

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Е.В. Горохов, доктор техн. наук, профессор; А.М. Югов, доктор техн. наук, профессор
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Аннотация. Научные коллективы кафедры металлических конструкций и сооружений, кафедры теоретической и прикладной механики и кафедры технологии и организации строительства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (ДОННАСА) под руководством доктора технических наук, профессора Е.В. Горохова в течение 50 лет активно занимаются проблемой оценки технического состояния и технической диагностики эксплуатируемых металлических конструкций промышленных зданий и сооружений. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны методологические основы по повышению надежности эксплуатируемых металлических конструкций зданий и сооружений на основе использования методов системного анализа поведения конструкций в условиях эксплуатации, обследования, оценки технического состояния, технической диагностики, мониторинга и прогнозирования несущей способности.

Ключевые слова: металлические конструкции, здания, инженерные сооружения, оценка технического состояния, техническая диагностика, мониторинг, прогнозирование.



Горохов
Евгений Васильевич



Югов
Анатолий Михайлович

ВВЕДЕНИЕ

С середины 60-х годов XX века научные коллективы под руководством Е.В. Горохова задумывают и уверенно реализуют в виде нового научного направления комплекс кадровых, технических и организационных мероприятий, посвященных проблеме оценки технического состояния и технической диагностики металлических конструкций зданий и сооружений промышленных предприятий на территории СССР.

Началом и исходным пунктом этого процесса стала первая крупная работа, выполненная на кафедре строительных конструкций тогда еще Донецкого политехнического института (ДПИ), посвященная обследованию и разработке проектов усиления травильного цеха Харцызского сталепроволочно-канатного завода. Работа выполнялась в 1966-1967 г.г. в рамках СПКБ (студенческого проектно-конструкторского бюро). Эта работа также была первым реальным дипломным проектом в ДПИ.

С 1969 года на кафедре организуется постоянно действующая группа, а с 1971 года — научное направление, которое тоже возглавил к.т.н. Е.В. Горохов. С самого начала работы группа активно участвует в госбюджетной и хоздоговорной тематиках кафедры, а также начинает научные исследования в нескольких направлениях в области долговечности и надежности стальных конструкций в условиях эксплуатации.

Обобщением выполненных поисковых работ и постановкой научной проблемы явилась публикация главы «Надежность и долговечность строительных металлических конструкций» в книге «Прогрессивные стальные конструкции» (изд-во «Донбасс», 1974).

Актуальность данного научного направления была вызвана тем, что в СССР в целом и на Украине в частности на это время был накоплен значительный фонд строительных металлических конструкций. Так, например, только в основных областях промышленности Украины эксплуатируются около 40 миллионов тонн несущих металлических конструкций.

Задуманная и реализованная на практике работа продолжается до сегодняшнего дня и приносит народному хозяйству существенные положительные результаты.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Анализ технического состояния зданий и сооружений, введенных в действие в течение XX века, свидетельствует о том, что в их техническом содержании и обслуживании не было надлежащего порядка, соответствующей системы, которая обеспечивала бы квалифицированную эксплуатацию, техническую диагностику и мониторинг их состояния, своевременный ремонт, реновацию и предупреждала бы аварии, обеспечивая тем самым сохранение материальной базы промышленности и ликвидацию нежелательных нарушений экологического состояния окружающей среды. Большая часть этого фонда имеет значительную физическую изношенность и поврежденность. Поскольку масштабы строительства новых зданий и сооружений относительно небольшие, то возникает проблема обеспечения надежности эксплуатации существующего парка строительных металлических конструкций на основе технического освидетельствования, мониторинга, технической диагностики и прогнозирования технического состояния.

С 1971 года творческая группа под руководством Е.В. Горохова начинает выполнять крупные народно-хозяйственные заказы по Донбасскому региону — цеха Новокаматорского машиностроительного, Дружковского машиностроительного, Енакиевского металлургического и других заводов.

С выходом статьи Е.В. Горохова «Натурные исследования и усиление металлических конструкций каркаса промышленного здания» (журнал «Промышленное строительство», №1, 1976) география работ расширяется до Прибалтики на севере, Карпат на западе, Новокузнецка на востоке. Среди наиболее значимых объектов — реконструкция мартеновского цеха Кулебакского металлургического завода (Нижегородская область), цехов Рижского вагоностроительного завода, Новокузнецкого металлургического комбината, Московского коксогазового завода и др.

Кроме практических результатов исследований эксплуатационного состояния конкретных конструкций, проводится сбор, накопление и обработка данных по дефектам и повреждениям строительных конструкций и условиям их эксплуатации.

Для комплексной реализации данного научного направления в 1972 г. при кафедре «Металлические конструкции» Макеевского инженерно-строительного института для решения проблемы обеспече-

ния надежности и долговечности эксплуатируемых стальных конструкций создана научно-производственная лаборатория «Эксплуатация и надежность строительных конструкций» (НПЛ ЭНСК), научным руководителем которой стал тогда проректор по научной работе, доцент, к.т.н. Горохов Е.В.

В качестве основных направлений исследований лаборатории были определены:

- уточнение нагрузок и воздействий;
- исследование свойств материалов конструкций, находящихся в стадии эксплуатации;
- систематизация и анализ причин дефектов и повреждений;
- разработка методик и программ расчета конструкций с учетом эксплуатационного состояния;
- исследование коррозионного состояния и разработка методов и составов антикоррозионной защиты стальных конструкций;
- разработка методов и способов усиления и ремонта конструкций в условиях эксплуатации.

В 1975 году утверждена Всесоюзная программа 055.01.121 «Разработать и внедрить прогрессивные способы реконструкции промышленных зданий и сооружений ведущих отраслей промышленности, обеспечивающие сокращение трудозатрат, материальных ресурсов и сроков ее проведения», в реализации которой была задействована НПЛ ЭНСК. С этого времени и до распада СССР НПЛ лаборатория участвует в разработках нормативных документов и справочной литературы на всесоюзном, республиканском и региональном уровнях. Наиболее важными достижениями можно считать участие в разработке главы 20 СНиП II-23-81 и пособия к ней, а также издание монографии (совместно с кафедрой «Металлические конструкции» Московского инженерно-строительного института): В.Н. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров «Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции» / Москва, Стройиздат, 1987 г.

В 1986 г. для развития этого направления создан творческий коллектив из молодых ученых и студентов «Диагностика и реконструкция», который исследует вопросы реконструкции зданий и сооружений в условиях действующего производства (науч. руководитель — доктор техн. наук, проф. Е.В. Горохов).

Для объединения усилий ученых Украины в развитии научного направления в 1988 г. на научно-производственной базе кафедры «Металлические конструкции» создан Донецкий комплексный отдел института «УкрНИИПроектстальконструкция». Отдел работал до 1993 г. и выполнил большой объем проектных и исследовательских работ по обследованию и разработке проектов усиления конструкций зданий и сооружений промышленных предприятий.

В рамках указанных научно-производственных подразделений большое количество молодых ученых

и студентов выполнили значительный объем работ по обследованию, оценке технического состояния, технической диагностике, разработке проектов усиления, паспортизации и прогнозированию технического состояния металлических конструкций промышленных зданий и сооружений на территории СССР и новых государств.

Е.В. Горохов активно участвует во всесоюзных и республиканских конференциях, а в 1981 и 1986 годах организует в стенах Макеевского инженерно-строительного института (впервые на территории СССР) первую и вторую всесоюзные научно-технические конференции «Повышение эффективности эксплуатации и реконструкции промзданий металлургической, машиностроительной и горной промышленности». В конференциях приняли участие ведущие ученые всех союзных республик, в том числе директор ЦНИИПроектстальконструкция академик Н.П. Мельников.

В дальнейшем в стенах МИСИ (затем Донбасской государственной академии строительства и архитектуры) были проведены ряд конференций, семинаров и совещаний всесоюзного, республиканского (с 1991 года – украинского) и регионального уровней.

К основным научным и практическим результатам, полученным в результате выполненных работ за период с 1985 по 1992 гг., следует отнести:

- создание базы и статистический анализ данных о геометрических отклонениях и прочностных свойствах использованного металлопроката, геометрических несовершенствах, обусловленных примененным методом монтажа, фактическими данными о постоянных и временных нагрузках, годовом температурно-влажностном режиме эксплуатации, величинах коррозионного износа основных несущих конструкций, дефектах и повреждениях эксплуатируемых конструкций;

- выполненную оценку эксплуатационной надежности обследованных покрытий;

- разработку рекомендаций по обеспечению дальнейшей нормальной эксплуатации покрытий.

Позднее актуальность данного научного направления была подтверждена Постановлением Кабинета Министров Украины № 409 от 05 мая 1997 г. «Об обеспечении надежности и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и инженерных сетей»; Постановлением Кабинета Министров Украины № 1313 от 22 августа 2000 г. «Об утверждении Программы предотвращения и реагирования на чрезвычайные ситуации техногенного и природного характера на 2000–2005 годы с целью комплексного решения проблем защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера в интересах безопасности отдельного человека,

общества, национального достояния и окружающей среды»; Распоряжением Кабинета Министров Украины от 11 июня 2003 г. № 351-р «Об одобрении Концепции Государственной программы обеспечения технологической безопасности в основных областях экономики».

При разработке данной проблемы научным коллективом под руководством Е.В. Горохова получены следующие основные результаты:

- математическая модель накопления несовершенств металлических конструкций зданий и сооружений, основанная на кумулятивной модели стационарного процесса Пуассона;
- методология технической диагностики эксплуатируемых металлических конструкций зданий и сооружений с учетом реальных факторов эксплуатации, включая динамическое воздействие климатических нагрузок, совместную работу каркаса сооружения и фундаментов;
- результаты экспериментально-теоретической оценки действительного состояния эксплуатируемых металлических конструкций с учетом реальных факторов эксплуатации, внешних нагрузок и воздействий;
- методика оценки остаточного ресурса металлических конструкций зданий и сооружений, находящихся в условиях эксплуатации;
- оценка параметров надежности эксплуатируемых металлических конструкций на основе предложенного предельного состояния третьей группы;
- рекомендации по проведению обследования, оценки технического состояния и паспортизации эксплуатируемых зданий и сооружений и другие.

Практическое использование методологии и технологии технической диагностики эксплуатируемых металлических конструкций зданий и сооружений на основе разработанных и внедренных аппаратно-программных комплексов технической диагностики и мониторинга технического состояния позволяет получать более точные и обоснованные по сравнению с существующими методиками оценки параметров напряженно-деформированного состояния за счет учета фактических условий эксплуатации, в том числе действующих нагрузок и воздействий, в частности динамических, и совместной работы сооружений, фундаментов и оснований.

Предложенные рекомендации по подготовке расчетных схем зданий и сооружений с учетом несовершенств, фактических свойств оснований и фундаментов, реальных климатических, технологических и техногенных воздействий позволяют работникам специализированных организаций при оценке технического состояния зданий и сооружений

более полно учитывать факторы, определяющие надежность объекта, и обоснованно составлять прогноз технического состояния объекта на всех стадиях его жизненного цикла от возведения до демонтажа.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И ООРУЖЕНИЙ

В 1996 году начинается современный этап в развитии научного направления Е.В. Горохова. В изменившихся экономических условиях под его руководством НПЛ ЭНСК преобразуется в «Донбасский диагностический центр строительных конструкций зданий и сооружений», работающий в тесном контакте с Донецким территориальным управлением Госнадзорохрантруда. Центр активно включается в разработку нормативной базы Украины и региона.

Одним из главных требований к диагностическим параметрам являются удобство и простота их измерения, а также наличие соответствующей аппаратуры.

Для реализации технической диагностики и мониторинга технического состояния объекта в коллективе под руководством Е.В. Горохова в период 1995 – 2002 годов разработана универсальная система мониторинга конструкций УСМК-1, предназначенная для определения параметров НДС зданий и сооружений из металлических конструкций. Целью данной разработки была отработка методики интегральной диагностики строительных конструкций. Отличительной особенностью ее аппаратной реализации является ориентация на конструктивы IBM-подобных персональных компьютеров (ПК).

Программное обеспечение системы построено по модульно-иерархичному принципу и имеет три уровня. На верхней ступени иерархии находится программный модуль управления ресурсами системы (МУРС). Он обеспечивает настройку конфигурации программной среды, необходимой для проведения измерений и обработки данных, а также управление массивами данных. На следующей ступени находятся модули, осуществляющие связь с измерительными модулями системы, управление их ресурсами, а также модули преобразования форматов данных и их обработки. На нижней ступени иерархии находятся модули программного обеспечения измерительных модулей. К основным функциям МУРС относятся: организация интерактивного визуального интерфейса между оператором системы и ее программными ресурсами; управление процессами сбора и обработки данных; настройка и тарифовка измерительных преобразователей.

Результаты практического применения технической диагностики и оценки технического состояния ряда эксплуатируемых зданий и сооружений из металлических конструкций с применением разработанной универсальной системы мониторинга конструкций УСМК-1 позволили закрепить ведущую роль научно-производственных подразделений под руководством Е.В. Горохова на рынке технических услуг Украины.

Так, были проведены исследования цеха готовой продукции ММК им. Кирова (г. Макеевка). Исследования проводились на подкрановых балках как наиболее загруженных элементах, испытывающих динамические воздействия от мостовых кранов. При этом было задействовано 60 каналов тензоусилителя.

На рис. 1 и 2 представлены характерный график, полученный с тензодатчика, и соответствующий ему

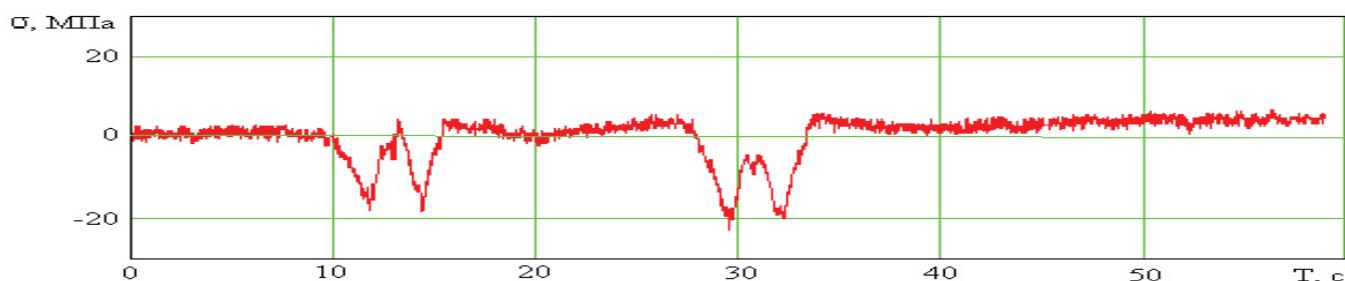


Рис. 1. График тензосигнала

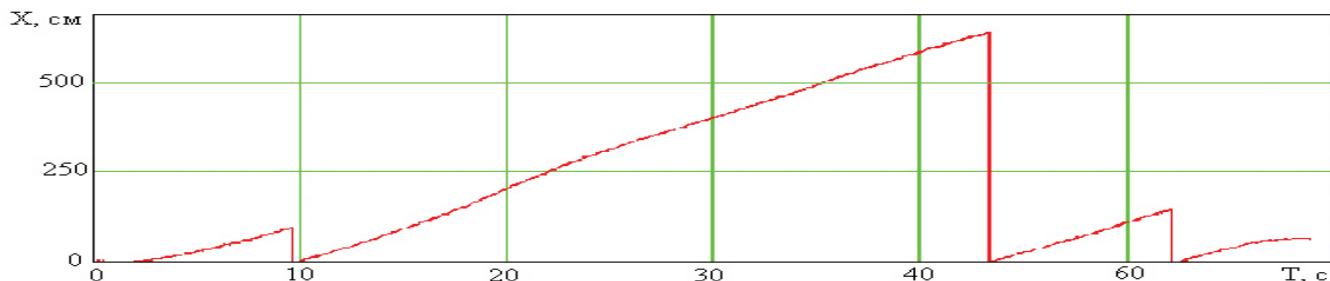


Рис.2. График сигнала измерителя перемещения мостового крана

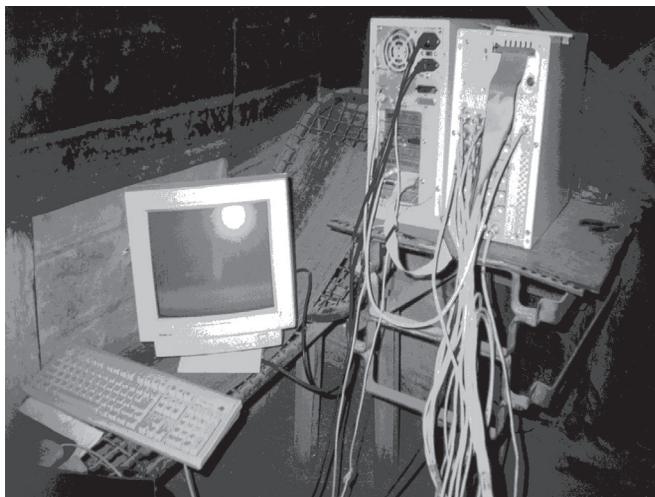


Рис. 3. Универсальная система мониторинга конструкций УСМК-1

сигнал преобразователя перемещения крана. На графике сигнала с тензодатчика хорошо видны выбросы сигнала, связанные с напряжениями сжатия, вызванными движением колес крановой тележки над датчиком. Кривизна графика перемещения крана свидетельствует о неравномерности скорости его перемещения.

В 2000 г. с применением системы УСМК-1 были выполнены работы по обследованию, технической диагностике, динамическому испытанию и оценке технического состояния конструкций корпуса приемного бункера завода по переработке отходов металлургического производства (рис. 3, 4). Корпус приемного бункера представляет собой трехэтажную этажерку в виде балочной клетки с размерами в плане в осях 6,0x10,5 м, подвергающуюся в процессе эксплуатации высокочастотным вибрационным нагрузкам от работы виброгрохота. В верхнем уровне этажерки встроен приемный бункер. Целью проведения экспериментальных исследований являлась необходимость определения реального напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции, а также проверка правильности полученных теоретических результатов.

Методика динамического диагностирования включала в себя контроль и обработку диагностических параметров в виде динамических характеристик в различных точках сооружения, которые определялись на основании теоретических расчетов. В качестве чувствительных элементов были использованы тензорезисторы с базой 20 мм и сейсмографы ВЭГИК. Опрос датчиков проводился на различных этапах технологического процесса бункерной этажерки.

В результате проведения испытаний получены:

- зависимости изменения напряжений в элементах во времени на различных этапах работы здания;
- зависимости амплитудной характеристики от частоты колебаний (рис. 5);
- зависимости изменения вибрационной скорости во времени (рис. 6).

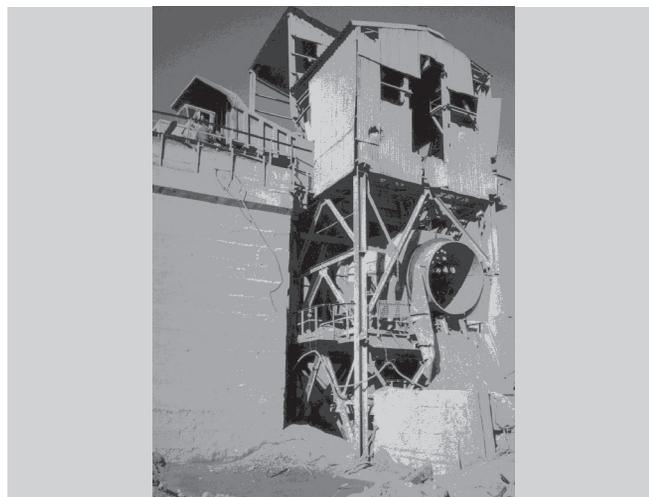


Рис. 4. Общий вид корпуса приемного бункера

Как показали экспериментальные исследования, проведенные на натуральных конструкциях, использование системы УСМК-1 дает возможность быстро и эффективно определять необходимые динамические характеристики конструкции в процессе ускоренного диагностирования.

Значительный объем научных и практических работ научной школы Е.В. Горохова посвящен оценке остаточного ресурса эксплуатируемых металлических конструкций.

Ресурс конструкции, подверженной переменным во времени нагрузкам, определяется числом циклов нагружения, при котором конструкция перестает удовлетворять требованиям предельных состояний.

Определение числа циклов нагружения в первую очередь зависит от вида возмущающего воздействия (технологическое, климатическое, сейсмическое и т.п.).

Поскольку основными видами возмущающего воздействия следует считать климатические и технологические воздействия, то вычисление числа циклов нагружения и, следовательно, оценку остаточного ресурса конструкции можно осуществлять экспериментально, на основе разработанной системы технической диагностики. Наиболее просто определить экспериментально-статистические параметры числа циклов при действии технологической нагрузки (например, от мостовых кранов). Основное внимание было уделено определению числа циклов нагружений конструктивной системы ветровой нагрузкой, постоянно меняющей свои параметры.

При расчете конструкций на усталостную прочность в основном учитывается только резонансная часть. Обычно расчет конструкций производится с учетом первой частоты колебаний. Это связано с отсутствием реальной информации о границах

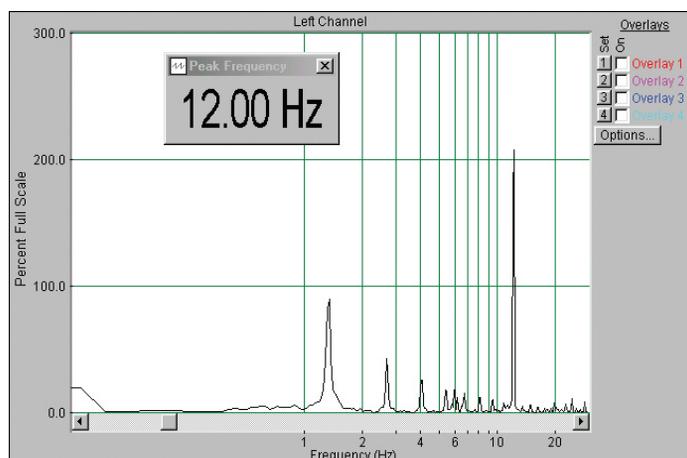


Рис. 5. Амплитудный спектр вибрационной скорости в ригеле бункерной этажерки

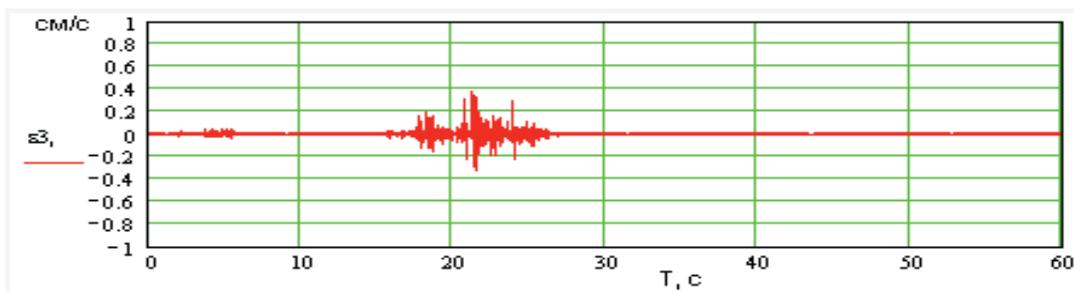


Рис. 6. Вибрационная скорость на перекрытии при загрузке бункера



Рис. 7. Общий вид моста галереи Зуевской ТЭС

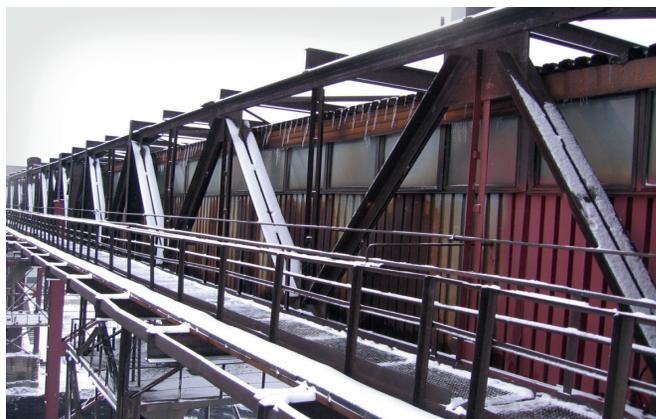


Рис. 8. Конструкции пролетной части крайнего пролета моста галереи

указанных частей спектра. Хотя метод оценки границ квазистатической и резонансных частей известен. Он основан на вычислении функции спектральной когерентности (ФСК).

ФСК позволяет производить оценку количества циклов нагружения в тех случаях, когда на конструкцию воздействует случайный импульсный процесс, например, порывы ветра. Указанная оценка основана на определении верхней граничной частоты $f_{гр}$ квазистатической области спектра скорости ветра при помощи построения функции когерентности, а также на экспериментальном получении функции плотности распределения вероятности длительности импульсов.

Предложенная методика позволяет оценить число циклов нагружения конструктивной системы ветровой нагрузкой и тем самым оценить остаточный ресурс здания или сооружения.

В рамках научного направления предложен подход к оценке безопасности эксплуатируемых сооружений на основе предложенного понятия третьего предельного состояния.

В 2005 году по заказу Зуевской ТЭС выполнена научно-исследовательская работа «Проведение динамических испытаний, выполнение расчетов и выдача рекомендаций по усилению конструкций галереи ЛК-6». В состав работ по договору входили натурное обследование моста галереи, проведение динамических испытаний консольной части моста, в которой расположена приводная станция, с последующим определением действительных динамических характеристик конструкций.

Результаты работы позволили нормализовать и обеспечить надежную работу системы «мост галереи – приводная станция» без остановки технологической эксплуатации сооружения.

Методика подхода к оценке технического состояния строительных сооружений по двум предельным состояниям, несмотря на детерминизм математических расчетных моделей при использовании вероятностных оценок, по своей природе достаточно хорошо отработана и получила мировое признание в виде соответствующих расчетных схем, регламентирующих нормативов и т.д., что оказалось возможным благодаря интенсивной разработке соответствующих функциональных зависимостей между внешними воздействиями, несущей способностью и деформативностью элементов сооружений.

Тем не менее, при использовании этих методов возникают определенные затруднения, наиболее существенными из которых являются:

- произвольность нормирования допускаемых значений вероятностей недостижения предельных состояний для различных сооружений ввиду имеющей место неопределенности физической сущности понятий параметров надежности;

- принимаемые допускаемые нормы параметров надежности для различных сооружений весьма близки к единице или нулю, и изменение этих величин при появлении совокупности различных несовершенств и дефектов даже на порядок (как правило, во втором или третьем знаках) не является достаточно наглядным признаком изменения технического состояния при возведении и эксплуатации объектов.

Приведенные данные свидетельствуют о недостаточности применения предельных состояний двух групп при оценке действительного напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых сооружений.

В 2006 году для выполнения работ по обследованию и оценке технического состояния объекта ДОННАСА был заключен договор «Обследование и оценка технического состояния моста № 3 ЦОФ «Кураховская». В состав работ по договору входили обследование, натурные испытания и оценка технического состояния основных несущих конструкций моста транспортной галереи № 3.

Мост № 3 представляет собой трехпролетное наклонное сооружение общей длиной 75 м (рис. 12). Угол наклона моста $16^{\circ}52'29''$. Во внутреннем контуре моста расположены два транспортера с шириной ленты 1200 мм, которые перемещают уголь от сортировки к главному корпусу ЦОФ.

По результатам динамических расчетов получены значения первых шести форм и частот собственных колебаний моста. Первые три формы сдвигового характера обусловленные колебанием поперечника моста из плоскости. Минимальная величина частоты собственных колебаний $\omega_1=2,913$ Гц. Формы порядкового номера 4–6 имеют изгибный характер, обусловленный изгибными колебаниями моста в плоскости. Минимальное значение частоты собственных изгибных колебаний $\omega_4=3,33$ Гц.

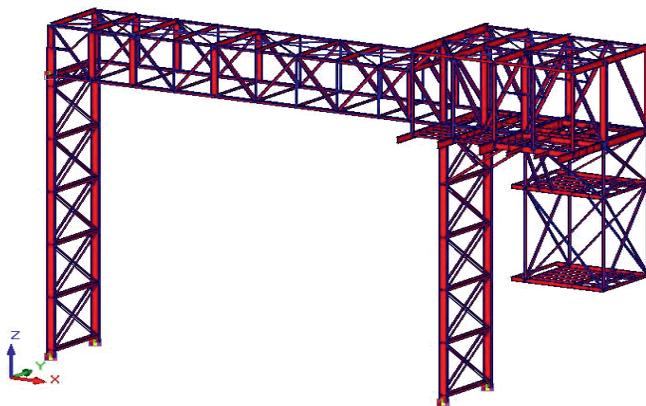


Рис. 9. Геометрия расчетной схемы моста галереи



Рис. 10. Запись показаний датчиков на ПК в натуральных условиях

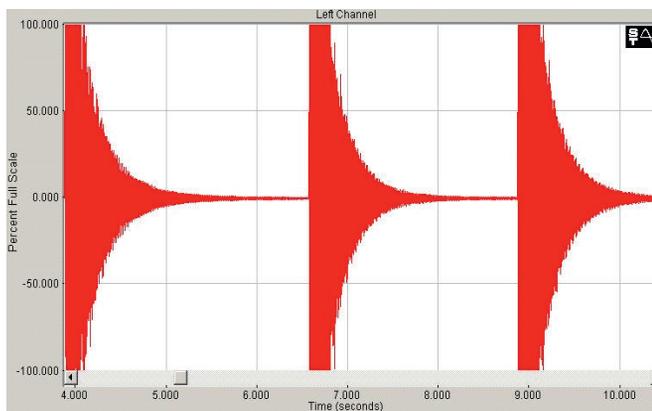


Рис. 11. Виброграмма колебаний стержня при серии ударных импульсов



Рис. 12. Общий вид моста транспортной галереи

На следующем этапе выполнены динамические испытания моста с применением универсальной системы мониторинга строительных конструкций УСМК-1 (рис. 13, 14).

Результаты выполненной работы позволили обеспечить дальнейшую безаварийную эксплуатацию моста галереи после усиления конструкций и при выполнении режима нормативной эксплуатации.

Указанные затруднения при оценке технического состояния возведенных и эксплуатируемых сооружений могут быть существенно снижены путем использования предложенного Н.С. Стрелецким понятия о третьем предельном состоянии, характеризующегося появлением недопустимого уровня совокупности несовершенств и дефектов в конструктивных элементах зданий и сооружений.

Для использования третьего предельного состояния при оценке качества возведенных и эксплуатируемых сооружений и их элементов предложено

понятие его критерия, характеризуемого изменением соответствующих физических, геометрических и жесткостных определяющих параметров вследствие появления различных несовершенств, дефектов и повреждений и дающего наглядное количественное отличие параметров технического состояния возведенных и эксплуатируемых сооружений от их проектных значений. Этот критерий характеризует подверженность элементов, конструкций и сооружений в целом отказу вследствие накопления дефектов и повреждений, накопленных в процессе жизненного цикла, соответствие которых состоянию отказа и будет определять третье предельное состояние.

Критерий третьего предельного состояния представлен в виде отношения проектных вероятностных значений функций определяющих параметров к их действительным значениям, или в детерминистической постановке:

$$P(K) = \frac{P(\Phi_n)}{P(\Phi_\partial)} = \frac{1}{P(\psi)}, \quad (1)$$

где K – критерий третьего предельного состояния;

$$K = \frac{\Phi_n}{\Phi_\partial} = \frac{A_n}{A_\partial} = \frac{1}{\psi}, \quad (2)$$

Φ_n и Φ_∂ – функции геометрических, физических и жесткостных параметров, определяющие проект-



Рис. 13. Внешний вид системы УСМК-1

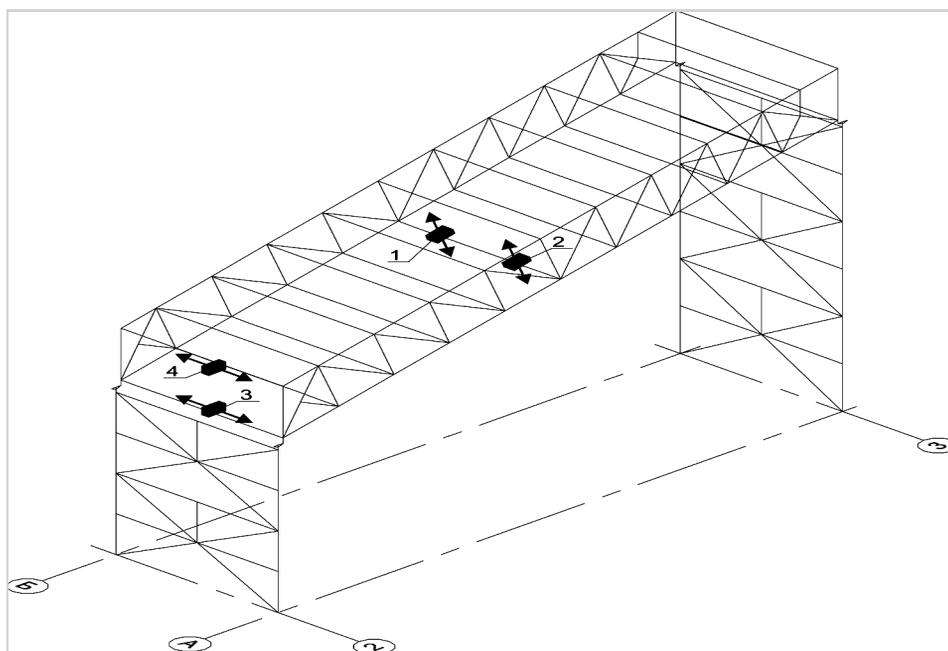


Рис. 14. Схема размещения датчиков ВЭГИК на мосту

ную и действительную работоспособность; A_n , и A_o – численные значения проектных и действительных значений работоспособности, определяемые функциями Φ_n и Φ_o ; ψ – величина, обратная критерию третьего предельного состояния и являющаяся показателем степени бездефектности сооружений и их элементов.

Представление третьего предельного состояния в виде отношения проектной и действительной работоспособности, определяемых функциями Φ_n и Φ_o , ψ , является наиболее полным, т.к. это физические, геометрические и жесткостные определяющие параметры.

При условии принятия значений и детерминистическими величинами, критерий третьего предельного состояния сооружений и их элементов является непрерывной случайной величиной.

В результате определен закон распределения плотности вероятностей для случайной величины «К» (критерия третьего предельного состояния, т.е. понятия подверженности отказу сооружений и их элементов вследствие накопления несовершенств). Этот закон может служить основой для назначения требуемых уровней технического состояния (конструктивной безопасности) проектируемых и эксплуатируемых сооружений по третьему предельному состоянию, характеризующему появлением недопустимого уровня совокупности различных несовершенств и дефектов, приводящих к отказу.

На рис. 15 представлена кривая распределения плотности вероятностей случайной переменной величины «К», правильность построения которой проверена методом численного интегрирования с использованием зависимостей:

$$M(K) \int_1^{\infty} K \left\{ \frac{K-1}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-(K-1)^2 / 2\sigma^2\right] \right\} dK = 2 \quad (3)$$

$$\int_1^{\infty} \frac{K-1}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-(K-1)^2 / 2\sigma^2\right] dK = 1$$

Математическое ожидание непрерывной случайной величины «К» равно 2, т.е. вокруг этого значения группируются все ее величины, и, следовательно, это значение следовало бы принять в качестве предельно допустимого для третьего предельного состояния. Однако мода случайной величины «К», т.е. значение «К», соответствующее наибольшей вероятности его появления, равна 1,8, и, кроме того, значение моды сдвинуто влево, т.е. в сторону более безопасных значений «К».

Следовательно, все значения величины «К» для проектируемых и эксплуатируемых сооружений должны располагаться в диапазоне значений [1; 1,8], т.к. при переходе по числовой оси в правую половину кривой (за значение моды) наступление случаев отказа (аварийных ситуаций) может принять лавинообразный характер у всех конструктивных элементов.

Практическое преимущество предлагаемой методики заключается в более приемлемой и наглядной оценке технического состояния возведенных и эксплуатируемых сооружений путем анализа результатов их обследования, выявления действительных определяющих параметров и получения соответствующих значений критерия степени подверженности конструкций отказу, т.е. критерия третьего предельного состояния. При этом степень влияния несовершенств и дефектов на проектную работоспособность сооружений и их элементов оценивается путем представления действительных определяющих параметров в виде функций их принадлежностей к соответствующим нечетким множествам.

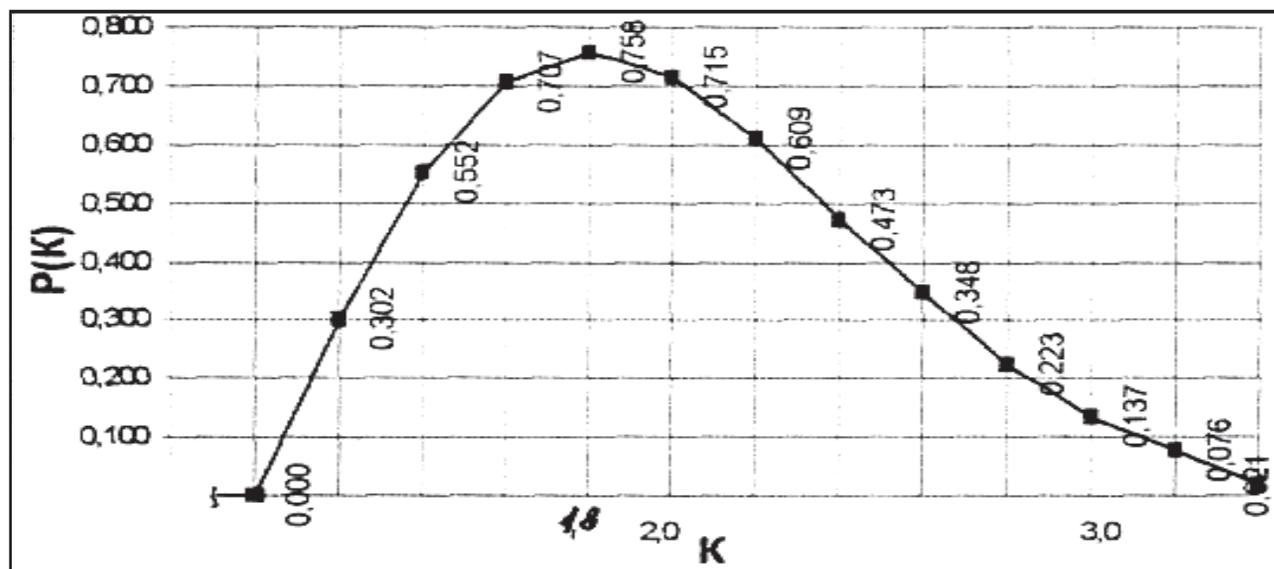


Рис. 15. Кривая распределения вероятностей параметра третьего предельного состояния

Данная методика оценки технического состояния сооружений и их элементов экспериментально проверена на ряде натуральных моделей в лабораторных условиях и при испытании натуральных сооружений.

Комплекс выполненных теоретических и экспериментальных исследований под руководством Е.В. Горохова позволил разработать и внедрить методологию оценки технического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений из металлических конструкций. Последовательность работ по оценке технического состояния включает в себя, кроме



и устранения аварийных ситуаций и техногенных рисков» (2003–2005 гг.).

Дальнейшим развитием данного научного направления стали работы, посвященные оценке надежности металлических конструкций зданий и сооружений на основе оценки влияния на показатели надежности отклонений (несовершенств) от проектных геометрических параметров объекта при изготовлении и монтаже.

В рамках этой работы в 2003–2010 годах выполнено исследование НДС шарнирно-стержневых



Рис. 16. Рама шагающего пода нагревательной печи стана 390

известных положений, техническую диагностику объекта при совместном анализе внешних возмущающих воздействий, имеющихся дефектов и повреждений, рекомендации по разработке расчетной схемы сооружения. Особенностью расчетной схемы сооружения являются учет динамического характера внешних возмущающих воздействий и совместный анализ работы несущего каркаса здания (сооружения) и его фундаментов. Учет совместной работы каркаса и фундаментов дает возможность более точно получать в результате расчета динамические характеристики объекта, так как разность в частотах колебаний основного тона без учета и с учетом фундаментов может достигать трех раз.

Разработанная методология апробирована на ряде промышленных объектов Донбасса и Украины.

Научное направление реализовано в рамках госбюджетных научно-исследовательских тем по заказу Министерства образования и науки Украины:

- «Разработка унифицированного аппаратно-программного комплекса мониторинга и прогнозирования технического состояния строительных металлических конструкций» (1997–1999 гг.);
- «Создание теоретических и технологических основ технической диагностики и прогнозирования технического состояния строительных металлических конструкций» (2000–2002 гг.);
- «Разработка программного обеспечения надежности конструктивных систем для предупреждения

металлических покрытий за счет прогнозирования отклонений в зависимости от точности изготовления и точности и последовательности укрупнительной и монтажной сборки.

Разработанная теория и методики технической диагностики и оценки технического состояния эксплуатируемых металлических конструкций стали основой для разработки аналогичных процедур при оценке технического состояния конструктивно-технологических систем.

Так, в 2018 году творческим коллективом ДОННАСА выполнена работа по обследованию и оценке технического состояния металлоконструкций балок нижней и верхней рам шагающего пода нагревательной печи стана 390 цеха прокатного передела филиала № 3 «ММЗ» ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (рис. 16).

Работа выполнена с применением визуальных и технических методов контроля в соответствии с разработанной в ДОННАСА под руководством Е.В. Горохова методологией.

Полученные после обследования и технической диагностики результаты позволили выполнить обоснованные численные расчеты напряженно-деформированного состояния системы.

Для обеспечения нормальной и безопасной эксплуатации металлоконструкций балок нижней и верхней рам шагающего пода нагревательной печи стана 390 предложено выполнить работы по капитальному ремонту с заменой аварийных конструкций и устранением выявленных повреждений.

Теоретические и экспериментальные исследования по развитию теории надежности эксплуатируемых металлических конструкций зданий и сооружений научной школы Е.В. Горохова продолжают и сегодня с привлечением современных методов аналитического, численного и экспериментального методов.

В рамках научной школы Е.В. Горохова по направлению оценки технического состояния, технической диагностики и прогнозированию технического состояния металлических конструкций промышленных зданий и сооружений защищены десять кандидатских и две докторские диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные на протяжении полувека теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать методологию оценки технического состояния и технической диагностики эксплуатируемых металлических конструкций зданий и сооружений, что позволяет с высокой достоверностью обеспечивать требуемый уровень надежности промышленных и гражданских объектов и экономить значительные материальные и финансовые ресурсы при планировании и осуществлении проектов реконструкции и технического перевооружения строительных объектов.

Список литературы:

1. Инструкция по технологии усиления металлических конструкций на реконструируемых предприятиях (РСН-86) / Е.В. Горохов, В.С. Балицкий, Е.Д. Косенков, В.Г. Колесниченко; Госстрой УССР. — Киев, 1986.
2. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к разделу 20 главы СНиП II-23-81*) / Е.В. Горохов, В.А. Перельмутер, В.В. Горев и др.; Госстрой СССР. УкрНИИпроектстальконструкция. — Москва, Стройиздат, 1988. — 159 с.
3. Методические рекомендации по техническому освидетельствованию строительных конструкций зданий, сооружений и инженерных сетей (для служб надзора, эксплуатации и цехового персонала) / Е.В. Горохов, В.П. Королев, И.Р. Рухович, К.Б. Мнацаканян; Территориальное упр. Госнадзорохрантруда Украины по Донецкой обл., ДонГАСА. Донецк, 1998. — 104 с.
4. Методические указания по организации технического надзора за состоянием производственных зданий / Е.В. Горохов, В.П. Королев, И.Р. Рухович и др.; Гостехнадзортруда по Донецкой области от 16.10.1998. № 395.
5. Методические указания по оценке конструктивных рисков для осуществления инженерной и страховой защиты строительных конструкций зданий, сооружений и инженерных сетей. / Е.В. Горохов, А.П. Шевцов, Ю.Н. Тимарицев, С.Г. Лунев, В.Л. Мотовилин, А.И. Сосис, В.В. Шукатко, В.П. Королев, И.Р. Рухович, Е.В. Шелехова; Главное управление градостроительства Украины по Донецкой области, 2000. — 21 с.
6. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов: Нормы проектирования. ГСН Украины. Издание официальное / Минстрой Украины. При участии Е.В. Горохова, С.В. Турбина. Киев, 2006. — 59 с.
7. Валь В.Н. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции / В.Н. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров. — Москва, Стройиздат, 1987. — 220 с.
8. Реконструкция промышленных зданий и сооружений: передовой опыт научных исследований, проектно-конструкторских разработок, технологии и организации строительства / Е.В. Горохов, В.В. Кузнецов, В.В. Ларионов и др.; под ред. Е.В. Горохова. — Москва, Стройиздат, 1988. — 136 с.: рис., табл. — (Курсом ускорения научно-технического прогресса).
9. Алгоритмы расчёта стальных конструкций / Е.В. Горохов, В.Ф. Муцанов, А.М. Югов, С.В. Колесниченко, В.Н. Васылев. — Москва, Стройиздат, 1989. — 368 с.: рис.
10. Реконструкция промышленных предприятий. В 2 т. Т. 1 / В.Д. Топчий, Р.А. Гребенник, В.Г. Клименко и др. (среди авт. Е.В. Горохов, В.Г. Колесниченко, Е.Д. Косенков, Г.Н. Тонкачев, Е.П. Уваров); под ред.: В.Д. Топчия, Р.А. Гребенника. — Москва, Стройиздат, 1990. — 589 с.: ил., табл. — (Справ. строителя).
11. Реконструкция промышленных предприятий. В 2 т. Т. 2 / В.Д. Топчий, Р.А. Гребенник, В.Г. Клименко и др. (среди авт. Е.В. Горохов, В.Г. Колесниченко, Е.Д. Косенков, Г.Н. Тонкачев, Е.П. Уваров); под ред.: В.Д. Топчия, Р.А. Гребенника. Москва, Стройиздат, 1990. — 621 с.: ил., табл. — (Справ. строителя).
12. Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции / Е.В. Горохов, Я. Брудка, М. Лубиньски и др.; под ред. Е.В. Горохова. — Москва, Стройиздат, 1994. — 496 с.: рис., табл.
13. Горохов Е.В. Методы и средства измерений при строительстве и эксплуатации подкрановых путей: монография / Е.В. Горохов, Н.Е. Ламбин, В.Н. Ламбин; ДОННАСА. — Макеевка, Графити, 1997. — 234 с.: ил.
14. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні: монографія / А.В. Перельмутера, В.М. Гордєєв, Є.В. Горохов та ін.; за ред. А.В. Перельмутера; Рада нац. безпеки і оборони України, Укр. ін-т досліджень навколишнього середовища і ресурсів. — Київ, Сталь, 2002. — 166 с.: ил., табл.
15. Горохов Е.В. Методы и средства измерений при строительстве и эксплуатации подкрановых путей: монография / Е.В. Горохов, Н.Е. Ламбин, В.Н. Ламбин; ДОННАСА. 2-е изд., перераб. и доп. Макеевка, Дмитренко Л.Р., 2007. — 245 с.
16. Горохов Е.В. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения: монография / Е.В. Горохов, С.Г. Кузнецов. — Донецк, Норд-Пресс, 2009. — 168 с.
17. Системы мониторинга технического состояния несущих металлических конструкций зданий и сооружений: монография / Е.В. Горохов, В.Ф. Муцанов, В.Н. Васылев и др.; под общ. ред. Е.В. Горохова, В.Ф. Муцанова; ДОННАСА. — Макеевка, 2013. — 314 с.