

На правах рукописи



Никитенко Михаил Сергеевич

ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СЕКЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Кемерово – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Кречетов Андрей Александрович

Официальные оппоненты:

Турук Юрий Владимирович доктор технических наук, доцент,  
Шахтинский институт (филиал)  
ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова,  
профессор кафедры «Строительство  
и техносферная безопасность»

Антонов Юрий Анатольевич кандидат технических наук, доцент,  
в настоящее время не работает

Ведущая организация: Общество с ограниченной  
ответственностью «Научно-  
исследовательский испытательный  
центр КузНИУИ» (г. Прокопьевск)

Защита состоится «10» декабря 2015 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д212.102.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово ул. Весенняя, 28, факс: (3842) 36-16-87, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2015/nik/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Семькина Ирина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Работоспособность секций механизированных крепей, рабочих органов проходческих и очистных комбайнов, другого горношахтного оборудования в значительной степени зависит от запаса прочности, заложенного при проектировании, качества изготовления, характера и величины эксплуатационных нагрузок, своевременного проведения ремонтных и восстановительных работ.

В настоящее время отсутствуют первичные измерительные преобразователи (ПИП), ориентированные на регистрацию и визуализацию распределения деформаций и напряжений элементов металлоконструкций секции механизированной крепи, для установления фактических нагрузок в процессе эксплуатации. Наличие таких преобразователей позволит повысить эффективность исследования связей и закономерностей с фактическими нагрузками для совершенствования существующих и создания новых секций механизированных крепей и их элементов.

На стадии изготовления исследования влияния воздействия эксплуатационных нагрузок на элементы металлоконструкций секции механизированной крепи проводят, измеряя фактические значения деформаций в отдельных контрольных точках при приемосдаточных прочностных статических заводских испытаниях.

При этом существующая методика тензометрического контроля при проведении заводских испытаний не позволяет оперативно корректировать место измерения деформаций исследуемой поверхности металлоконструкций, что обусловлено невозможностью повторного использования применяемых в качестве ПИП приклеиваемых тензорезисторов.

Одним из решений, позволяющих обеспечить мобильность ПИП, то есть возможность перемещать и переустанавливать его, является использование съёмного тензометрического преобразователя (СТП) с упругим элементом (УЭ). Однако включение УЭ в систему измерения значительно снижает чувствительность преобразователя.

Решение этих задач имеет высокую практическую значимость в связи с тем, что в рамках приказа Минпромторга РФ № 645 от 31.03.2015 года предусмотрено значительное снижение доли импорта горнодобывающих комплексов, оборудования и комплектующих. При этом для реализации утвержденной Правительством РФ в 2012 году Долгосрочной Программы развития угольной промышленности России на период до 2030 года ставятся задачи модернизации и обновления производственных мощностей по добыче и переработке угля с обеспечением мировых стандартов.

Таким образом, совершенствование операции контроля при прочностных статических приемосдаточных испытаниях в рамках технологического процесса изготовления механизированной крепи с целью обеспечения высокого качества является актуальной научной задачей.

## **Степень разработанности**

Определение характера и уровня нагрузок на элементы секций механизированных крепей являлось предметом исследований Александрова Б. А., Ардашева К. А., Буялича Г. Д., Глазова Д. Д., Глушихина Ф. П., Ерохина А. И., Каткова Г. А., Клишина В. И., Крохотухина А. И., Кузнецова Г. Н., Кузнецова С. Т., Леконцева Ю. М., Любимова А. Н., Медведева Е. Г., Орлова А. А., Попова В. Л., Садыкова Н. М., Трумбачева В. Ф. и др. В результате исследований, выполненных этими учёными, разработаны методы и средства оценки контактных напряжений и нагрузок на элементы секций механизированных крепей, установлены многие важные закономерности работы крепей и их элементов в различных горнотехнических условиях. Несмотря на это, анализ методов и средств определения технического состояния горношахтного оборудования свидетельствует о том, что вопрос прямой оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи до конца не решен.

**Цель работы** – оценка нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

**Идея работы** – использование съёмных тензометрических преобразователей.

### **Основные задачи исследований:**

1. Выявить направления повышения эффективности оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи на основе анализа современных представлений в области оценки состояния ответственных конструкций с использованием тензометрического метода.

2. Обосновать состав и провести экспериментальные исследования параметров СТП для оценки деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

3. Разработать методику оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи и технические средства для её практической реализации.

4. Произвести оценку нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи в контрольных точках по разработанной методике с использованием СТП в лабораторных и заводских условиях и сопоставить с результатами оценки по заводской методике.

### **Научная новизна исследований:**

1. Обоснована конфигурация арочного УЭ СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи, отличающаяся вогнутым сводом переменного сечения с радиальным сопряжением дуг, позволяющая достичь максимального уровня деформаций в зоне установки тензорезистора, за счет чего обеспечивается повышение чувствительности ПИП.

2. На основе экспериментальных исследований впервые установлены статические характеристики преобразования СТП на основе арочного УЭ

с вогнутым сводом и полупроводниковых тензорезисторов типа KSP для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи.

3. Впервые при оценке нагруженности элементов секции получена зависимость механических напряжений от нагрузки на примере перекрытия МКЮ.2У-07/19 при стендовых внутризаводских испытаниях с использованием СТП на базе разработанного арочного УЭ.

**Практическая значимость результатов работы:**

- Метод экспресс-анализа с использованием разработанных арочных СТП позволяет в произвольном месте плоской поверхности элемента металлоконструкции секции механизированной крепи проводить оценку деформаций по оси, совпадающей с осью СТП на исследуемой поверхности с относительной погрешностью не более 12 %. Метод может быть использован для оперативного определения зон наибольших деформаций металлоконструкций элементов горношахтного оборудования или предварительной визуализации деформированного состояния объекта контроля перед установкой монтажных винтовых стоек СТП.

- Программно-аппаратный комплекс макета мобильной тензометрической системы, образцы арочных СТП, методика доведены до практической реализации в виде стендового макетного образца и могут быть использованы для исследования нагруженности элементов металлоконструкций горных машин при статических нагрузках;

- Лабораторный стенд для моделирования нагружения и оценки деформаций позволяет проводить экспериментальные исследования и практические занятия по изучению влияния прикладываемой нагрузки по схеме поперечного изгиба на уровень деформаций и напряжений поверхностей исследуемых балок и металлоконструкций с габаритами до 1400×380×230 мм тензометрическим методом.

**Методы исследований, используемые в ходе выполнения работы:**

- натурные экспериментальные методы оценки механических деформаций и напряжений;

- метод конечных элементов для компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния;

- методы математической статистики при обработке результатов экспериментальных исследований.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. При статическом нагружении секции механизированной крепи чувствительность арочного УЭ СТП с вогнутым сводом и радиальным сопряжением дуг определяется его геометрическими параметрами, при этом чувствительность УЭ возрастает с увеличением радиуса сопряжения его дуг до 10 мм и при уменьшении ширины поперечного сечения свода от монтажных площадок до вершины.

2. Коэффициент тензочувствительности СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи с использованием арочного УЭ совместно с полупроводниковым тензорезистором типа KSP при прижимном и комбинированном способах закрепления составляет 26,71 и 29,76 соответственно.

3. Размещение СТП на плоскости внутренних защищенных поверхностей перекрытия, основания, рычажных траверс и ограждения секции механизированной крепи обеспечивает измерение механических напряжений металлоконструкций в диапазоне от 0 до 450 МПа с погрешностью не более 6 % от расчетных значений.

**Достоверность** положений и результатов обеспечивается корректным использованием стандартных программ расчета и методов моделирования, использованием сертифицированной аппаратуры и оборудования для получения основных характеристик тензорезисторов СТП (установка для градуировки приклеиваемых тензорезисторов сертификат RU.E.28.007.A №27992, ГРСИ № 34927-07 и тензосистема ММТС-64.01 свидетельство RU.C.34. 007.A №44412, рег. №21760-01), воспроизводимостью авторских результатов исследований, полученных на разработанном стендовом оборудовании в программной системе «Стенд-Инфо» (свидетельство ФИПС о регистрации программы для ЭВМ № 2011618442) и результатов, полученных ранее на сертифицированном стендовом оборудовании, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

#### **Реализация работы**

С 2013 года исследования выполнены в соответствии с планом НИР ИУ СО РАН, проект 74. «Научные основы создания новых поколений горных машин и оборудования, обеспечивающих безопасность и эффективность подземных работ, исследование их взаимодействия с массивом горных пород» (№ 0354-2014-0004).

Практические результаты переданы для реализации заводу-изготовителю секций МКЮ.2У-07/19, МКЮ.2У-12/25. Предложенный комплекс научно-технических решений позволяет производить измерение фактических деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи в процессе приемосдаточных испытаний с возможностью оперативной переустановки СТП и корректировки исследуемой зоны.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на XV и XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, (2009, 2013); II Всероссийской, 55-й научно-практической конференции «Россия молодая»: г. Кемерово, КузГТУ, 2010 г.; Всероссийском инновационном молодёжном форуме «Селигер-2010» – смена «Инновации и техническое творчество»: Осташков, 2010 г.; Региональном конкурсе инновационных проектов «Кубок технонаций»,

декабрь 2010 г.; Семинаре «Технология создания производственных задач и создания инновационных продуктов» МИМОП: г. Москва, 5–6 мая 2011 г.; Всероссийском конкурсе инновационных проектов «НАИРИТ», 2011 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ)»: г. Кемерово, КузГТУ (2012, 2014 гг.); IV Международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России»: г. Прокопьевск, 2014 г.; Международной промышленной выставке производственного оборудования «Manufacturing Indonesia - 2012»; Областном инновационном конвенте «Кузбасс: Образование, наука, инновации»: г. Кемерово, 4–5 декабря 2014 г.

В 2013 году автором получен грант ОАО «Сибирская угольная энергетическая компания» (СУЭК) на проведение научных исследований по теме диссертационной работы.

Результаты исследований включены в научно-технический отчет по проекту «Разработка мобильной микропроцессорной тензометрической системы контроля состояния промышленных конструкций» в рамках программы «СТАРТ» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Госконтракт № 11089р/8345 от 01.10.2012 г.).

Результаты диссертационного исследования прошли практическую апробацию в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме: «Разработка экспериментальных конструкций комбинированного инструмента с применением сверхтвердых композиционных материалов для эффективного разрушения горных пород» (Соглашение № 14.607.21.0028 от 05.06.2014 г.).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования автором опубликовано 12 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, одно свидетельство ФИПС о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора** состоит:

- в разработке и сборке лабораторного нагружающего стенда, вспомогательных устройств и средств сопряжения аппаратных элементов макетного образца мобильной тензометрической системы для проведения экспериментальных исследований;
- в разработке методики оценки нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированной крепи с использованием арочных СТП;
- в непосредственном участии в создании программной системы «Стенд-Инфо» для регистрации, визуализации и обработки экспериментальных данных;

- в получении, обработке, анализе экспериментальных данных, апробации результатов и подготовке основных публикаций по теме выполненного диссертационного исследования.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 124 наименований. Работа изложена на 160 страницах машинописного текста и содержит 63 рисунка, 28 таблиц и 2 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** рассмотрено современное состояние исследований и подходов к определению параметров нагруженности элементов металлоконструкций механизированной крепи производителями и потребителями.

Нагруженность металлоконструкций секций характеризуется совокупностью действующих на них нагружающих сил и может оцениваться через деформации и напряжения на поверхности их элементов.

Для производителей фактические данные о воспринимаемых нагрузках важны для совершенствования существующих и создания новых конструкций секций и формирования доказательной базы при возникновении конфликтных ситуаций с потребителями. Для потребителей данные важны для обеспечения работоспособности секций за счет возможности оперативного планирования ремонтных и восстановительных работ.

Методика прочностных статических испытаний элементов металлоконструкций секций механизированной крепи в рамках операции контроля на стадии изготовления сводится к определению деформаций и механических напряжений в контрольных зонах, определенных по результатам расчета конструкции методом конечных элементов (МКЭ). Однако существующий подход к реализации операции контроля не позволяют производить корректировку зоны измерения. Это существенно осложняет учет фактических смещений зоны максимальных напряжений при изменении эпюры реактивных давлений по длине и ширине верхняка секции.

В связи с этим, для оценки нагруженности серийно изготавливаемых механизированных крепей путем регистрации деформаций и напряжений элементов металлоконструкций секций СТП на базе упругих элементов (УЭ) имеют значительное преимущество перед традиционно применяемыми приклеиваемыми тензорезисторами. Это обусловлено возможностью их многократного использования, быстрой переустановки и большей устойчивостью к механическим воздействиям.

Однако в отличие от тензорезисторов, которые каждой точкой связаны с объектом контроля, связь СТП, а значит и получаемые значения, напрямую зависят от его конструкции и способа его закрепления.

В результате комплексного анализа имеющихся работ в области исследований состояния элементов секций механизированных крепей под действием нагрузок, создания тензометрических систем и проектирования

ПИП, а также нормативной документации сформулированы цель, идея, и задачи исследований, которые приведены в общей характеристике работы.

**Вторая глава** посвящена обзору, анализу и обоснованию параметров УЭ и тензорезистора СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированной крепи.

Мобильность СТП, как одно из основных требований при оценке нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированных крепей, посредством включения УЭ в измерительную цепь, влечёт за собой значительное уменьшение коэффициента преобразования измерительной системы  $K$ , который представляется в виде:

$$K = K_i \cdot K_{кан}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – коэффициент тензочувствительности СТП;  $K_{кан}$  – коэффициент преобразования информации канала тензометрической системы.

Очевидно, что повышение коэффициента тензочувствительности СТП  $K_i$  является наиболее предпочтительным направлением для повышения чувствительности тензосистемы в целом. СТП включает в себя УЭ и тензорезистор. Характеристики обоих элементов имеют значительное влияние на результаты измерения деформаций объекта контроля.

Для тензорезисторов, используемых в СТП, на повышение коэффициента тензочувствительности  $K_i$  в большей степени влияет материал тензорешетки и для металлофольговых тензорезисторов из константана и никрома обычно составляет  $K_i \leq 2,14$ . Известна достаточно хорошая альтернатива стандартным материалам тензорешетки в виде полупроводников. Тензорезисторы из таких материалов имеют  $K_i$  от 100 до 130, следовательно, позволяют существенно повысить чувствительность  $K$  тензосистемы. Такие тензорезисторы эффективно применяются в УЭ различных измерительных приборов, но имеют нелинейные характеристики изменения сопротивления от деформации, и температуры, которые производителем тензорезисторов подробно не предоставляются. Полупроводниковые тензорезисторы мало распространены на отечественном рынке, поэтому для использования в составе СТП для измерения деформаций элементов металлоконструкций секции механизированной крепи выбраны кремниевые полупроводниковые тензорезисторы KSP-6-350-E4 (производства Kyowa).

Для установления зависимостей, позволяющих компенсировать нелинейность характеристик и обеспечивать корректную обработку результатов, проведены исследования в соответствии с ГОСТ 21616-91 на сертифицированном оборудовании – установке для градуировки приклеиваемых тензорезисторов и тензометрической системе ММТС-64.01. В результате определены основные характеристики полупроводниковых тензорезисторов KSP-6-350 и сопоставлены с характеристиками проволочных тензорезисторов ПКС-5-120. Полупроводниковые тензорезисторы KSP имеют коэффициент тензочувствительности  $K_i = 128,54$ . Выявлено, что тензорези-

сторы KSP обладают практически идеальными линейными характеристиками напряжения от нагрузки при различной силе тока. Следовательно, погрешности от саморазогрева незначительны.

Установлена характеристика нелинейности тензорезисторов KSP-6-350 по изменению сопротивления от деформации  $\varepsilon$  порядка 15 % при значениях  $\varepsilon$  от минус  $1200 \cdot 10^{-6}$  до плюс  $1200 \cdot 10^{-6}$ . Кроме того в рабочем температурном диапазоне секций 0 до плюс 45 °С установлены закономерности изменения сопротивления от температуры.

Показано, что для компенсации нелинейности полупроводникового тензорезистора KSP при обработке результатов необходимо вводить поправочный коэффициент, который зависит от абсолютного значения деформации элемента секции и температуры.

Для УЭ СТП определяющими факторами, влияющим на  $K_i$  являются геометрические параметры и способ закрепления на секции механизированной крепи. Параметры УЭ должны обеспечивать максимальные деформации в зоне установки тензорезистора при одинаковых деформациях объекта контроля. Крепежные элементы должны обеспечивать плотный контакт к поверхности элемента секции без возможности смещения, при этом конструкция должна быть проста и иметь минимум элементов.

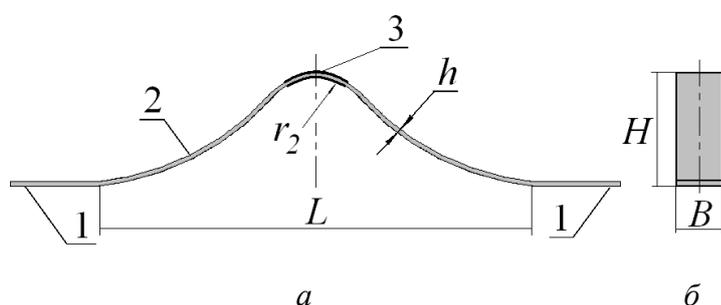


Рисунок 1 – Общий вид арочного упругого элемента с вогнутым сводом: а – вид спереди, б – вид сбоку

Наиболее приемлемой конструкцией для создания СТП для контроля нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи определена конструкция УЭ арочного типа с вогнутым сводом как показано на рисунке 1, где 1 – монтажные площадки, 2 – свод арки; 3 – тензорезистор.

Расчет геометрических параметров моделей УЭ производился МКЭ. Как правило, подход к назначению геометрических параметров УЭ – их минимизация, однако для оперативного исследования крупногабаритных конструкций, как секция механизированной крепи, СТП с большей базой позволяет локализовать зону повышенных напряжений за меньшее количество переустановок, после чего производить подробный анализ локализованной зоны с меньшей базой.

Исходя из этого для моделирования опытных образцов УЭ выбрана база  $L = 100$  мм и высота  $H = 10$  мм, что также обусловлено обеспечением линейности значений измеряемых деформаций и деформаций в зоне установки тензорезистора, а также размерами самого тензорезистора KSP. Со-

гласно результатам моделирования, с использованием менее габаритных тензорезисторов возможно уменьшить базу до 60 %.

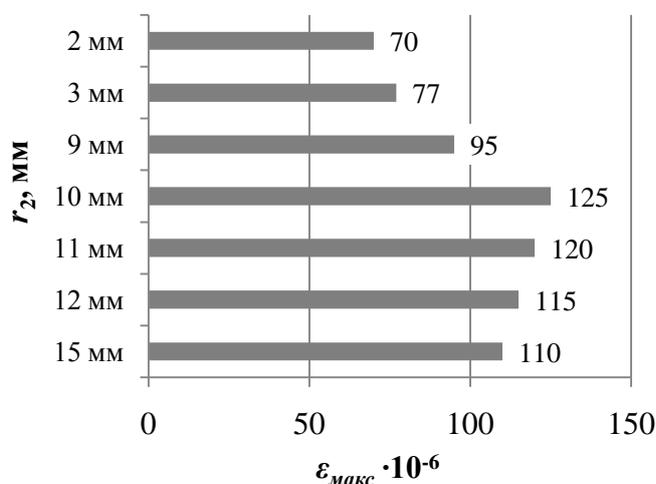


Рисунок 2 – Зависимость максимальных эквивалентных деформации УЭ от радиуса сопряжением дуг свода  $r_2$

В результате исследования влияния геометрических параметров УЭ на значения эквивалентных деформаций в зоне установки тензорезистора выявлено, что максимальные значения деформаций  $\varepsilon_{max}$  для арочного УЭ с вогнутым сводом с базой 100 мм и высотой 10 мм имеет конфигурация с переменным сечением свода от монтажных площадок до вершины со значениями от 10 до 5 мм и радиальным сопряжением дуг свода радиусом  $r_2$  10 мм (рисунок 2).

Определено, что с точки зрения надежности и простоты монтажа наиболее предпочтительным является комбинированный способ закрепления упругого элемента, когда УЭ через резьбовое соединение закрепляется на специальных монтажных винтовых стойках, которые в свою очередь на клей устанавливаются на объект контроля.

Для экспериментального определения деформаций элементов металлоконструкций секций применим прижимной способ закрепления УЭ постоянными магнитами из магнитного сплава NdFeB, обеспечивающих его надежную фиксацию при статических нагрузках.

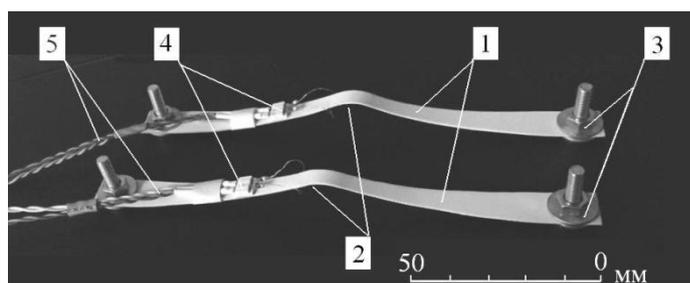


Рисунок 3 – опытные образцы арочных СПП: 1 – упругий элемент, 2 – зона установки тензорезисторов, 3 – крепежные элементы (винтовые стойки), 4 – терминальные площадки, 5 – соединительные провода

Для проведения экспериментальных исследований из стали 65Г изготовлены опытные образцы арочных СПП (АСТП) (рисунок 3). Установленное изготовителем число циклов нагружения для тензорезистора KSP составляет  $1 \cdot 10^6$ , наработка до усталостного разрушения УЭ из стали 65Г составляет  $2 \cdot 10^5$ . Максимальное проведенное число циклов нагружения для АСТП

при испытаниях на стенде составило  $1,5 \cdot 10^2$ . Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии существенных изменения показателей образцов АСТП при увеличении количества циклов нагружения.

**В третьей главе** изложена методика оценки нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированных крепей с использованием опытных образцов АСТП, оценки основных характеристик АСТП, определения влияния способа закрепления, оценки стабильности измерений деформаций натурального элемента секции при многократной переустановке АСТП и комбинированном способе закрепления на винтовую стойку на стендовом оборудовании. Представлено описание разработанных программно-аппаратных средств для практической реализации указанных методик. Изложена методика по экспериментальному определению деформаций элементов металлоконструкций секции арочными СТП при прижимном способе закрепления (экспресс-анализ) и комбинированном.

Для лабораторной оценки нагруженности металлоконструкций и элементов секций использовалось оригинальное стендовое оборудование. Лабораторный стенд для исследования влияния прикладываемой нагрузки на уровень деформаций поверхностей исследуемых профильных балок и металлоконструкций тензометрическим методом (далее – лабораторный стенд) разработан и изготовлен автором в рамках программы «СТАРТ» Фонда содействия инновациям.

Для регистрации и обработки данных при оценке нагруженности согласно предложенной методике разработан макетный образец мобильной тензометрической системы (МТС). В состав макетного образца МТС входят различные варианты ПИП (тензорезисторы, АСТП), усилитель и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) измерительного преобразователя, источник питания, портативный компьютер и программное обеспечение для визуализации и обработки данных измерений.

Макет МТС позволяет производить быструю комплектацию, переустановку и настройку за счет построения макета МТС по модульному принципу и широкого набора настроек с возможностью подключения различных ПИП с номинальным сопротивлением от 50 до 400 Ом.

Особенностью оригинальной программной системы «Стенд-Инфо» (Свидетельство ФИПС №2011618442) для визуализации и обработки данных макета МТС является объединение функций отображения в режиме реального времени, регистрации и сохранения данных с АЦП ЛА-2USB-14 с возможностью постфильтрации в одном окне. Дальнейшая оценка полученных данных осуществляется статистическими методами.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований основных характеристик АСТП и оценки нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированных крепей при нагружении на стендовом оборудовании. Приведены результаты расчета основных характеристик разработанных АСТП, экспресс анализа линейных деформаций поверхности рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 по разработанной методике с использованием образцов АСТП в лабораторных условиях на стенде, а также результаты оценки нагруженности в кон-

трольных точках перекрытия секции механизированной крепи в сборе в заводских условиях с применением АСТП и макета МТС.

Согласно представленной методике проведены исследования статических характеристик АСТП и влияния на них способа закрепления УЭ. Результаты показали, что отношение чувствительности АСТП с комбинированным (винт-стойка) и прижимным магнитным креплениями, к чувствительности полупроводникового тензорезистора КSP составляет 0,23 и 0,21 соответственно. Следовательно, чувствительность УЭ, закрепленного на NdFeB магниты ниже чувствительности УЭ, закрепленного на приклеиваемую винтовую стойку на 9 %.

На основе полученных статических характеристик произведен расчет значений коэффициентов тензочувствительности  $K_i$  приклеенных полупроводниковых тензорезисторов КSP и арочных СТП на их основе по формуле:

$$K_i = \left| \frac{\frac{(N_{\max i} - N_{0i})}{K_{npi}} + (R_{0i} - R_{ni})}{R_{ni} \cdot \varepsilon_{\max}} \right|, \quad (2)$$

где  $N_{\max i}$  – значение кода измерительной тензосистемы для  $i$ -го ПИП при максимальной деформации;  $N_{0i}$  – значение кода измерительной тензосистемы для  $i$ -го ПИП на разгруженной балке;  $K_{npi}$  – коэффициент преобразования для  $i$ -го канала измерительной тензосистемы;  $R_{0i}$  – сопротивление  $i$ -го ПИП при разгруженной балке;  $R_{ni}$  – номинальное сопротивление  $i$ -го ПИП;  $\varepsilon_{\max}$  – максимальная относительная деформация балки.

Рассчитанное значение  $K_i$  полупроводникового тензорезистора КSP (128,61) сопоставимо с результатами среднего коэффициента тензочувствительности КSP (128,54), полученного ранее на установке для градуировки тензорезисторов, что подтверждает достоверность результатов, полученных по методике с использованием макетного образца МТС на разработанном стендовом оборудовании. Для СТП на основе арочного УЭ с вогнутым сводом и полупроводникового тензорезистора КSP  $K_i$  составили при комбинированном способе закрепления – 29,76, а при прижимном способе закрепления – 26,71 (таблица 1).

Таблица 1 – Сопоставление результатов исследований характеристик ПИП

Наименование системы	ММТС-64.01		Макет МТС		
	Стационарный		Съемный		
Способ установки ПИП	Приклеивание непосредственно на объект контроля		Винт-стойка	NdFeB магниты	
	Наименование ПИП	ПКС	КSP	КSP	Арочные СТП
Среднее значение $K_i$	2,17	128,54	128,61	29,76	26,71

В следующем блоке экспериментальных исследований проводилась оценка деформаций элемента металлоконструкции секции механизированной крепи по разработанной методике с использованием опытных образцов АСТП в лабораторных условиях на стенде. Отработка методики оценки деформаций по выходному сигналу  $U_{вых}$  макета МТС проводилась на рычаге траверсы секции МКЮ.2У-12/25. Произведена оценка деформаций при поперечном изгибе рычага траверсы на лабораторном стенде. Для этого исследуемая передняя поверхность условно в виде матрицы разбивалась на контрольные зоны в соответствии с рисунком 4 а.

Суть метода заключается в установке АСТП в каждой контрольной зоне поверхности металлоконструкции и получении значений выходного сигнала, характеризующего деформации по оси, совпадающей с осью АСТП при нагружении (рисунок 4 б).

Несмотря на выявленное снижение чувствительности магнитного способа закрепления УЭ на NdFeB магнитах для экспресс-анализа он остается наиболее удобным и быстрым для установки СПП на объект контроля.

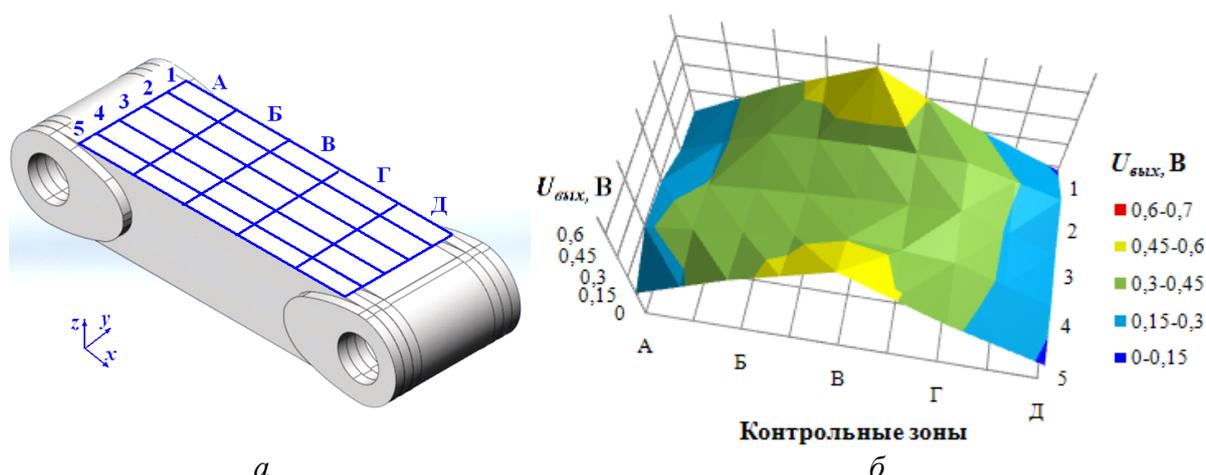


Рисунок 4 – Метод экспресс-анализа: а – Схема разбиения передней поверхности рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 на контрольные зоны, б – уровень выходного напряжения  $U_{вых}$  при исследовании передней поверхности рычага по оси  $x$  при нагружении

Численная оценка погрешности, определенная как отношение экспериментальных результатов к расчетным показала, что коэффициент корреляции Пирсона  $r$  двух массивов данных составил 0,883, что указывает на высокую связь данных. Такая связь данных является функционально зависимой:

$$\varepsilon_{расч} = 26,47 \cdot U_{вых} + 5,11. \quad (3)$$

Среднее отклонение от расчетных значений составляет 11,7 %. Графическая зависимость между расчетными и экспериментальными данными приведена на рисунке 5.

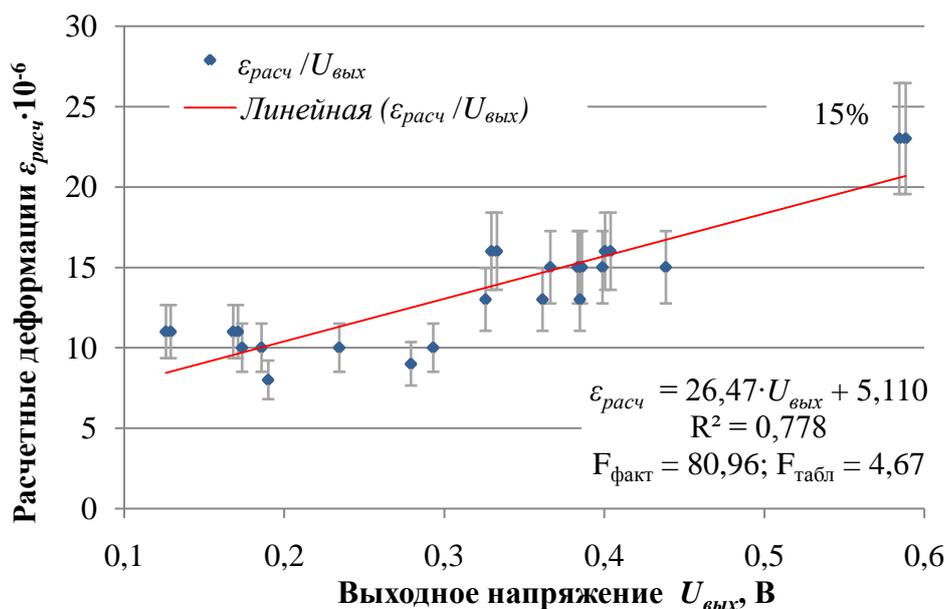


Рисунок 5 – Оценка погрешности результатов экспресс-анализа

Далее производилась оценка стабильности результатов измерения деформаций в контрольной точке рычага траверсы секции МКЮ.2У-12/25 при переустановке АСТП. Для этого АСТП устанавливались на винтовые стойки и производилось 18 циклов нагружения рычага на лабораторном стенде, при этом, перед каждым циклом нагружения производилось снятие и повторная установка АСТП. В результате установлено, что относительная погрешность получаемых значений выходного сигнала при переустановке разработанных АСТП не превышает 5 %.

Кроме того, для контроля процесса измерения деформаций рычага секции МКЮ.2У-12/25 параметры нагружения при проведении экспериментальных исследований параллельно фиксировались с применением спектрально-акустического метода и метода акустической эмиссии. Полученные результаты показали высокое соответствие регистрируемых значений для всех используемых методов неразрушающего контроля.

Разброс значений для спектрально-акустического метода при его чувствительности (100нс/10кН) не превысил 0,1 %. По линейной динамике изменения времени задержки волн Релея, определены деформации как прямо пропорциональные к приложенной нагрузке.

В заключительном блоке экспериментальных исследований произведена оценка нагруженности перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 в заводских условиях на стенде «Gluckauf» для проведения исследовательских и сертификационных испытаний секций механизированных крепей ООО «Юргинский машзавод» с использованием арочных СТП и макета МТС. Испытания проводились по разработанной заводом и утвержденной методике в соответствии с ГОСТ Р 52152-2003 и европейским стандартом EN 1804:2001. Распор секции при установке в стенд производился по схеме, обеспечивающей поперечный изгиб перекрытия при нагружении.

На перекрытие секции были установлены усилитель – 2, АЦП макета МТС – 3, индикаторы температуры – 4, разработанные АСПП – 1 параллельно штатной поверенной тензометрической системе ZET-Lab-017-T8 с проволочными тензорезисторами типа ПКС – 5 (рисунок 6 а).

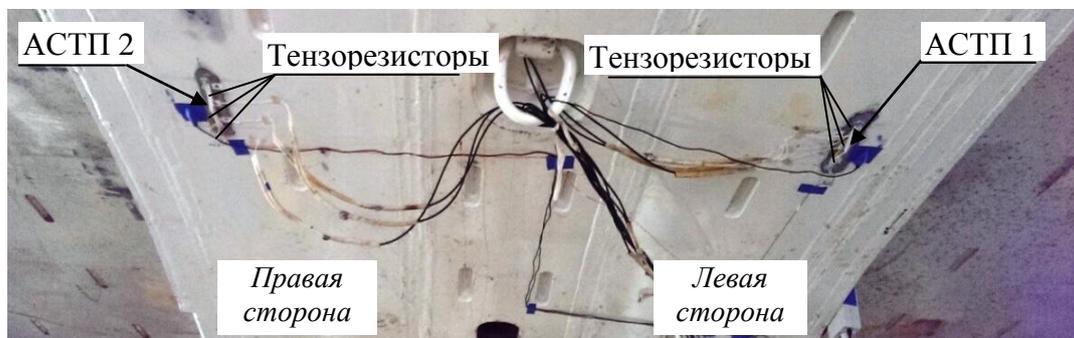
Контрольные точки для установки тензорезисторов и АСПП на нижней поверхности перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 определены совместно с сотрудниками предприятия на основе расчета зон наибольших напряжений при давлении самораспора 56 МПа (рисунок 6 б).

После этого был проведен цикл нагружения секции в стенде для нанесения шкалы соответствия между сигналом макета МТС –  $U_{вых}$  и значениями механических напряжений в контрольных точках. Такая механическая тарировка производилась на основе данных штатной тензометрической системы. В результате цикла нагружения построен тарировочный график макета МТС (рисунок 7).

Для текущего уровня коэффициента преобразования информации канала тензометрической системы зависимость механических напряжений  $\sigma$



а



б

Рисунок 6 – Секция МКЮ.2У-07/19 в испытательном стенде «Gluckauf» ООО «Юргинский мауизавод»: а – с установленными АСПП и оборудованием макета МТС, б – расположение АСПП и тензорезисторов в контрольных зонах нижней поверхности перекрытия



Рисунок 7 – Тарировочный график

поверхности перекрытия от  $U_{\text{вых}}$  макета МТС выражалась как:

$$\sigma = 1,149 - 249,1 \cdot U_{\text{вых}} \quad (4)$$

Далее производилось нагружение секции ступенями до давления в стойках 5, 17, 26, 34, 39, 43, 46, 49, 52 и 56 МПа с промежуточной разгрузкой до 5 МПа. На каждой ступени нагрузка удерживалась не менее минуты. В результате измерения, согласно (4), характер изменения механических напряжений перекрытия по времени, регистрируемый макетом МТС по данным АСП 1 и АСП 2 представлен на рисунке 8. При нагружении секции левая сторона перекрытия воспринимала незначительно большую нагрузку в среднем на 4-6 %. Максимальные значения напряжений по данным АСП 1 и АСП 2 составили 428 МПа и 402 МПа соответственно. Соответствующие значения, регистрируемые штатной тензометрической системой составили 433 МПа и 428 МПа.

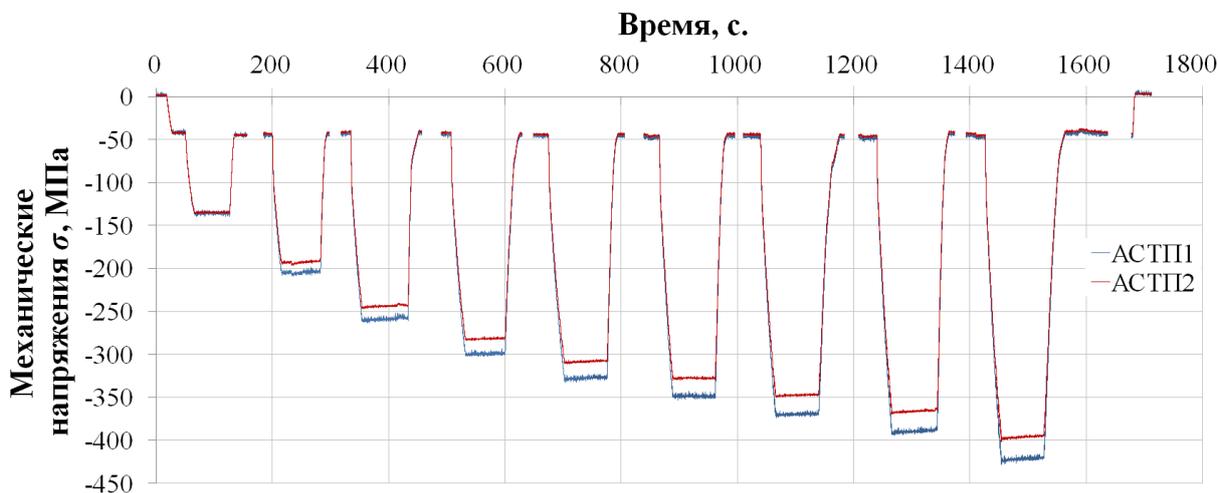


Рисунок 8 – Характер изменения напряжений, регистрируемый АСП 1 и АСП 2

При сравнительной оценке результатов измерений с расчетными значениями, отклонения данных для АСП 1 и АСП 2 не превысили 6 и 11 % соответственно. При сравнении полученных данных с результатами измерения напряжений штатной тензометрической системой, отклонения данных АСП 1 составили не более 1 %, для АСП 2 не более 2 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований получены новые научно обоснованные технические решения актуальной задачи оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи под воздействием рабочих нагрузок, имеющие существенное значение для развития горного машиностроения.

Основные научные и практические результаты сводятся к следующему:

1. Установлено, что для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи путем измерения уровня деформаций и напряжений, перспективным является использование съемных тензометрических преобразователей, применение которых позволяет изменить положение контрольной зоны.

2. Выявлено, что максимальные значения деформаций УЭ СТП для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи с базой 100 мм и высотой 10 мм при сопоставимых деформациях объекта контроля обеспечиваются для конфигурации арочного УЭ с вогнутым сводом переменного сечения от монтажных площадок до вершины со значениями от 10 до 5 мм и радиальным сопряжением дуг свода радиусом 10 мм.

3. Разработаны методика оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи под воздействием рабочих нагрузок с использованием арочных СТП и технические средства для её практической реализации, в составе нагружающего стенда, макетного образца мобильной тензометрической системы и программы визуализации и обработки данных, позволяющие повысить эффективность за счет возможности оперативной переустановки ПИП и корректировки контрольной зоны.

4. Экспериментально определены коэффициенты тензочувствительности СТП на основе арочного УЭ с вогнутым сводом и полупроводникового тензорезистора типа KSP для оценки нагруженности элементов металлоконструкций секции механизированной крепи, которые составляют при комбинированном способе закрепления – 29,76, а при прижимном способе закрепления – 26,71.

5. Показано, что предложенный метод экспресс-анализа при установке арочных СТП на NdFeB магниты (прижимной способ закрепления) позволяет в элементах металлоконструкции секции механизированной крепи проводить оценку деформаций по оси, совпадающей с осью СТП, и наглядно визуализировать деформированное состояние исследуемой поверхности со средним отклонением от расчетных значений не более 12 %.

6. По разработанной методике с использованием СТП произведена оценка нагруженности перекрытия секции МКЮ.2У-07/19 на стенде

«Gluckauf» в заводских условиях ООО «Юргинский машзавод» и получена зависимость механических напряжений в контрольных точках от статической нагрузки, при этом среднее значение отклонений полученных напряжений от напряжений, измеренных с использованием штатной тензометрической системы, составило 2 %.

Направления дальнейших исследований:

- оценка динамических процессов при нагружении элементов металлоконструкций секции;
- оценка нагруженности элементов секций механизированной крепи во взрывоопасной среде.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Степанова Л. Н. Микропроцессорные многоканальные тензометрические системы для динамических испытаний конструкций / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, М. С. Никитенко и др. // Датчики и системы. – 2011. – №8. – С. 29-34.
2. Никитенко М. С. Подбор упругого элемента тензометрического датчика системы оперативного контроля состояния промышленных конструкций // Контроль. Диагностика. – 2012. – №9. – С. 42-45.
3. Степанова Л. Н. Исследование характеристик проволочных и полупроводниковых тензодатчиков используемых для измерения ударных процессов / Л. Н. Степанова, Е. Ю. Лебедев, М. С. Никитенко и др. // Датчики и системы. – 2013. – №1. – С. 28-33.
4. Никитенко М.С. Разработка комплекса средств технической диагностики, восстановления и упрочнения элементов горнодобывающего оборудования / М. С. Никитенко, К. В. Князьков, Н. В. Абабков и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – №ОБ6. – С. 447-456.

*Статьи в прочих изданиях*

5. Stepanova L. N. Microprocessor multi-channel strain-gauge systems for dynamic test of structures / L. N. Stepanova, S. I. Kabanov, M. S. Nikitenko и др. // Automation and Remote Control. – 2013. – Т. 74. – № 5. – С. 891-897.
6. Никитенко М. С. Разработка системы оперативного контроля состояния промышленного оборудования с использованием многофункциональной тензометрической системы // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2012): Материалы Всероссийской молодежной конференции, г. Кемерово, 20-22 сентября 2012 г. / Под редакцией проф. А.Г. Пимонова; Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – Кемерово, – 2012. – С. 44-45.
7. Никитенко М. С. Технические требования к системе диагностики состояния конструкций секций механизированных крепей // Современные

техника и технологии: Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В3т. Т.3. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 2013. – С. 150-151.

8. Никитенко М. С. Комплексный способ диагностики, восстановления и упрочнения элементов горнодобывающего оборудования / М. С. Никитенко, К. В. Князьков // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: Изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, – 2014. – С. 208-211.

9. Никитенко М. С. Блок усиления для макета многоканальной тензометрической системы контроля НДС элементов шахтной крепи на базе чипа INA125P / М. С. Никитенко, В. О. Червов // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. – Прокопьевск: Изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевске, – 2014. – С. 254-257.

10. Никитенко М. С. Моделирование влияния геометрических параметров упругого элемента тензодатчика на интенсивность его деформации / М. С. Никитенко, Е. А. Гребенников // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2014): Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 16-17 октября 2014 г. – Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. – 2014. – С. 404-405.

11. Никитенко М. С. Тензометрия как инструмент оценки ресурса горнодобывающего оборудования // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации» материалы Инновационного конвента. – Новокузнецк, – 2014. – С. 36-38.

#### *Объекты интеллектуальной собственности*

12. «Стенд-Инфо». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011618442 РФ, Кречетов А. А., Никитенко М. С. // правообладатели ООО «СибТензоСервис», ООО «МС-Инжиниринг». заявл. № 616471 26.08.11. зарег. 26.10.2011.

**Личный вклад** автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1], [5], [9], [12] – разработка программно-аппаратных средств и вспомогательных устройств стендового оборудования для проведения экспериментальных исследований;

[4], [8] – разработка методики оценки нагруженности элементов металлоконструкций секций механизированной крепи;

[3], [10] – общий анализ, получение, обработка, анализ экспериментальных данных.