольного массива, автором предлагается новый метод оперативного динамического контроля состояния систем «сосуд-армировка» основанный на измерениях **мгновенных** (в отличии от максимальных, используемых в предыдущих моделях) **горизонтальных ускорений всех направляющих** подъемного сосуда **и сдвигов по фазе** между фронтами их сигналов в лобовой и боковой плоскостях проводников. Для получения расчетных значений мгновенных значений лобовых контактных нагрузок на провод-

ники предлагается использовать полученные автором формулы, приведенные в работе [3], являющиеся аналитическим решением исходных дифференциальных уравнений динамики системы «сосуд-армировка».

$$\begin{aligned} Fv(t) &= M_{1,1} \cdot Wv(t) + M_{1,2} \cdot Wn(t) \\ Fn(t) &= M_{2,1} \cdot Wv(t) + M_{2,2} \cdot Wn(t) \end{aligned} \quad (2)$$

где  $Fv(t)$ ,  $Fn(t)$  - мгновенные значения лобовых контактных усилий на проводники соответственно от башмаков верхнего и нижнего поясов сосуда;  $M_{i,j}$  - весовые коэффициенты, определяемые массой, геометрическими размерами и моментами инерции сосуда;  $Wv(t)$ ,  $Wn(t)$  - соответственно мгновенные значения лобовых ускорений, зарегистрированные датчиками-акселерометрами, установленными в лобовой плоскости пары проводников на верхнем и нижнем поясах сосуда.

Реализация данного метода возможна только при использовании для измерений и регистрации высокоскоростной многоканальной аппаратуры, которая с требуемой точностью фиксирует на жесткий диск встроенной ПЭВМ одновременно измеренные шестью датчиками горизонтальные ускорения и одним датчиком вертикальные ускорения направляющих сосуда. Тестирование данного метода при расчете максимальных лобовых контактных нагрузок на проводники показало, что он обеспечивает достаточную для практических требований точность и оперативность получения информации.

Наиболее коротким для практической реализации является метод экспресс-испытаний в модификации, реализующей дискретную привязку показаний установленных на сосуде динамических датчиков к глубинным отметкам ствола в наиболее характерных точках, определяемых по диаграмме рабочей скорости подъемной машины. Целесообразность разработки и применения такого метода для широкомасштабных динамических испытаний армировок многих стволов за ограниченное время вызвана тем, что после завершения цикла измерений операция по точной адресной привязке данных показаний датчиков к расстрелам армировки в стволе, пронумерованным в соответствии с паспортом ствола при 12-18 циклах спуска-подъема, необходимых для набора статистически достоверного набора информации, занимает достаточно длительное время.

На момент измерений в стволе всегда имеется значительное количество непрономерованных как основные, заранее неизвестных по глубинной координате на маркшейдерской профилировке вспомогательных расстрелов, ложных расстрелов, дополнительных металлоконструкций, конструкций отшивки друг от друга подъемных отделений и др., на которые реагирует датчик, основанный, например, на фиксации отраженного от расстрела инфракрасного сигнала. Применение магнито-индуктивных, или магнито-активных датчиков, реагирующих на металл, в момент прохождения сосуда мимо расстрела, так же имеет ту же проблему - появление множества ложных срабатываний между ярусами реальных расстрелов. Применение по глубине ствола устанавливаемых дискретно в характерных точках стволах датчиков-маяков, посылающих свои сигналы в компьютер аппаратуры в

момент прохождения сосуда мимо них, радикально меняет ситуацию и обеспечивает точность автоматической привязки данных к месту в стволе. Однако их установка перед началом измерений требует значительных затрат времени. Особенно в глубоких стволах она занимает до 1 часа времени. В условиях интенсивной работы подъема такие затраты времени на подготовку измерений целесообразны только в особых случаях, при проведении полной диагностики ствола, эксплуатируемого в сложных горно-геологических или горно-технологических условиях. Камеральная обработка таких показаний дискретных датчиков по точной привязке данных к номерам ярусов в соответствии с паспортом ствола даже с использованием ПЭВМ требует длительной и кропотливой работы эксперта по обработке, что естественно задерживает выдачу конечного заключения о динамическом состоянии системы «сосуд-армировка», удорожает стоимость работы и ограничивает технические возможности подразделения диагностической лаборатории по масштабу выполнения обследований.

Многолетний опыт проведения динамических измерений в промышленных условиях показывает, что данные, полученные путем применения комплекта навесных датчиков ускорений, контролирующего пространственное движение каждого башмака сосуда, дают более быстро и объективно информацию о фактических динамических режимах системы «сосуд-армировка», чем данные по измерению контактных нагрузок с помощью силоизмерительных башмаков, так как последние неизбежно изменяют присоединенные жесткости направляющих сосуда и размеры кинематических зазоров, которые существенно влияют на динамику системы. Часто, в силу значительных отклонений проводников от вертикали, в фактических промышленных условиях встречаются системы с искусственно завышенными кинематическими зазорами для исключения заклинивания сосуда в корбчатых проводниках в местах локальных искривлений. Их фактическая динамика более полно и объективно фиксируется кинематическим методом испытаний, чем силоизмерительным. Причем, нередко фиксировались случаи, когда на пониженной скорости движения сосудов на одном-двух одних и тех же ярусах регистрировались при пониженной скорости максимальные за все испытательные проезды горизонтальные ускорения башмаков равной или даже превышающей максимальные величины на более высокой скорости движения.

В этих условиях автором данной статьи предлагается новый вариант кинематического метода, который можно назвать методом «динамических экспресс-испытаний» систем «сосуд-армировка» шахтных стволов. Он основан на использовании одновременно с данными динамических измерений на подъемном сосуде данных настройки системы управления скоростью подъемной машины в привязке к глубинным отметкам ствола. В каком бы режиме не эксплуатировался подъем – автоматическом или ручном, машинисту подъема по показаниям глубиномера всегда известно положение подъемного сосуда, которое фиксируется автоматикой подъемной машины. Служба наладки подъема всегда имеет контрольные осциллограммы испытаний аппаратуры подъема с привязкой параметров управления к дискретным точкам ствола, например, участкам окончания разгона, начала торможения, промежуточным горизонтам, на которых сосуд должен снижать скорость по требованиям безопасности и др. Такие осциллограммы можно всегда за-

писать на поверхности с помощью дополнительного комплекта аппаратуры во время динамических испытаний армировки синхронно с записью в аппаратуре МАК, установленной на подъемном сосуде. Синхронизация по времени показаний записей, производимых обоими комплектами, технически может быть произведена различными способами: либо по радиоканалу, либо по анализу данных датчиков движения (например скорости барабана и скорости сосуда, устанавливаемых на обоих комплектах аппаратуры, либо по синхронизации двух таймеров комплектов аппаратуры, если они оба содержат встроенные ПЭВМ и т.п.). Поскольку обе записи (наземная и подземная) производятся в развертке по времени с известным, заранее заданным квантом, то для получения укрупненной по шагу адресной привязки динамических данных остается только проставить на протоколе-развертке глубинные отметки против соответствующих секунд цикла спуска или подъема.

В принципе такая работа может быть выполнена прямо в шахтных условиях после окончания измерений на встроенной ПЭВМ аппаратуры. После ввода этих данных в базу обрабатывающее программное обеспечение автоматически выдаст с распечаткой на портативном принтере первичные протоколы-развертки горизонтальных и вертикальных ускорений каждого из башмаков сосуда в привязке к номерам проводников и рабочим граням в лобовой и боковой плоскостях по каждому циклу в отдельности с простановкой согласованных по времени глубинных отметок.

Такой протокол дает достаточно большую информацию о распределении уровней динамической нагруженности армировки по глубине ствола и отклонений пространственного профиля проводников от вертикали. Он показывает общую картину характера движения сосуда по стволу, позволяет автоматически определить среднестатистические показатели динамических процессов, полученные на большом количестве циклов. Быстро определить наличие в стволе участков, где локальные искривления проводников вызывают резкое повышение уровня динамических нагрузок на армировку. При накоплении в базе данных Лаборатории большого количества данных таких измерений появляется возможность проведения сравнительной оценки между собой работы различных подъемных отделений и различных стволов, строить прогноз по изменению уровня безопасности их эксплуатации во времени.

Для отработки данного метода в промышленных условиях автором были разработаны исходные технические требования и проведены испытания экспериментального образца дополнительного бесконтактного датчика вертикальной скорости подъемного сосуда, работающего на эффекте Доплера и подключаемого к одному из аналоговых измерительных каналов измерительного блока аппаратуры МАК. Метод прошел успешные испытания в условиях действующих подъемов ЗАО ЗЖР во время проведения плановых работ по диагностике армировки Центральной группы стволов и показал свою эффективность.

Для сравнения модели (2) с формулой Бэра следует отметить, что коэффициенты пропорциональности  $M_{i,j}$  для параметров контровеса клетки на указанном руднике с равномерно распределенной по его длине массой принимают значения от  $0,16M$  до  $0,36M$  ( $M$  – масса контровеса). Получение максимальных значений

контактных лобовых нагрузок на проводники при измерении мгновенных ускорений достигается путем программного сканирования файла мгновенных нагрузок и выбора максимального из них за установленный интервал времени (например 2, 5, 10 сек) для выведения в итоговый протокол испытаний.

Измерения проводились следующим образом. На подъемном сосуде (клетки или контровесе) устанавливался измерительный комплекс «МАК», датчик скорости направлялся под определенным углом к поверхности проводника так, чтобы измерять скорость движения сосуда, относительно его поверхности. В машинном зале наладочной службой шахты устанавливался записывающий осциллограф, с отметчиком времени, подключенный к выходу канала для измерений скорости подъемной машины. После включения обеих комплектов в режим записи подъемный сосуд запускался в работу на серию из 10 циклов спуска-подъема с вариацией по скорости в соответствии с методикой испытаний [4]. После окончания измерений и самопроявления фотобумаги с записанной диаграммой скорости, на ней проставлялись характерные глубинные отметки и соответствующие им значения секунд с момента начала движения.

После демонтажа подземного комплекта аппаратуры запускался специальный блок программного обеспечения встроенного компьютера и в помещении машинного зала строился прокол-развертка по времени показаний акселерометров с раскладкой данных по проводникам и их рабочим граням. Сопоставление осциллограмм скорости подъемной машины и сосуда, записанных с поверхности и под землей показали их полную синхронность.

При этом анализ данных подземного датчика скорости, работающего на эффекте Доплера, показал, что характер отражающей поверхности проводника, подверженного коррозии и находящегося в условиях действия шахтных вод вносит соответствующие помехи в сигнал датчика. Для их устранения применялось автоматическое математическое сглаживание данных методом скользящего среднего, после которого осциллограммы обоих комплексов оказались полностью сопоставимыми и развертка глубинных отметок по времени была перенесена в компьютерный протокол динамических измерений. В последующих измерениях было проведено дополнительное аппаратное сглаживание выходного сигнала датчика перед входом подключения к измерительному блоку КССП МАК, которое дало аналогичные по качеству, но несколько изменившиеся по амплитуде значения. Применение датчика скорости для отражения качественного характера изменения скорости сосуда во времени не требует его предварительной тарировки. Она проводится путем сопоставления его данных с данными, полученными поверхностным комплексом оттарированной аппаратуры.

Для сокращения времени измерений и получения предварительной информации о динамическом состоянии системы «сосуд-армировка» в условиях коротких подъемных сосудов, имеющих вертикальный размер в пределах 1,5 – 2 его максимальных горизонтальных размеров можно применить для оперативной оценки следующий подход: так как модель Бэра дает завышенные против реальных динамические нагрузки, а по ряду рекомендаций считается, что номинальные горизонтальные нагрузки на проводники при эксплуатации не должны превышать 10% от полного веса сосуда, то в условиях, когда по данным технической документа-

ции, имеющейся на шахте нельзя определить предельно допустимые контактные нагрузки на проводники, для определения максимально допустимых при эксплуатации номинальных горизонтальных ускорений направляющих использовать условие:

$$0,1 \cdot M \cdot g \geq 0,3 \cdot M \cdot A_{\max} \quad (3)$$

Отсюда следует, что для нормальной эксплуатации подъема с нагрузками на проводники, на превышающими 10 % от конечного веса сосуда, максимальные горизонтальные ускорения для любого из башмаков должны быть в районе значений, не превышающих существенно  $3.3 \text{ м/с}^2$ .

При обнаружении во время экспресс-испытаний на отдельных участках ствола ускорений значительно превышающих указанные значения, следует проводить локальную профилировку проводников для выявления их значительных отклонений от вертикали на коротких участках, уступов на стыках проводников и их устранения в процессе плановых ремонтов и проводить расширенные или комплексные испытания системы «сосуд-армировка» в данном стволе.

Предложенный экспресс-метод измерений и обработки данных реально позволяет рабочей группе диагностической лаборатории обработать до 3-4 подъемных отделений в течение 2-х рабочих смен (одного дня) и за короткое время оперативно получить большое количество информации по многим стволам одного региона или рудника, эксплуатируемых в сходных горно-геологических условиях, для сравнения их фактического эксплуатационного динамического состояния и разработки мероприятий по адресному надзору за их изменениями и ремонту.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gotzman W. Elektrische Kraftmeibeiinrichtung zum untersuchen von schachtfuehrungen. Gluckauf 103 (1967) 10. s. 474-481.
2. Slonina W., Hupfer H. Meibeiinrichtungen fur die an schachtforderanlagen auftrenden dynamischen btanspruchungen. Gluckauf-Forschungshefte 31 (1970) 5, s. 246-256.
3. Ильин С.Р. Взаимосвязь силовых и кинематических параметров динамического взаимодействия подъемных сосудов с проводниками жесткой армировки шахтных стволов //Вибрации в технике и технологиях. – 1998. - №3(7). –С.82-83.
4. Діагностика стану систем „кріплення-масив” та „підйомна посудина-жорстке армування” шахтних стовбурів. Порядок та методика виконання. Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Міністерство промислової політики України, ГР 3-032-2004. ПБП „Економіка”. Дніпропетровськ. 2004. -40с.