

3. Разработать исходные данные на проектирование энерготехнологического комплекса утилизации шламов и некондиционных углей: Отчет о НИР (заключительный) ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины; Руководитель А.Ф. Булат. – Днепропетровск, 2010. – 255 с. – № 0107U002003; Инв. № 6959

4. Влияние условий нагрева низкосортных углей и отходов углеобогащения на продукты термодеструкции / В. Л. Приходченко, Е. А. Слащева, В. Я. Осенний, Н. В. Коваль, Э. С. Клюев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 89. – С. 63-72.

5. Реми, Г. Курс неорганической химии / Г. Реми. – М.: Мир, 1972. – Т.1. – 824 с.

6. Исследование процессов коксования отходов углеобогащения / В. Л. Приходченко, Е. А. Слащева, Н. В. Коваль // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 92. – С. 103-110.

**УДК 622.673.1**

Канд. техн. наук С.Р. Ильин  
(ИГТМ НАН Украины)

## **АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАБОТ ПО ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ И МОНИТОРИНГУ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ АРМИРОВКИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ**

У статті викладено матеріали, що описують розвиток технології динамічної діагностики жорсткого армування шахтних стволів з використанням мобільних вимірювальних пристроїв у Європі та в СНД. Наведено приклади використання аналогової та цифрової вимірювальної апаратури, та результати досліджень динаміки систем «посудина-армування» з використанням «вимірювально-розрахункової» технології у промислових умовах рудників України. Вказано на перспективи поєднання методів лазерного сканування та динамічної діагностики армування щодо підвищення експлуатаційної безпеки стволів у складних гірничо-геологічних умовах.

## **ANALYSIS OF DEVELOPMENT RESULTS AND OUTLOOK THE DYNAMIC DIAGNOSIS AND MONITORING OPERATIONAL STATUS OF REINFORCEMENT SHAFTS**

The article describes materials that describe the development of technology of diagnosing dynamic rigid reinforcement shafts using mobile measuring devices in Europe and the CIS. Examples of the use of analog and digital instrumentation, and results of studies of the dynamics of systems "vessel-reinforcing" using "measurement and calculation" technology in industrial environments mines in Ukraine. Specified on the prospects combination of dynamic diagnostics and laser scanning reinforcement to improve operational safety barrels in difficult geological conditions.

### **Анализ развития работ по динамической диагностике армировки**

Исторически работы по надзору за техническим состоянием систем «подъемный сосуд - жесткая армировка» шахтных стволов (диагностике) начали развиваться одновременно с появлением первых подъемных комплексов. Подъемные сосуды и армировка являются оборудованием, работающим в тяжелых динамических режимах в труднодоступных местах под землей в условиях высокой агрессивности шахтной среды и являются объектами повышенной опасности. Деградация, износ и разрушение его некоторых элементов начинают развиваться с первых же циклов эксплуатации и могут заканчиваться через очень короткое время. Например, срок работы вкладышей рабочих или предохранительных башмаков скольжения скипов при интенсивной работе может длиться

не более 7-14 дней. Несвоевременная замена изношенного элемента может привести к потере зацепления скипа с проводниками и неожиданной аварии на подъеме с тяжелыми последствиями для всего предприятия.

К простейшему виду работ, относящихся к диагностическим, можно отнести осмотры армировки, проводимые с крыши подъемного сосуда на малой скорости порядка 0,3 м/с, а так же осмотры направляющих устройств, корпуса подъемного сосуда, размещенного на нем оборудования и др. На их проведение ежедневно отводится полная рабочая смена, в течение которой бригада ствольных рабочих осматривает все яруса армировки, выявляя возможные нарушения стыков проводников, крепления проводников к расстрелам, заделки расстрелов в крепи, появление усталостных трещин на проводниках, определяя уровень коррозионных повреждений расстрелов и прочие дефекты. Работники механической службы определяют состояние направляющих скольжения и качения сосуда, кинематические зазоры в парах «башмак-проводник», зазоры между сосудами и расстрелами и состояние механизмов, размещенных на сосудах. Периодически проверяется вертикальность проводников, состояние головных и уравнивающих канатов, подвесных и прицепных устройств.

С повышением скорости и грузоподъемности установок развивались и методы контроля их параметров. По мере накопления опыта эксплуатации ШПУ и расследования причин аварий стало понятно, что один только периодический статический контроль ограниченной группы параметров не дает достаточно достоверной картины взаимодействия подъемного сосуда с армировкой во всех практически возможных ситуациях. Поэтому с 50-х годов 20-го века в европейских странах стали предприниматься попытки создания методов и средств аппаратурного динамического контроля систем «сосуд-армировка» на рабочих режимах движения – динамической диагностики армировки (ДДА-технология, терминология автора). В те годы в измерительной аппаратуре использовались бумажные самописцы или осциллографы с фотобумагой.

После серии крупных аварий, вызванных параметрическими резонансами в армировке стволов Донецкого угольного бассейна в 60-х годах, экспериментальными и теоретическими исследованиями в этой области вплотную занялись ученые Всесоюзного научно-исследовательского института горной механики и технической кибернетики им. М.М.Федорова под руководством профессоров Н.Г. Гаркуши и В.И. Дворникова [1].

На основании большого объема теоретических и экспериментальных исследований в НИИГМ им. М.М.Федорова был разработан и применяется в настоящее время в промышленном порядке на угольных шахтах вариант ДДА-технологии, включающий статические измерения геометрических параметров системы «сосуд-армировка» и последующий динамический расчет ее поведения в рабочих и аварийных режимах по самой общей динамической модели ШПУ, разработанной профессором В.И. Дворниковым и реализованной в специальном программном комплексе «АРМИРОВКА».

С 70-х годов институт НИГРИ в промышленном порядке на стволах Кривбасса применяет собственную тензометрическую аппаратуру контроля нагрузок на армировку (АКН) с регистрацией данных на светолучевой осцилло-

граф и самопишущую аппаратуру (ИП) с бумажным самописцем для контроля параметров проводников. Это были первые в СССР систематические промышленные динамические испытания систем «сосуд - армировка» рудных стволов. При ручной обработке осциллограмм учитывались только пиковые показания датчиков на одном-двух проездах сосуда в статических моделях деформирования без математического моделирования динамики системы «подъемный сосуд-армировка» [2, 3].

В 1969-71 гг. экспериментальные аппаратурные измерения нагрузок на скипах ш. им. Ленина (Кривой Рог) выполнялись в ИГТМ НАНУ под руководством академика В.Н. Потураева [4, 5]. В них так же использовалась лучевая запись результатов измерений с последующей ручной оцифровкой коротких фрагментов осциллограмм и статистическим анализом на ЭВМ.

В Пермском политехническом институте в период 1968-74 гг. с использованием виброизмерительной аппаратуры ВИ-6ТН проводились экспериментальные исследования динамического воздействия скипа на крепь и выявления ярусов с наибольшими динамическими нагрузками. На последующем этапе исследований на выделенных ярусах устанавливалась тензометрическая аппаратура для измерения деформаций расстрелов в местах заделки в крепь, которая в течение смены находилась в стволе в режиме автономной работы. По ее показаниям определялись нагрузки, передающиеся на крепь при движении скипа. Регистрация велась на шлейфовый осциллограф [6].

В 70-х годах в Ленинградском горном институте под руководством проф. Е.С. Кричевского проводились эксперименты по измерению контактных нагрузок на рельсовые проводники и исследованию закономерностей их проявления в зависимости от скорости подъема на стволах СУБРа с фиксацией результатов на шлейфовый осциллограф [7].

Для проводимых в это же время 70-х - 80-х годов аппаратурных исследований подъемных установок в Европе характерно такое же использование лучевой фиксации данных измерений с последующей ручной оцифровкой выбранных фрагментов осциллограмм.

При этом зарубежные эксперименты характеризуются большим объемом используемой аппаратуры и числом одновременно фиксируемых параметров. Исследователи записывают не только нагрузки и ускорения в направляющих сосуда, но и напряжения в характерных точках его корпуса, крутящий момент на валу двигателя, колебания натяжений канатов, диаграмму скорости и пр. Их цель – получить как можно больше данных для верификации математических моделей, использование которых должно дать результаты, достаточные для адекватного прогноза поведения системы и выбора ее рациональных и безопасных параметров при проектировании, строительстве и эксплуатации. [8 - 10].

Фрагменты осциллограмм, зафиксированных такими приборами, показаны на рис. 1.

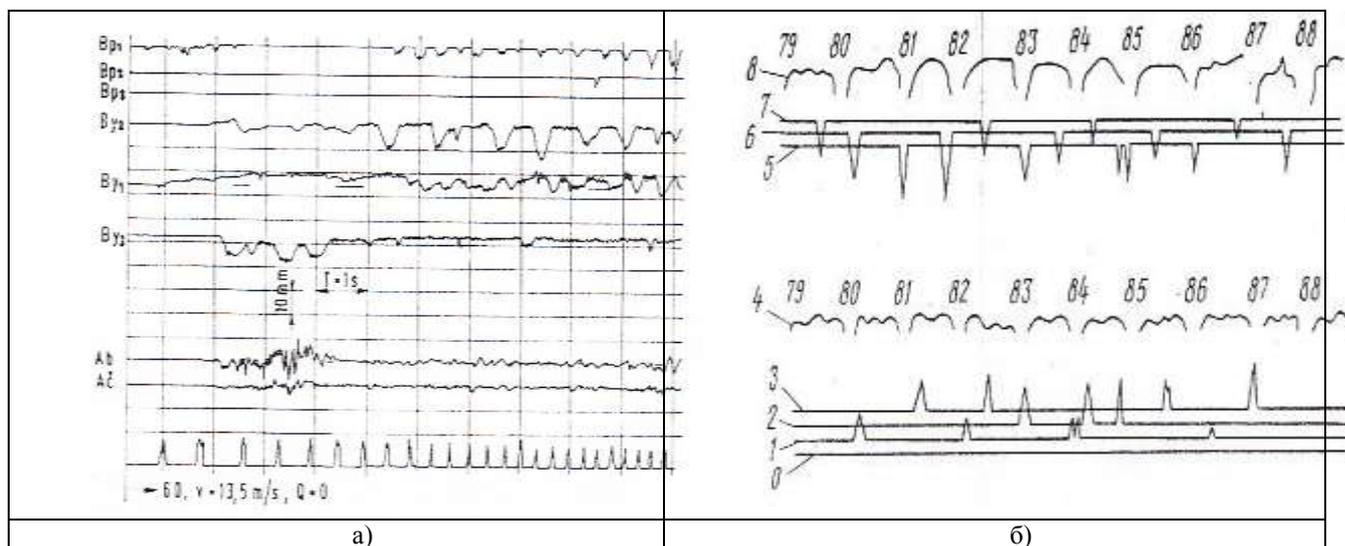


Рис. 1 - Осциллограммы динамических нагрузок на проводники: (а) по материалам работы [8]; (б) по материалам работы [3].

Приведенные осциллограммы показывают, что полный перевод их ручным способом в цифровую форму практически не возможен, применение приборов преобразователей графиков (типа Ф-018) также не решало вопроса оцифровки больших объемов данных. При таких осциллограммах возможно только определение пиковых значений на некотором интервале времени, что делает непригодной такую форму записи для последующего использования в компьютерной обработке данных на протяжении больших серий испытательных циклов и полномасштабного моделирования всего цикла спуска или подъема. Например, обработка результатов измерений, описанных в работе [8], длилась целый 1980-й год.

Судя по публикациям того времени, первым опытом применения на движущемся в рабочем режиме подъемном сосуде виброизмерительной аппаратуры с высокоскоростным портативным цифровым регистратором в промышленных условиях, была работа, выполненная автором статьи на кафедре горных машин Мишкольцкого университета тяжелой промышленности и реализованная на многоканатном подъеме рудника Мечек (г. Печ, Венгрия) в 1978 году [11, 12]. Измерения вертикальных и горизонтальных ускорений при колебаниях клетки и канатов проводились в течение 2-х рабочих смен, обработка и анализ результатов заняли около 10 дней. Следует отметить, что такие промышленные исследования с записью на портативный магнитограф данных измерений параметров нагрузок на проходческом комбайне и обработкой на персональном компьютере уже в те годы систематически проводились на кафедре [13]. Это позволило разработать вариант применения такой технологии для исследования динамики шахтного подъема.

Позднее эксперимент, описанный в работе [8], был проведен в Чехии (Острава) на руднике МИР-4 в мае 1988 года с цифровой записью динамических данных на магнитограф. Описанные эксперименты носили разовый исследовательский характер и их результаты были использованы для верификации математических моделей динамики ШПУ.

Уже первое применение цифровой записывающей аппаратуры, способной накапливать большой массив данных и передавать их стандартным способом для обработки в стационарный компьютер показало широкие возможности для разработки измерительно-аналитической математической модели динамики ШПУ, в которой часть данных будет с высоким разрешением по времени и квантования по уровню в течение серии циклов спуска/подъема одновременно записываться с различных взаимодействующих между собой узлов оборудования и в лабораторных условиях программным путем «встраиваться» в моделирующий вычислительный процесс, организованный в ПЭВМ на основании комплексной математической модели.

Этот принцип был положен в основу разработки в ИГТМ измерительно-аналитической технологии динамической диагностики армировки с 1994 года, когда стало возможным приобретение на рынке Украины подходящих по своим характеристикам промышленных блоков, необходимых для сбора электронной части комплекта портативной измерительной аппаратуры.

Экспериментальная отработка применения в промышленных условиях и развитие цифровой ДДА-технологии ИГТМ на рудниках Украины и России началось с 1995 года после проведения постановочных экспериментов на руднике Таймырский Норильского ГМК. Электронная часть аппаратуры была собрана по классической схеме, рис. 2 [14, 15].

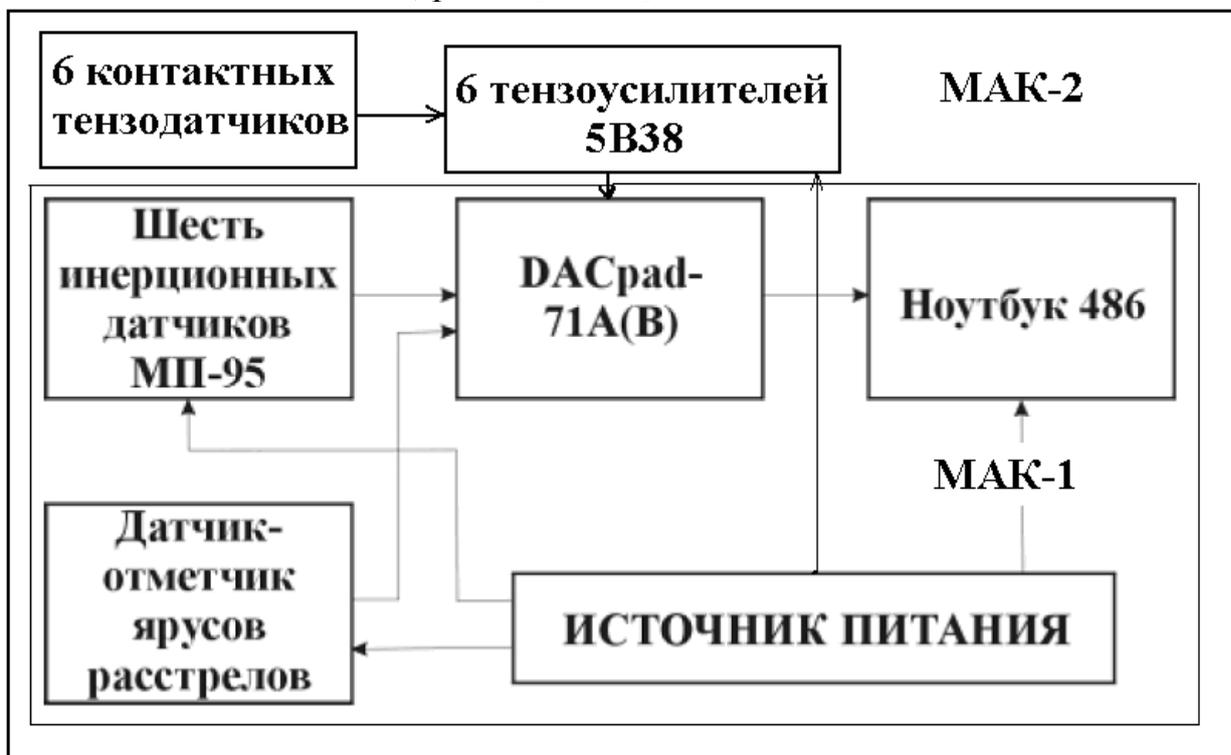


Рис. 2 - Блок-схемы электронной части комплектов аппаратуры «МАК-1» и «МАК-2» 1997-2003 г.

Исторически работы по созданию мобильного варианта системы диагностики армировки в ИГТМ явились развитием работ по созданию стационарной системы диагностики консольной армировки для стволов Норильского ГМК и шахт Украины в конце 80-х начале 90-х годов. Их итогом была разработка Тех-

нического задания на АС «ТЕРАКОД», утвержденного в установленном порядке в системе Минуглепрома Украины в 1992 г.

Кроме самостоятельного назначения эта система была составной частью разрабатываемых компьютерных систем управления подъемными установками нового типа для работы с глубины 2300 м в Норильске и карьерах Якутии глубиной до 700 м в 1990-1994 гг., которые не получили дальнейшего развития в силу технико-экономических условий того времени. Научные разработки, математическое и программное обеспечение систем контроля и диагностики во многом являются общими для стационарного и мобильного вариантов систем.

Для управления процессом измерений и записи данных в мобильной системе в разное время использовались ноутбуки типа АТ-486: стандартный фирмы «Amtra» и планшетный фирмы «Comras», работающие под операционной системой DOS. Для связи с датчиками использовался 8-ми канальный контроллер фирмы DACrad-71B «Advantech» с аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который подключался через порт РСМСІА к компьютеру, а через внешний блок разъемов к датчикам. В качестве динамических датчиков, использовались промышленные измерители линейного ускорения типа МП-95 (комплект «МАК-1»).

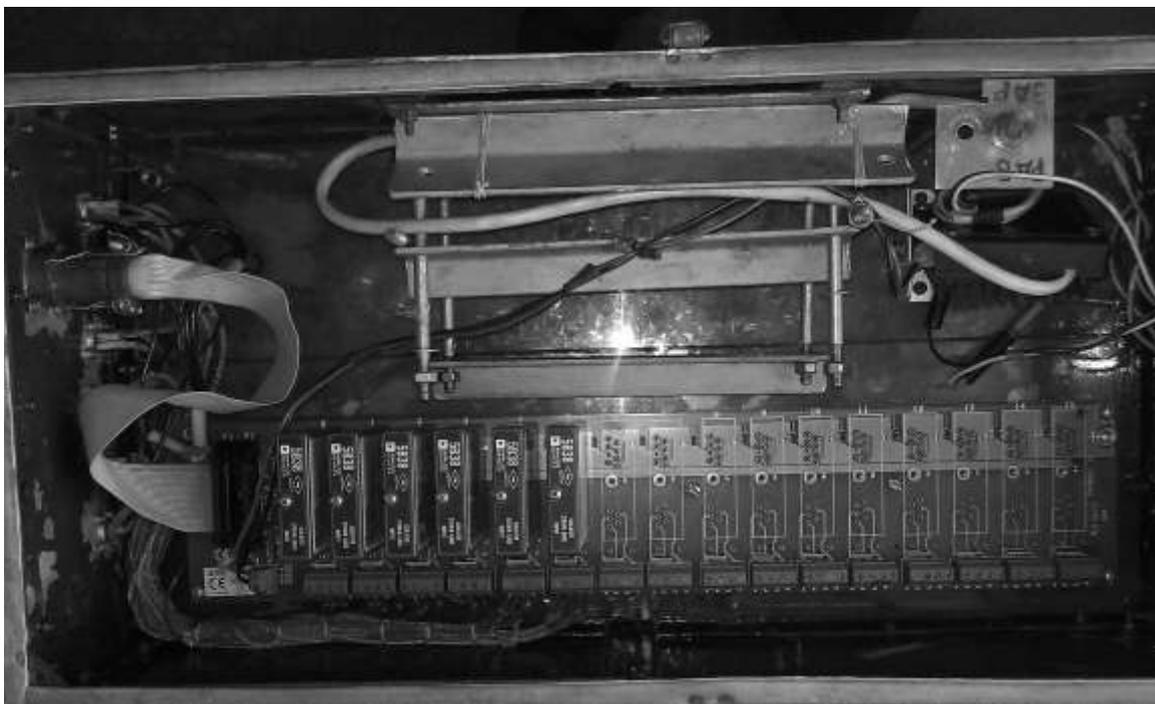


Рис. 3 - Блок тензоусилителей с модулями 5В38 в защитном корпусе

Для непосредственного измерения контактных усилий к ПЭВМ подключался второй контроллер DACrad-71A, комплект 6-ти тензоусилительных модулей типа 5В38 фирмы «Advantech», размещенных на 16-ти канальной плате (рис. 3) и комплект 6-ти тензодатчиков, разработанных и изготовленных по спецзаказу фирмой «Метриком», которые перед измерениями на стволе встраивались в специальные гнезда, выточенные в корпусах рабочих башмаков сосуда. Рабочее название комплекта с акселерометрами - МАК-1, а с блоком тензоусилителей и силоизмерительных датчиков - «МАК-2».

В качестве индикаторов расстрелов в разное время применялись промышленные механические датчики, магнитные датчики ДПУ-1-100, инфракрасные датчики, разработанные специалистами института НИИТМ, которые в последствии, в силу естественного износа, были заменены датчиками итальянской фирмы «Carlo Gadzoni».



Рис. 4 - Экспериментальный комплект аппаратуры МАК-2 в копре перед монтажом на подъемном сосуде (2003 год).

Следует отметить, что электронная часть цифровой аппаратуры (как и аналоговый осциллограф) с большим запасом по параметрам является универсальной по отношению к набору решаемых задач измерений и превращается в специализированный программно-аппаратный комплекс (ПАК) в зависимости от конкретного набора подключаемых к ней датчиков и управляющего программного обеспечения, которые определяются при разработке методики обработки данных и задаются методикой измерений.

Для использования данного комплекта в решении задач измерения динамических параметров систем «сосуд-армировка» было разработано специальное программное обеспечение (ПО), которое позволяло с клавиатуры компьютера и через выносной пульт на длинном кабеле в стволе управлять процессом записи показаний датчиков в бинарном коде на жесткий диск с заданной частотой опроса, программно регулировать эту частоту, визуализировать на мониторе осциллограммы сигналов с датчиков в развертке по времени (режим цифрового осциллографа) как непосредственно во время работы, так и с записанного при измерениях файла данных. В частности ПО позволяло производить управление остановкой работы с клавиатуры или сенсорной панели компьютера не вынимая его из защитного корпуса, что не было первоначально предусмотрено его конструкцией.

В связи с выходом в 2004 г постановления Кабинета Министров Украины № 687 «О порядке проведения обследований объектов повышенной опасности», был приобретен и используется до настоящего времени при работах на рудниках промышленный образец цифровой аппаратуры для измерения вибраций, разработанный специализированной организацией, занимающейся изготовлением и обслуживанием аналогичной техники (электронная часть разработана и изготовлена НПП «Ракон», программное обеспечение разработано ИГТМ НАНУ).

В настоящее время современный вариант технологии реализован в программно-аппаратном комплексе «ТехноМак», включающим измерительную станцию 4-го поколения, с записывающим блоком на базе процессора Intel Atom, работающего под управлением системы Windows, и 16-ти канального аналого-цифрового преобразователя USB-4711 фирмы «Advantech». Станция имеет встроенную плату тензоусилителей и способна проводить высокоскоростную запись с различных комплектов датчиков (акселерометров, тензодатчиков и пр., частота опроса датчиков в обычном режиме 550-950 Гц). Вычислительные мощности встроенной ПЭВМ дают возможность в промышленных условиях при проведении испытаний оперативно проводить предварительную обработку данных вести контроль качества записи и др. [16].

В части управления работой электронной части аппаратуры и обработки данных оригинальной разработкой является программное обеспечение, которое управляет работой системы «ПЭВМ-АЦП» и обеспечивает опрос измерительных каналов, на которые приходят аналоговые сигналы с датчиков и пульта управления, запись данных на жесткий диск с заданной частотой и обработку сигналов управления, научно-методическое обеспечение, алгоритмы и программы системной обработки и анализа данных, специальных динамических и прочностных расчетов. Программное обеспечение непрерывно совершенствуется при переходе на более современные электронные модули и расширении состава решаемых задач.

В настоящее время в Украине и странах СНГ цифровая ДДА-технология стала использоваться и в других организациях при промышленных обследованиях стволов.

С 1999 года на шахтных стволах донецкого региона эксплуатируется цифровая маркшейдерская станция СИ-5М с записью данных на встроенный ноутбук [17]. Ее принципиальная схема была аналогична схеме аппаратуры ИГТМ, только в качестве первичных измерительных преобразователей использовались датчики угловых и линейных перемещений. Станция применяется для профилировки проводников жесткой армировки стволов.

С 1995 года на угольных и рудных стволах стран СНГ и за рубежом применяются взрывобезопасная цифровая измерительная аппаратура московской фирмы «ИНТРОН» для контроля проводниковых, головных и уравнивающих канатов «ИНТРОС» в записью результатов измерений с показаний магнитных датчиков на встроенный контроллер и визуализацией на мониторе ПЭВМ [18].

Интересным фактом в истории создания аппаратуры для динамической диагностики армировки является то, что ее первые экземпляры изготавливались в

Германии в середине прошлого века на базе штатных трехканальных регистраторов износа стальных канатов путем подключения к их входам акселерометров. С появлением портативных компьютеров и аналого-цифровых преобразователей записывающая техника стала универсальной.

В 2007 г ООО «Региональный канатный центр» (Пермь, Россия) применил собственные цифровые регистраторы «МАК-РКЦ» и «Ветлан» при совместном обследовании по методике ИГТМ рудоподъемного ствола ПО «Уралкалий» с высокоскоростной цифровой регистрацией показаний 6-ти акселерометров и 4-х тензоизмерительных узлов, установленных на корпусе скипа, диаграммы скорости, глубинной координаты сосуда, тока якоря и тока возбуждения электропривода [19].

С 2008 года институт БЕЛГОРХИМПРОМ на соляном руднике Беларуськалий (Белоруссия) начал применять собственный высокоскоростной цифровой измерительный комплекс АСКА1 с четырьмя акселерометрами и шестью датчиками зазоров [20].

С 2010 года цифровую регистрацию показаний динамических датчиков аппаратурой собственной разработки использует институт НИГРИ при диагностике армировок на рудниках Кривбасса.

Следует отметить, что во всех описанных случаях применяемая аппаратура компоновалась из промышленных приборов, смонтированных в одном или нескольких защитных корпусах. Задачи согласования между собой различных компонентов решались стандартными способами.

Оригинальными техническими разработками являлись, в основном, первичные разрабатываемые под конкретные условия применения силоизмерительные датчики, путевые датчики-отметчики ярусов, которые разрабатывались по заказам специализированными фирмами-разработчиками, пульта включения/выключения записи и конструкции их крепления на сосудах, защитные корпуса и кабельная сеть собственного изготовления.

Возможность использования стандартной цифровой электроники для нестандартных задач в условиях шахтных стволов объясняется опережающим развитием измерительно-регистрающей техники, ориентированной на эксплуатацию в сходных условиях в других отраслях, и возможностью применения в научных работах лучших образцов, имеющих в наличии у исследователей-горняков в каждый конкретный отрезок времени в зависимости от их финансовых возможностей.

Многолетний опыт работы показал, что для условий шахтных стволов вполне достаточно использования имеющихся на современном рынке комплектов цифровых электронных приборов, стандартным образом подключенных к портативному компьютеру или контроллеру с достаточным объемом памяти, и оригинального управляющего программного обеспечения, которое разрабатывается и изготавливается на основе требований специальной научно-методической документации под конкретный объект исследования и комплекты навесных датчиков.

Основные проблемы, требующие появления новых научных разработок, до сих пор находятся в области создания методического, нормативного обеспече-

ния, определяющего порядок и критерии интерпретации полученных данных измерений, их математической обработки, расчетов, необходимых для определения вида технического состояния систем «сосуд – армировка» и прогноза его изменения в заданных технологических условиях эксплуатации, алгоритмического и программного обеспечения для автоматизированного выполнения работ.

Промышленное применение цифровой многопараметрической регистрации на большом количестве разнообразных стволов, в частности, показало, что применение дискретных датчиков-отметчиков ярусов, которые использовались в начальной фазе исследований в качестве средства привязки показаний динамических датчиков к номерам ярусов армировки, при использовании программной обработки данных дает большую погрешность по адресу. Это вызвано тем, что в разных отделениях стволов трудно найти вертикальную плоскость, в которой бы количество горизонтальных балок, на которые реагирует датчик, в точности совпадало с числом основных расстрелов, отмеченных и пронумерованных в паспорте ствола, из-за наличия промежуточных вспомогательных расстрелов, конструкций отшивки скиповых и клетевых отделений в районах дозаторов и пр. Их учет и коррекция возможны только при ручной обработке одной - двух осциллограмм, примеры которых приведены на рис. 1.

Цифровая регистрация дала возможность одновременно с показаниями динамических датчиков вести синхронную запись диаграммы скорости подъема в развертке по времени в цикле. Это позволило нам разработать специальный математический алгоритм и создать программный модуль, который выполняет интегрирование диаграммы скорости, строит функцию зависимости глубиной координаты сосуда от времени, совмещает показания динамических датчиков и данные маркшейдерской профилировки с глубинными отметками и «привязывает» их к номерам ярусов.

Такой подход позволил наглядно представить результат и выполнить математический анализ влияния геометрических параметров профилей системы проводников, расстояний между ярусами, формы диаграммы скорости подъема на фактические поярусные значения динамических параметров системы «сосуд-армировка» и др. и получить ряд новых качественных и количественных результатов, объясняющих сложное поведение систем «сосуд-армировка» в ударно-циклических режимах движения.

### **Некоторые результаты экспериментальных исследований**

Все авторы аппаратурных измерений в стволах отмечали, что сосуд при разных проездах на одном и том же пролете может дать динамическую реакцию от нулевой амплитуды до пикового значения. При этом в стволе можно выделить участки, на которых в серии проездов пиковые нагрузки будет намного больше, чем на других. Процесс считался случайным, обладающим некоторыми вероятностными характеристиками. В некоторых работах он был квалифицирован как стационарный эргодический, для определения статистических характеристик которого, достаточно проведение одного испытания [3].

Использование цифровой измерительной техники позволило перейти к со-

зданию имитационных цифровых вычислительных процессов (моделей) со «встроенными» функциями внешних воздействий. Анализ их результатов позволил полнее раскрыть физическую природу динамического взаимодействия сосудов с проводниками, играющими роль упругих ограничителей с искривленной поверхностью [21, 22].

Выбор конструкции и параметров шахтного скипа производится по специальной методике, исходя из критериев обеспечения заданной производительности подъема [23]. Согласно той же методике выбирается конструкция и параметры жесткой армировки по критерию динамической устойчивости по отношению к параметрическому возбуждению, вызванному периодичностью опорной жесткости проводников по глубине ствола.

Для одного и того же типа скипа различные конструкции армировки могут удовлетворять критериям устойчивости с различными коэффициентами запаса. Их жесткости (в пролетах и в ярусах) в разных стволах могут существенно различаться между собой в несколько раз. Кроме того, они могут существенно различаться для двух противостоящих проводников одного сосуда из-за наличия вспомогательных упоров в конструкциях ярусов армировки. Для основных рудоподъемных стволов Украины эти жесткости лежат в пределах от  $0,27 \times 10^4$  до  $1,89 \times 10^4$  кН/м [24].

При длительной эксплуатации, превышающей 30-50 лет, профили проводников в результате большого количества ремонтов и сдвижения горных пород приобретают форму пространственно искривленной линии. Движение подъемных сосудов по паре таких упругих проводников носит ударный хаотический характер. Это обусловлено тем, что малые различия в углах наклона проводников на разных ярусах, параметрах диаграмм скорости подъема, загрузки, расстояний между ярусами армировки, опорной жесткости проводников приводят к непредсказуемо большим разбросам в контактных нагрузках и точках их приложения к проводникам на протяжении одних и тех же коротких участков ствола длиной в 2-3 высоты сосуда.

Такая реакция происходит из-за того, что в относительном движении рабочие поверхности проводников набегают на жесткие направляющие башмаки сосуда, горизонтально колеблющегося на упругих роликоопорах, с некоторой скоростью, а соударение может происходить по набегающей грани переднего фронта излома профиля или отклоняющейся грани заднего фронта в точке с неопределенной глубинной координатой. Даже на протяжении одного шага армировки соударение может происходить как в середине пролета, так и ближе к его концам в районах опорных ярусов.

На рисунке 5 представлена схема, позволяющая объяснить физическую природу появления большого разброса амплитуд контактных нагрузок на одних и тех же ярусах в системе «сосуд-армировка» в разных рабочих циклах спуска/подъема.

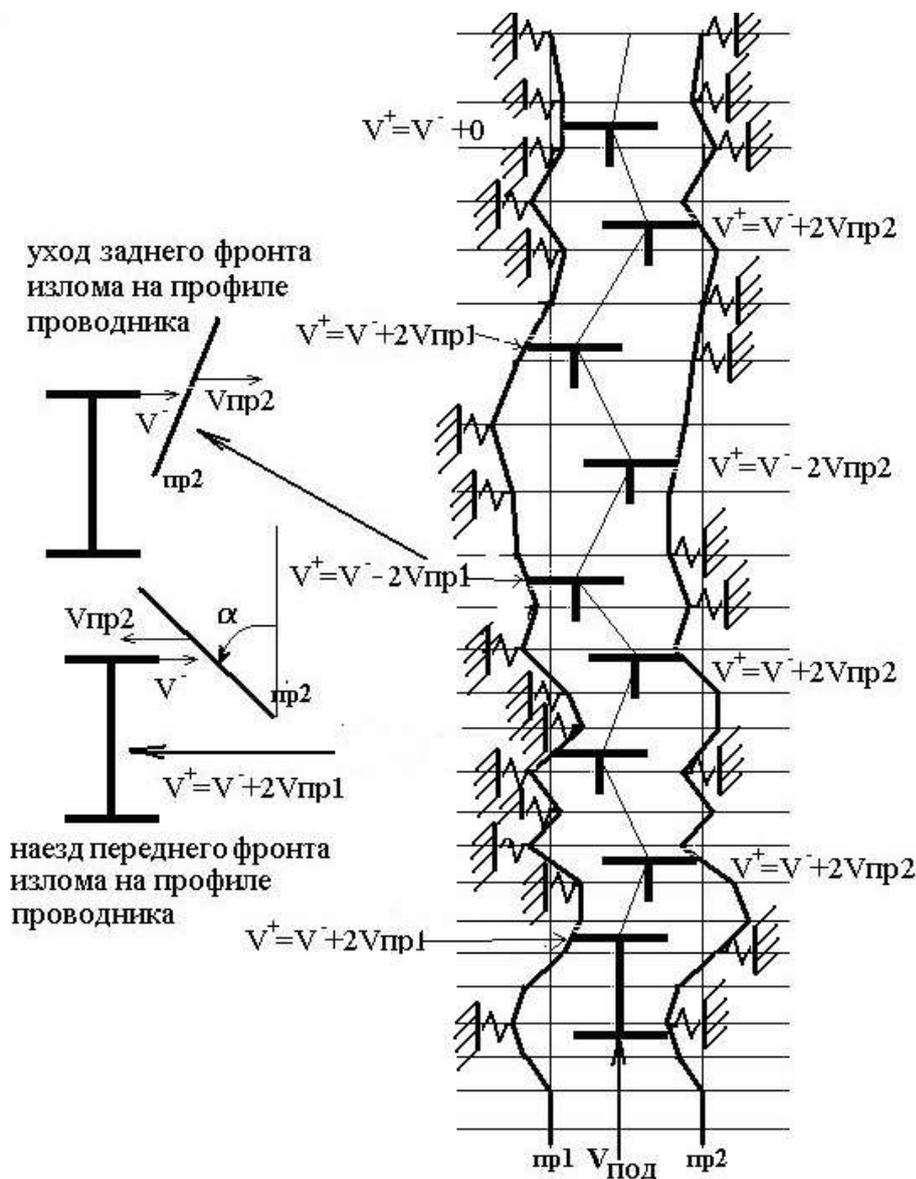


Рис. 5 - Кинематическая схема лобового взаимодействия жестких направляющих верхнего пояса подъемного сосуда с упругими проводниками на участках искривления профиля (случай абсолютно упругого соударения).

Приняты обозначения:  $V$ ,  $V^+$  - соответственно скорости башмака до и после ударного контакта,  $V_{пр1}$ ,  $V_{пр2}$  - скорости набегания на сосуд 1-го и 2-го проводников в пролете между ярусами относительно крепи ствола,  $\alpha$  - угол наклона проводника в пролете к вертикали,  $V_{под}$  - вертикальная скорость подъема сосуда.

Такая же картина взаимодействия происходит одновременно и на нижнем поясе сосуда. Кроме того, качественно идентично происходит взаимодействие башмаков с проводниками в боковой плоскости проводников. Отличие последнего случая только в том, что там набегающая и отклоняющаяся грани принадлежат одному и тому же проводнику.

Среди ярусов с набегающими передними фронтами наиболее «энергетичными» (добавляющими энергию сосуду при ударе), являются пролеты с наибольшим углом отклонения от вертикали. На участке движения с максимальной скоростью эти пролеты будут иметь наибольшую скорость набегания

проводника на башмак. Параметром, характеризующим эту скорость, является кинетическая энергия возмущений [22].

Если длина участка ствола с постоянным углом наклона проводника меньше длины пути, который сосуд проходит по вертикали за период между двумя последовательными соударениями (период горизонтальных колебаний в ударном режиме), то в зависимости от фазы колебаний, с которой сосуд попадает на участок с изломами профиля, этап сближения и соударения башмака с проводником может попасть на любой из пролетов с набегающими или отходящими гранями проводников. Например, на участке с максимальной скоростью 10 м/с при шаге армировки 3 м и частоте колебаний 1 Гц базовый участок занимает 3,3 яруса.

В в середине пролета жесткость проводника минимальная, а в области крепления к расстрелам – максимальная [23], поэтому динамическая реакция ударного взаимодействия даже на протяжении одного пролета будет зависеть от локальной опорной жесткости проводника в точке контакта и может отличаться в несколько раз. Чем больше опорная жесткость проводников, тем большую энергию возмущения передает искривленный профиль сосуду.

Так как проводники являются для сосуда упругими ограничителями колебаний и одновременно их возбудителями, то при наличии упругих амортизаторов полное колебание будет являться суперпозицией собственного и вынужденного колебаний и, даже при постоянной на участке вынуждающей частоте, будет гармоническим только в случае кратного соотношения частот [25, 26]. Кратное сочетание частот на длительном интервале времени практически невозможно в силу переменности параметров профиля по глубине ствола и является еще одной физической причиной хаотичности характера динамического взаимодействия сосудов с проводниками жесткой армировки.

В том случае, когда сосуд попадает на участок длительной серии соударений с противоположащими набегающими гранями проводников, горизонтальная скорость его перемещения в колее возрастает от удара к удару. Так как кинематический зазор остается в одних и тех же пределах, то время между ударами по противоположащим граням проводников уменьшается, а частота ударов растет.

Обратный процесс происходит, когда сосуд выходит из участка с интенсивными соударениями и повышенной частотой колебаний. При переходе на участок со спрямленным профилем энергия колебаний за счет рассеивания уменьшается, что приводит к соответствующему уменьшению амплитуды усилий и частоты колебаний.

Таким образом, частота ударно-колебательного процесса является амплитудно-зависимой величиной. Она растет с ростом амплитуды контактных усилий и скорости перемещения сосуда в створе проводников (кинетической энергии горизонтального движения сосуда).

Было установлено, что малые изменения в функциях загрузки сосуда, характера диаграммы скорости (диаграмм, имеющих малые отклонения (до 5-7%) по амплитуде мгновенной скорости и ее глубинной координате, отклонения центра тяжести от вертикальной оси подвеса сосуда на канате), приводят к отклонениям в дальнейшем горизонтальном поведении сосуда на одном пролете в не-

сколько раз (нагрузки непредсказуемо могут меняться от 0 кН до 100-200 кН на разных циклах). При этом динамическая реакция башмака сосуда на  $i$ -м пролете определяется его фазой по относительной скорости к грани проводника на предыдущем пролете.

Такой процесс является хаотическим, и только серия длительных аппаратурных измерений может выявить наиболее «вероятные» изменения в выходной реакции сосуда в данных промышленных условиях. При этом всегда остается некоторый риск в том, что в какой-то момент времени на систему будут поданы не проявившиеся ранее воздействия, и ее реакция окажется сильнее по усилиям, чем на предыдущих испытаниях. Это подтверждается тем, что при динамических испытаниях нами многократно фиксировались случаи, в которых на одном и том же пролете какой-то один проезд на пониженной скорости давал в несколько раз большие динамические нагрузки, чем все остальные проезды на скорости в 1,5 - 2 раза большей.

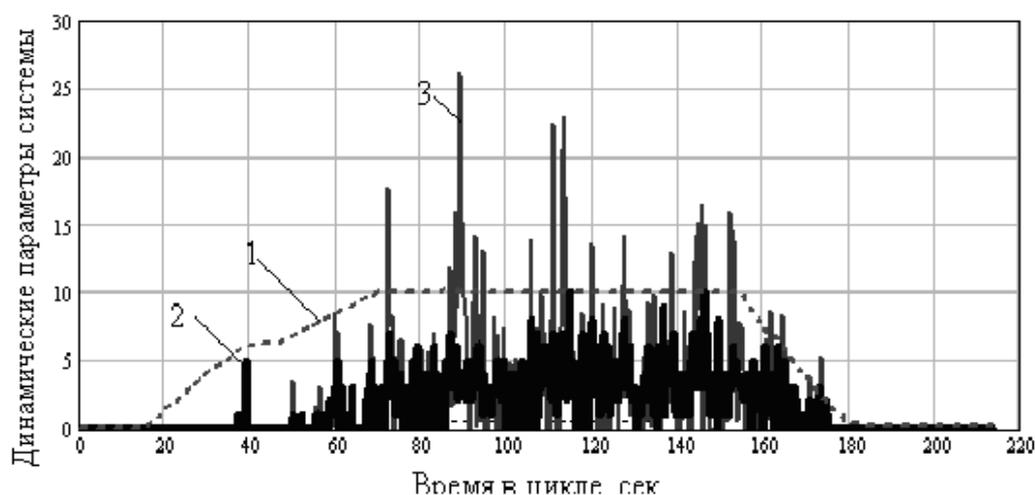
Значения амплитуд пиковых реакций сосуда будут тем большими, чем больше углы наклона проводников в пролетах. При стабильной работе системы управления ШПМ и загрузки сосуда внешние воздействия на сосуд будут максимально идентичными на всех рабочих циклах, поэтому аппаратурная динамическая диагностика, в таких условиях, выявит наиболее вероятную серию откликов системы и выявит реализующиеся на них максимальные динамические перегрузки. Такую стабильность могут реализовать цифровые системы управления скоростью и контроля загрузки.

Измерения и расчеты показывают, что пиковые нагрузки хоть и с различной амплитудой, но концентрируются вокруг одного двух пролетов на серии однотипных проездов или на более протяженном участке в 5-10 ярусов. В некоторых стволах они распределены по глубине более-менее равномерно с близкими амплитудами, в других приурочены к одному или нескольким коротким участкам.

Амплитуды усилий могут быть близкими к предельно допустимым по критериям прочности армировки либо в боковой, либо в лобовой плоскости. Особенно это характерно для рельсовых проводников, у которых из-за большой разницы (в 5 раз) в лобовых и боковых моментах сопротивления, нагрузки одного уровня могут быть допустимыми в лобовой плоскости и запредельными в боковой, о чем писал еще проф. Е.С Кричевский, говоря о не целесообразности использования рельсового проката в качестве шахтных проводников [7].

Элементы контактирующей пары «башмак-проводник» можно квалифицировать по их роли в динамическом процессе следующим образом: проводник – это активное воздействующее звено (АЗ), башмак – пассивное возмущаемое звено (ПЗ). Как показано выше, активное звено при ударном контакте может накачивать энергию в движение системы «сосуд-башмак», в этом случае оно будет возмущающим звеном (АВЗ), а может и поглощать энергию этой системы, в этом случае оно будет поглощающим звеном (АПЗ). В случае контакта с нулевой горизонтальной скоростью проводника (случай вертикального пролета) активное звено будет нейтральным по отношению к процессу изменения энергии сосуда (АНЗ).

Так как работа подъемной установки является циклическим процессом спуска/подъема по одной и той же трассе движения, то сосуд за время одного проезда совершает конечное число ударных взаимодействий с проводниками. Их число может изменяться от нуля, при реализации проектного безударного режима движения, до некоторого максимально возможного значения, которое определяется интенсивностью нарастания амплитуды контактных нагрузок. В свою очередь, эта интенсивность тем больше, чем большее число раз башмаки столкнутся с набегающими гранями проводников в режиме АВЗ.



1- скорость подъема, м/с; 2 – число ударов на одном пролете армировки;  
3- максимальная амплитуда ударных нагрузок, кН

Рис. 6 - Сводный график динамических параметров системы «скип-армировка» ш. им. Фрунзе.

На рисунке 6 приведен сводный график скорости подъема груженого скипа, распределения числа ударов по паре противостоящих проводников двумя верхними башмаками, амплитуды ударных нагрузок на каждом пролете между ярусами армировки, полученный на основании обработки данных аппаратурных динамических испытаний системы «скип-армировка» ш. им. Фрунзе ЗАО «Евраз Сухая Балка».

Очевидно, что максимально возможная накачка энергии будет соответствовать случаю, когда все рабочие грани башмаков, расположенные в одной плоскости (в лобовой - 4 грани, в боковой - 8 граней) будут при каждом полупериоде колебаний сосуда в зазоре по соответствующей степени свободы вступать в контакт с проводником в режимах АВЗ.

Из рисунка видно, что наибольшие значения частоты и амплитуды ударов приходятся на участок движения с максимальной скоростью. По кривой 2 видно, что максимальное число ударов по пролету проводников верхним поясом скипа находится в интервале от 5 до 10. По кривым 2 и 3 видно, что наибольшее число ударов (10) с максимальной амплитудой в данном подъеме испытывают пролеты проводников, которые скип проходит на интервале времени 115-128 сек. Такое же число ударов испытывают пролеты, которые скип проходит между 142 сек и 150 сек, но амплитуда нагрузок на них на 25% меньше.

Кроме того, видно, что на 40-й секунде подъема в результате излома на диа-

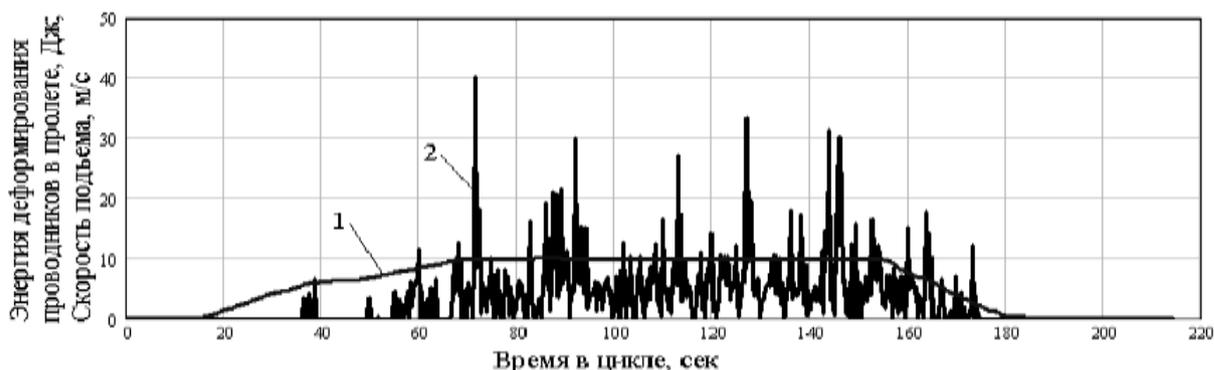
грамме скорости, вызванным неплавной работой подъемной машины, на соответствующем пролете армировки возбуждается ударный режим взаимодействия скипа с проводниками, в течение которого они испытывают 5 жестких ударов с незначительной амплитудой контактных нагрузок. Такое же явление видно и на участке замедления с изломом диаграммы скорости между 160 сек и 170 сек (число ударов 5-7, амплитуда нагрузок до 8 кН).

Это говорит о том, что разные пролеты ярусов за время одного проезда сосуда будут испытывать различные суммарные ударные воздействия, которые, главным образом, определяют их остаточный ресурс по усталостной долговечности металла и скорость их механического износа.

Для ранжирования динамического воздействия на армировку по данным аппаратурных испытаний удобно определить суммарную энергию ударных сил, которую сосуд передает проводникам в каждом пролете, как сумму потенциальных энергий упругого деформирования пролета во время каждого удара. Средняя жесткость пролета  $C_{арм}$ . В этом случае суммарная потенциальная энергия на  $i$ -м ярусе определяется по формуле

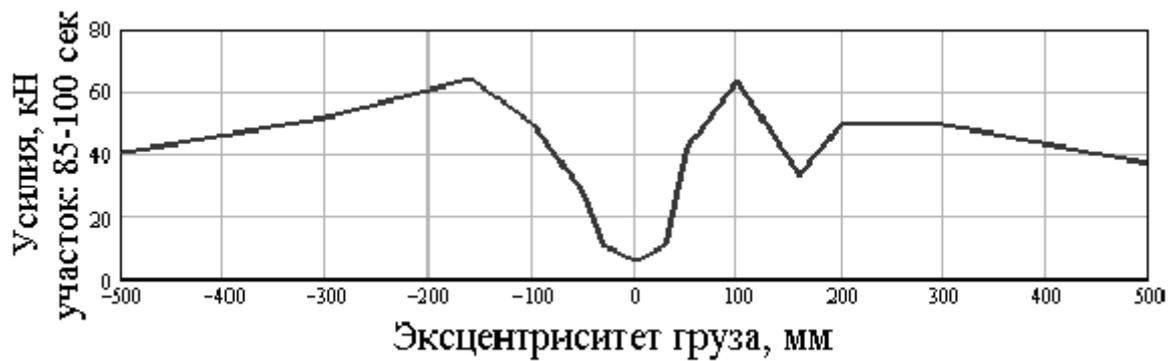
$$P_i = \frac{1}{2 \cdot C_{арм}} \cdot \sum_{k=1}^{N_i} F_{k,i}^2,$$

где  $P_i$  - суммарная потенциальная энергия упругого деформирования проводника на  $i$ -м пролете в течение  $N_i$  ударов с максимальным усилием  $F_{k,i}$ . ( $k$ -порядковый номер удара в пролете). На рис. 7 приведены графики скорости подъема скипа и суммарной энергии, полученной пролетами проводников армировки, в развертке по времени в цикле для того же ствола.

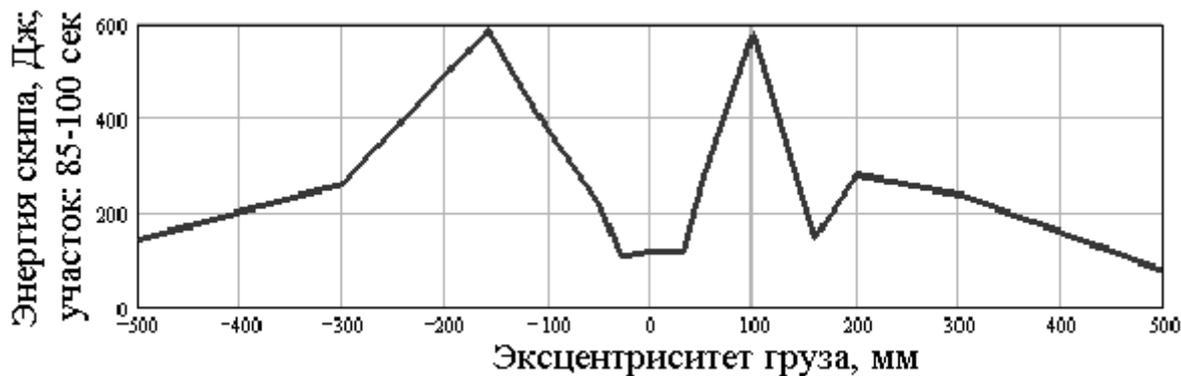


1- скорость подъема, м/с; 2- энергия деформирования проводников в пролете, Дж

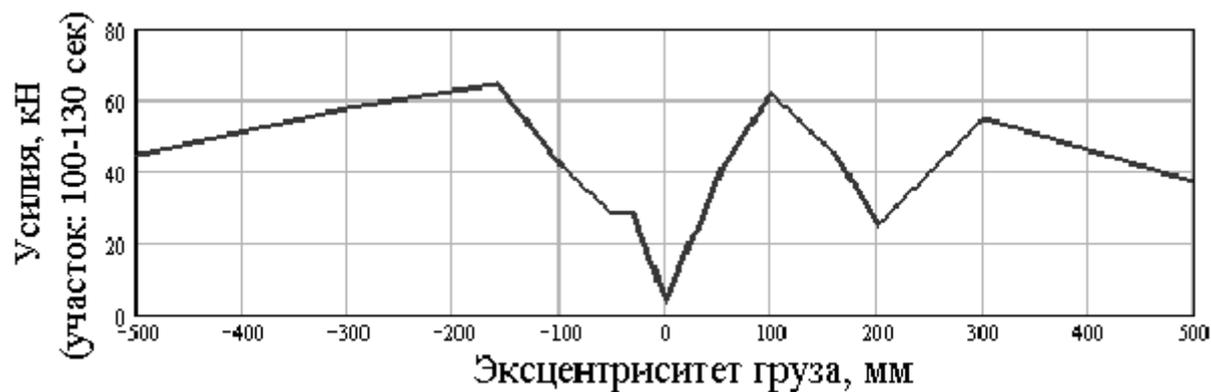
Рис. 7. Графики распределения энергии деформирования проводников и скорости подъема в развертке по времени в цикле для скипа ш. им. Фрунзе



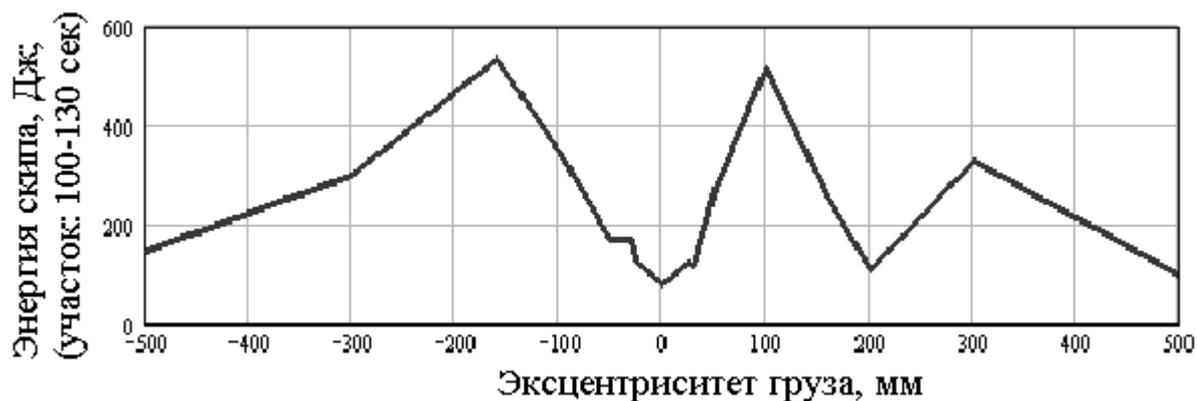
а)



б)



в)



г)

Рис. 8 - Графики зависимостей от эксцентриситета груза: (а) усилий на участке подъема 85-100 сек; (б) кинетической энергии скипа на участке 85-100 сек; (в) усилий на участке 100-130 сек; (г) кинетической энергии на участке 100-130 сек для скипа ствола ГС-1 ЗАО ЗЖРК

Сравнение графиков на рисунках 6 и 7 показывает, что пролеты проводников, на которых реализуются максимальные амплитуды динамических нагрузок, не обязательно будут являться таковыми по количеству суммарной энергии, передаваемой сосудом проводникам во время одного цикла подъема. Это происходит потому, что число ударов на разных пролетах различно. В случае максимальных амплитуд нагрузок возможно снижение частоты ударов, что может привести к соответствующему уменьшению полной энергии, передаваемой проводникам.

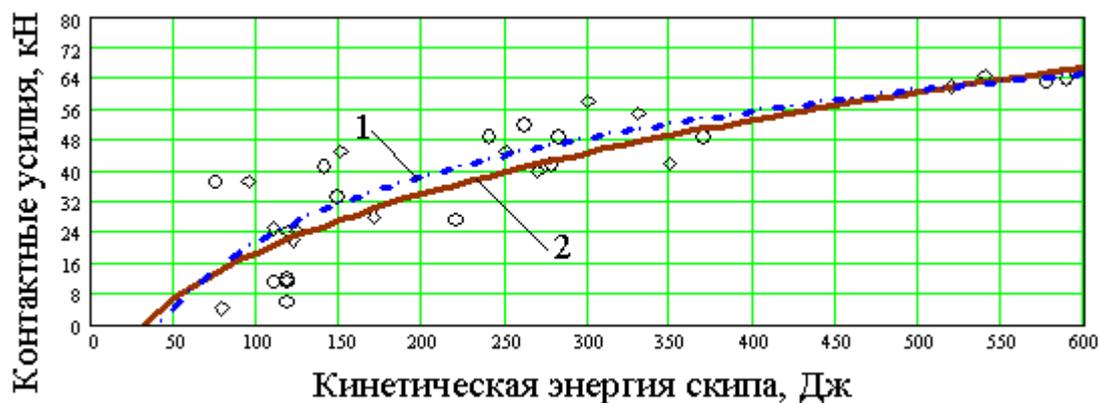
Параметр «полная энергия ударов» может являться самостоятельной характеристикой динамической нагруженности элементов армировки на каждом ярусе для прогноза их долговечности (наряду с максимальным значением ударной нагрузки в пролете, которое служит для определения минимального мгновенного остаточного запаса прочности элементов яруса).

Экспериментальные исследования в промышленных условиях не всегда позволяют получить достаточно полный набор данных, для установления требуемых зависимостей, так как определение некоторых параметров представляет настолько большие технические и организационные трудности, что делает их экономически нецелесообразными. Одной из таких задач является изучение влияния эксцентриситета груза в скипе на динамические параметры системы «сосуд-армировка». В этом случае используется математическое моделирование со «встроенными» в дифференциальные уравнения движения табличными функциями изменения требуемых параметров (диаграммы скорости, профилей проводников, глубинных координат ярусов) в развертке по времени движения сосуда, полученными путем аппаратурных измерений в промышленных условиях.

Проведенные путем математического моделирования исследования изменения кинетической энергии сосуда и контактных нагрузок на армировку в основной (лобовой) плоскости проводников в течение рабочего цикла с учетом эксцентриситета груза в сосуде для параметров породного скипа в стволе ГС-1 ЗАО ЗЖРК при максимальной скорости 11 м/с показали, что зависимости пиковых значений усилий и кинетической энергии от эксцентриситета груза качественно имеют одинаковый характер (рис. 8). Численные исследования показали, что зависимость между ними описывается функцией вида (рис. 9)

$$F(Ec) = a \cdot (Ec)^b + c ,$$

где  $F$  - максимальное на участке контактное усилие по всем 4-м башмакам скипа, кН;  $Ec$  - кинетическая энергия скипа, Дж,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты регрессии.



1- участок ударного взаимодействия 85-100 сек  
 2 – участок ударного взаимодействия 100-130 сек

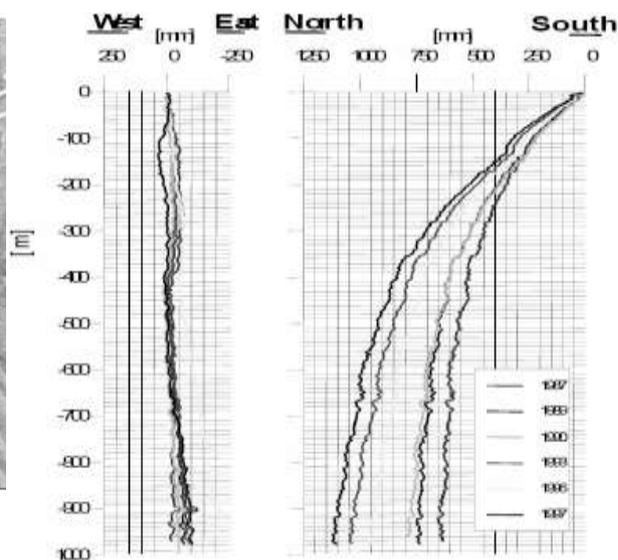
Рис. 9 - Регрессионные кривые зависимости контактных усилий от кинетической энергии скипа на участках ударно-циклического взаимодействия в лобовой плоскости проводников.

### Перспективы развития автоматизированной динамической диагностики и мониторинга состояния армировки стволов

Состояние стволового оборудования в состоянии сильного износа и повышенных нагрузок делает чрезвычайно актуальной задачу непрерывного мониторинга его технического состояния. В свою очередь, чтобы работа была выполнимой за рациональный промежуток времени, и позволяла непрерывно отслеживать изменение ключевых параметров, реализация такого мониторинга должна опираться на соответствующую технику, которая позволяет быстро и достоверно измерить необходимые параметры, научно-методическое и программное обеспечение, которые позволяют рассчитать требуемые параметры безопасности.



а)



б)

Рис. 10 - Результаты лазерного сканирования армировки ствола [28]: программный образ армировки и крепи (а), графики изменения профиля оси ствола за несколько лет по результатам лазерного сканирования (б).

На сегодняшний день существует и постоянно применяется комплекс динамического сканирования систем «подъемный сосуд - армировка» «ТехноМак»

ИГТМ НАН Украины [27], за рубежом появились комплексы лазерного статического сканирования стволового оборудования (фирма «DMT» (Германия), фирма «Сайт Пауэр Украина» (ЮАР-Украина)) [28, 29]. Динамические и статические комплексы сканирования по своему назначению и функциональным свойствам органически дополняют друг друга. Базы данных таких комплексов могут быть логически и программно взаимосвязаны между собой.

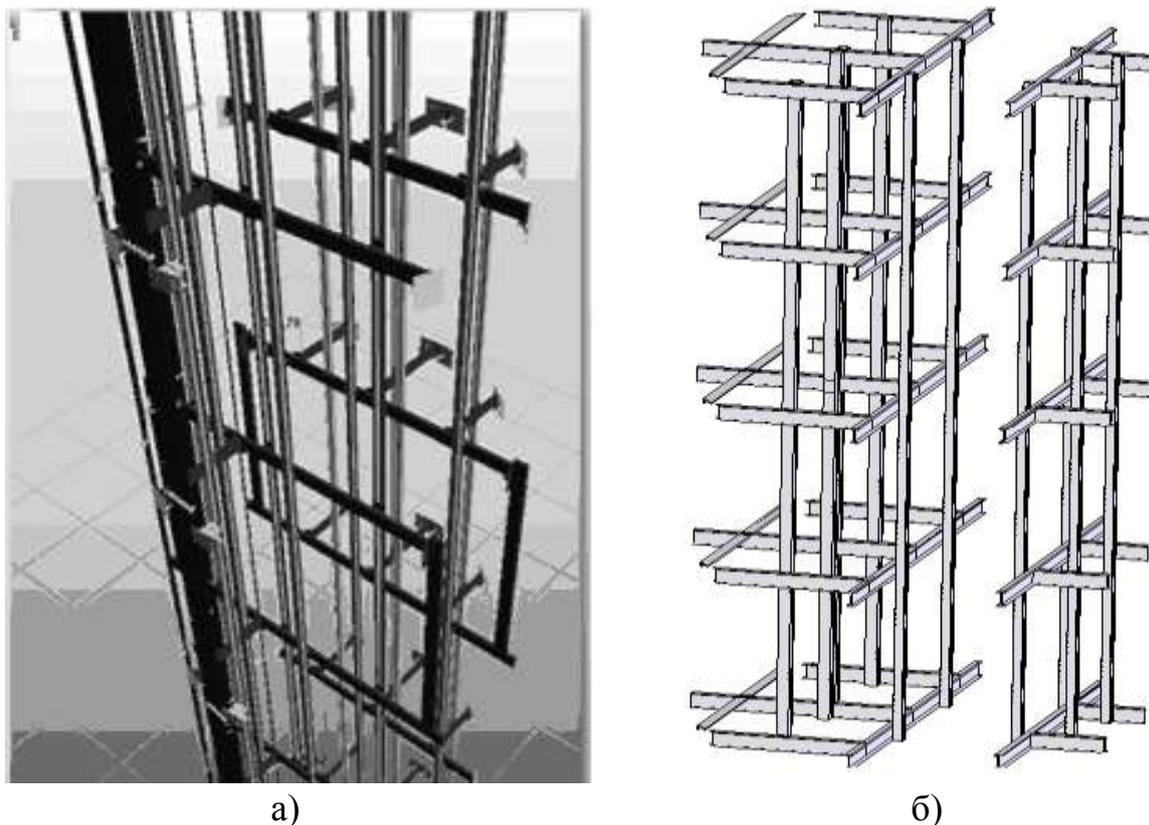


Рис. 11 - Твердотельные модели армировки шахтных стволов: (а) - построенная по результатам лазерного сканирования [29], (б) - построенная по результатам оптико-визуального обследования и данных эксплуатационной документации в «ТехноМак» ИГТМ НАНУ.

На рис. 10 и рис. 11 показаны примеры результатов применения лазерного сканирования армировки шахтного ствола [28, 29] и пример построения твердотельной модели армировки ствола в процессе динамической диагностики комплексом «ТехноМак» ИГТМ НАНУ. Видно, что конечные результаты построения твердотельных моделей, необходимых для выполнения деформационно-прочностных расчетов, идентичны между собой, но несомненным достоинством включения метода лазерного сканирования в процесс измерения параметров армировки является то, что он позволяет по данным аппаратных геометрических измерений автоматически, с минимальными затратами времени на остановку работы ствола, исключая человеческий фактор определять фактический набор (состав, координаты...) элементов металлоконструкций, которые непрерывно изменяются в процессе эксплуатации при ремонтах или реконструкции, строить твердотельные модели армировки в системах AutoCAD, SolidWorks или им аналогичных. В настоящее время эта работа выполняется вручную на основании данных оптико-визуальных обследований и эксплуата-

ционной документации.

Данные, полученные путем лазерного сканирования будут являться исходными для расчетов, выполняемых при динамической диагностике и оценке безопасности на основании данных динамического сканирования. Такой объединенный «Комплекс статодинамического сканирования» (КСДС) стволового оборудования позволит по результатам динамического сканирования оперативно выявлять аварийно опасные участки ствола, а с помощью данных статического сканирования оперативно определять изменения в их геометрических параметрах, выполнять программный расчет и более точно выявлять элементы оборудования или режимные параметры системы, «ответственные» за возникновения аварийно опасного состояния.

Это позволит более качественно вести динамическую и геометрическую паспортизацию стволового оборудования и мониторинг его безопасности в сложных горно-технических и горно-геологических условиях. В таких условиях аппаратурные динамические испытания, проводимые по специальным методикам, в сочетании с «адаптированными» к конкретным подъемам имитационными вычислительными моделями, использующими «встроенные» функции внешних воздействий, определенные аппаратурными цифровыми измерениями, являются практически единственным средством выявления и локализации максимальных динамических реакций в системах «сосуд-армирование» действующих стволов, прогноза изменения их параметров безопасности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркуша Н.Г. Об истории разрешения одной крупной проблемы горной механики XX века / Н.Г.Гаркуша // НГА України. Гірнична електромеханіка та автоматика. Зб. наук. праць. Вип. 2(61). Дніпропетровськ. – 1999. –С.5-8.
2. Временная инструкция по применению аппаратуры контроля загрузок на жесткую армировку шахтных стволов / А.Е.Гавруцкий, Г.Н. Мушинский, В.И. Костогрыз, Ю.М. Гречуха // Минчермет УССР, НИГРИ. Кривой рог. -1979. -21с.
3. Гавруцкий А.Е., Мусиенко В.Д., Осадчая Л.С. Исследование горизонтальных нагрузок на армировку в скиповом стволе Запорожского железорудного комбината №1 // Шахтное строительство. №7. 1981. с.19-21.
4. Потураев В.Н. Определение спектральных характеристик внешних горизонтальных нагрузок, действующих на шахтный подъемный сосуд. / В.Н. Потураев, А.Б. Полницкий, С.В. Карась, А.П. Мищенко, В.П. Ганжа // Киев «НАУКОВА ДУМКА». Сб. науч. тр. Вопросы подъема глубоких шахт. -1974. С.276-283.
5. Карась С.В. О горизонтальных нагрузках на коробчатые проводники армировок вертикальных стволов шахт /С.В.Карась // Уголь Украины, вып.8, 1968.
6. Гоменюк В.И. Методика и аппаратура для исследования воздействия динамических нагрузок на тьюбинговую крепь / В.И. Гоменюк, В.Г. Буторин, Ю.М. Сидоренко // Научные труды аспирантов. Пермский политехнический институт. -1970. –С.94-97.
7. Кричевский Е.С., Керский Е.К. Экспериментальные исследования динамического контроля армировки / Е.С. Кричевский, Е.К. Керский // Известия ВУЗов. Горный журнал №5. -1978. С.97-101.
8. Šebella Z. Tenzometrické měření dynamiky vícenových těžních zařízení / Uhli N 29. // Ostrava, 1981. – P. 453-461.
9. Wohlrab Manfred. Konzeption eines Geratekomplex zur Überwachung der starren Schachteinbauten und der Ober-, Führungs- und Reibseile von Schachtförderanlagen / Wohlrab Manfred, Jemlich Gunter, Nickau Lothar Neue // Neue Bergbautechn 5, №9. -1975. pp/ 697-702.
10. Hansel J., Kawka G., Plachno M. An astimation of mine conveyance guading / Mechanika. Tom 4, Zeszyt 2 // Wydawnictwo AGN. Krakow – 1985. –P.115-128.
11. Ильин С.Р. Исследование динамики шахтной подъемной установки как упругой разветвленной механической системы. / С.Р. Ильин // М. Деп. ВИНТИ. №2966-80. – 1980. – 170с.
12. Ильин С.Р. Экспериментальные и теоретические исследования спектральных характеристик колебаний подъемных сосудов шахтных многоканатных установок в режиме предохранительного торможения / С.Р. Ильин // ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика. Межвед. Сб-к науч. тр. Вып. 50, Днепропетровск.- 2004, с.234-243.

13. Бочанци Я., Лоиш Л. Исследования с целью повышения надежности и производительности горных машин // *Zeszyty naukowe politechniki slaskiej. Ser. Gornictwo. Z. 143, Gliwice -1986. – P. 59-70.*
14. Ильин С.Р. Опыт использования акселерометров для контроля процесса динамического взаимодействия между коробчатыми проводниками и направляющими клетки со ступенчатой функцией жесткости / С.Р. Ильин, В.В. Лопатин., Б.С. Послед. // *Деп. в ГНТБ Украины 03.01.95 №40-Ук95 – 1995.- 22с.*
15. Ильин С.Р. Опыт исследования рабочих режимов взаимодействия при движении подъемных сосудов в проводниках жесткой армировки / С.Р. Ильин, В.В. Лопатин., Б.С. Послед. // *Геотехническая механика Межвед. Сб-к науч. тр. Вып. 32, Днепропетровск.-2002 - С. 161-166.*
16. Ильин С.Р. Измерительно-аналитическая компьютерная технология диагностики и управления состоянием оборудования шахтных подъемных комплексов / С.Р. Ильин, Б.С. Послед, Л.Г. Адорская, С.В. Самуся, И.С. Ильина, В.П. Чернетченко, В.А. Николаев // *ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика. Межвед. Сб-к. науч. тр. Вып. 93, Днепропетровск. -2012, -с.28-38.*
17. Шевченко Е.Н. Разработка автоматизированной системы маркшейдерского контроля проводников вертикальных шахтных стволов / автореф. канд дис. // *Донецкий гос. технический ун-т. – Донецк, – 2000. – 18с.*
18. Электронный ресурс: <http://www.intron.ru/ru/o-kompanii/istorija>
19. Ильин С.Р. Динамическая диагностика состояния систем «скип-армирование» рудоподъемного ствола / С.Р. Ильин, Г.Д. Трифанов // *«Проблемы рационального природопользования». Материалы международной научно-технической конференции. - Пермь, -2008. -С.107-124.*
20. Смычкин А.Д. Совершенствование армировки вертикальных шахтных стволов для новых калийных рудников. / А.Д. Смычкин В.А. Сорокин // *Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование. Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. Под ред. А.Н.Земскова. Вып. 5. – Пермь. ООО «Проектное бюро «Рейкьявик», 2009. -64-70.*
21. Ильин С.Р. Влияние параметров диаграммы скорости подъема и эксцентриситета груза на динамику системы «сосуд-армирование» шахтных стволов / С.Р.Ильин // *Геотехническая механика: Межвед. Сб-к. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. № 98 – С. 322-349*
22. Ильин С.Р. Метод энергетической оценки влияния профиля проводников на системы «сосуд - армировка» шахтных стволов при динамической диагностике // *Геотехническая механика: Межвед. Сб-к. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. № 99 – С. 161-177.*
23. Методика расчета производительности скиповых подъемных установок при определении производственной мощности действующих шахт. Минуглепром СССР / НИИЭИ уголь, ВНИИГМ им. М.М.Федорова. / - Москва, 1984. -С. 85.
24. Ильина С.С. Влияние эксплуатационных параметров роликовых катков, жесткостных характеристик армировки вертикальных стволов на колебания шахтных подъемных сосудов / С.С. Ильина // *Стальные канаты: Сб. науч. тр. / МАИСК. – Одесса: Астропринт, 2010. №8.– С. -102.*
25. Мун Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун // *Москва. - «Мир». – 1990. -154С.*
26. Остапенко В.А. Непрерывные колебания упруго подвешенной массы с ограничителем // *Диференціальні рівняння та їх застосування: Зб. наук. пр. ДНУ. –Д., 2005. –С.21-28.*
27. Pjin S.R. The Experience Of Dynamic Apparatus Control And Estimation Of Exploitation System Safety “Vessel – Reinforcement” Of Vertical Mining Shafts // *The International Journal of TRANSPORT & LOGISTICS. ISSN-1451-107X. Kosice. 2010. –pp.395-403.*
28. Электронный ресурс: <http://www.dmt.de>
29. Электронный ресурс: <http://www.sight.power.com.ua>

Канд. физ-мат. наук В. И. Елисеев,  
инж. А. В. Кривокорытов,  
канд. техн. наук В. И. Луценко  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕТЯЖКИ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ЧАСТИЦАМИ СЫПУЧЕГО СЛОЯ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ**

Представлено результати модельних експериментів по вивченню утворення рідкої перетяжки між двома сферичними частками при опусканні вільної поверхні рідини. Показано, що в динаміці відстань між частками, при якому рідинний місток перестає утворюватися, стає в кілька разів менше ніж у статичному стані.

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CONDITIONS OF FORMATION OF A NECK OF FLUID BETWEEN THE PARTICLES OF GRANULAR LAYER DURING DEHYDRATION**

Results of model experiments to study the formation of a liquid bridge between spherical particles by reducing the free surface are presented. It is shown that distance between the particles in a dynamic state, in which the liquid bridge is ending to form is less than ones in a static state is several times.

В процессе обезвоживания сыпучего материала между частицами в зависимости от влагосодержания могут образовываться жидкие мостики (перетяжки), которые оказывают сопротивление разъединению частиц. Это сопротивление является капиллярной составляющей сил аутогезии влажного сыпучего материала, определяющих в большой степени его прочность [1]. Длина таких перетяжек зависит от количества влаги в слое, углов смачивания, пористости сыпучего материала и многих других факторов [2].

При достаточном удалении частиц друг от друга происходит разрыв перетяжки, после чего частицы становятся автономными, в результате этого расстояние между частицами растет, увеличивается пористость сыпучего материала, и влага получает лучшую возможность для выхода из пористой среды. Вследствие этого представляет интерес определить то расстояние между частицами, при котором происходит разрыв перетяжки.

В [3] было экспериментально определено расстояние между частицами сыпучего слоя, при котором существующая между ними перетяжка жидкости становится абсолютно неустойчивой по отношению к бесконечно малым возмущениям. Это дает максимальную оценку длины перетяжки сверху. Но, в процессе обезвоживания перетяжка может разрушиться намного раньше под действием конечных возмущений. Для определения влияния конечных возмущений на образование и устойчивость перетяжки и были направлены экспериментальные исследования, представленные в данной работе.