

ОТЧЕТЫ О РАБОТЕ СЕКЦИЙ XXII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

СЕКЦИЯ № 1. АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Руководители:

ВОПИЛКИН Алексей Харитонович,
д-р техн. наук, профессор, ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва

БАДАЛЯН Владимир Григорьевич,
д-р, техн. наук, ООО «НПЦ «ЭХО+», Москва

ШЕВАЛДЫКИН Виктор Гаврилович,
д-р техн. наук, ООО «АКС», Москва

Заседания секции № 1 «Акустический контроль» проходили все три дня конференции. На эту секцию было заявлено 23 доклада. Но, к сожалению, не все докладчики смогли присутствовать и сделать доклад. Возможно, сказалась и общая мировая обстановка с эпидемией. В частности, наши коллеги из Китая не приехали. Отсутствовали и некоторые докладчики из России. Всего с докладами выступили 16 специалистов.



В.Г. Шевалдыкин, В.Г. Бадалян



А.Х. Вopilкин (на фото слева)

Темы докладов весьма разнообразны — от теоретических и экспериментальных по ультразвуку до представления новой техники, методик ультразвукового контроля и их применения на практике. В одном из докладов были представлены результаты применения акустических микроскопов для контроля углепластиков. Вполне в духе времени несколько докладов были посвящены возможным применениям ультразвуковых антенных решеток для контроля разных объектов, причем не только из металла, но и из бетона.

Из теоретических докладов следует отметить сообщение К.Е. Аббакумова и А.В. Вагина из СПб-ГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, «Формирование акустического тракта на нормальных SH-волнах для обнаружения дефектов в изделиях с искривленной формой поверхности». В нем рассмотрены особенности распространения нормальных волн различных поляризации в цилиндрических изделиях (в стенках труб) в сравнении с плоскими объектами.

Близкая к этому докладу тема была рассмотрена в докладе Ю.В. Мышкина, О.В. Муравьевой, С.А. Королева, А.А. Понькина, Т.С. Чухланцева из ФГБУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова», Ижевск, и С.Ю. Ворончихина, АО «ИнтроСкан Технологии», г. Чайковский, «Влияние анизотропии свойств материала и геометрии трубы на скорости распространения нормальных SH-волн». В этой работе путем моделирования методом конечных элементов и экспериментально исследованы скорости SH-волн для трубы магистрального трубопровода. Рассмотрено влияние на скорость направления ее распространения, геометрии трубы, текстурной и геометрической анизотропии. Показано, что наибольшее влияние на скорость SH-волны при отклонении ее траектории от направления вдоль образующей до угла в 90° оказывает геометрическая анизотропия трубы. Но к этому влиянию неизбежно добавляется действие анизотропии свойств материала трубы. Эти влияния необходимо учитывать в алгоритмах обработки сигналов дефектоскопов волноводного ультразвукового контроля.



А.Е. Базулин



Ю. В. Мышкин



К.Е. Аббакумов

Очень яркое и насыщенное физическим смыслом сообщение сделал А.А. Марков, ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург, на тему «Новый информативный признак сигналов от дефектов при ультразвуковом скоростном контроле». Высокая скорость перемещения ультразвуковых преобразователей относительно рельса, которая используется при скоростном контроле рельсов в пути, вызывает значительные отклонения несущей частоты эхосигналов от частоты заполнения зондирующих импульсов, вызванные эффектом Доплера. Причем из-за некоторой ширины диаграммы направленности наклонного ультразвукового преобразователя сама доплеровская частота эхосигнала от любого отражателя в рельсе обладает девиацией, достигающей 14% от среднего значения доплеровского сдвига. И именно анализ этой частотной модуляции принимаемых сигналов позволяет вести обнаружение возможных дефектов в рельсе с высокой помехоустойчивостью.

При ультразвуковом контроле объектов с помощью антенных решеток, установленных на призму, в принимаемых решеткой сигналах присутствуют значительные реверберационные помехи. В реконструированных изображениях при сканировании объекта контроля они проявляются в виде неподвижных, но флюктуирующих по яркости и форме образов, маскирующих реальные образы отражателей. С одним из способов борьбы с такими помехами на конференции выступил Е.Г. Базулин, ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Москва, «Уменьшение уровня реверберационных шумов методом декорреляции при ультразвуковом контроле антенными решетками». Метод основан на компенсации коррелированных помех в принимаемых сигналах, т.е. на вычислении оценки коррелированной помехи и вычитания ее из прини-

маемого сигнала. На модельном эксперименте было показано применение этого метода для повышения качества изображения.

Специалисты Научно-производственного центра «ЭХО+» представили еще два доклада.

А.Е. Базулин с коллегами Е.Г. Базулиным, А.Х. Вовилкиным и Д.С. Тихоновым представил одну из последних разработок этой компании в докладе на тему «Ручной дефектоскоп «АВГУР-АРТ Р» — универсальное средство для РУЗК, МУЗК и АУЗК». В этом дефектоскопе с большим и ярким экраном реализованы все применяемые в настоящее время технологии визуализирующего ультразвукового контроля: методы фазированных решеток, цифровой фокусировки апертуры и дифракционно-временной метод. Программное обеспечение прибора позволяет использовать все разновидности алгоритмов визуализации внутренней структуры объектов контроля. Качество получаемых изображений аналогично качеству приборов ведущих зарубежных фирм.

Второй доклад авторов Д.С. Тихонова, Е.Г. Базулина, А.В. Бутова, А.В. Заушицына и С.В. Ромашкина «Новые технологии ультразвукового контроля аустенитных сварных соединений» представил Д.С. Тихонов. Аустенитные сварные соединения отличаются существенной анизотропией упругих свойств материала в объеме соединения и изменяющейся скоростью ультразвука в зоне шва по отношению к основному металлу. Поэтому для контроля таких соединений предпочтительно использовать продольные волны, более устойчивые к искривлению траектории распространения, чем поперечные волны. Наиболее эффективно вести контроль с помощью антенных решеток, особенно матричных, используя алгоритмы цифровой фоку-



сировки апертуры. В ходе доклада были приведены изображения реальных сварных соединений, полученные на действующих промышленных объектах.

Ультразвуковая томография продолжает осваивать новые области неразрушающего контроля. Ее применение для контроля изделий, получаемых по технологии трехмерной печати, рассмотрено в докладе специалистов из Санкт-Петербурга на тему «Ультразвуковая томография изделий, полученных методами аддитивных технологических процессов», Л.Ф. Гордеева, ПГУПС, В.А. Быченко, И.В. Беркутов, ООО «НТЦ «Эталон», И.Е. Алифанова, Университет ИТМО, Д.С. Сергеев, ООО «НТЦ «Эталон». Авторы разработали автоматизированную установку иммерсионного контроля, реализующую метод прохождения (теневой) и эхометод. Контроль колеса турбины, изготовленного методом селективного лазерного сплавления, показал высокую чувствительность к обнаружению моделей дефектов разных размеров и ориентации в объекте со сложной геометрией и шероховатой поверхностью.

Ультразвуковая микроскопия, являясь по сути разновидностью эхоимпульсной томографии, предоставляет уникальные возможности для исследования микроструктуры оптически непрозрачных материалов. Устройству, возможностям и областям применения такой техники был посвящен весьма интересный и обстоятельный доклад «Дефекты в углепластиках, выявляемые методами акустиче-

ской микроскопии», Ю.С. Петронюк, Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, В.М. Левин, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Т.Б. Рыжова, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская область. Акустические микроскопы работают на частотах 50 – 100 МГц и обеспечивают пространственное разрешение порядка 50 мкм на глубинах до 5 мм. Глубина зависит от рабочей частоты и свойств контролируемого материала. Для получения изображения объект контроля сканируют сфокусированным пучком по всем трем координатам. Из полученного массива данных выводят на экран изображения В и С типа с таким разрешением, что можно детально рассмотреть отдельные волокна, например, углепластика, обрывы их или микропоры, где отсутствует связующее. Эта техника является прекрасным средством для исследования материалов при их проектировании, испытаниях и отладке технологии производства.

В.Г. Шевалдыкин, ООО «Акустические Контрольные Системы», Москва, в докладе «Применение головных волн в ультразвуковой томографии» показал возможность реконструкции изображений металлических объектов с использованием акустических схем с поперечными и головными волнами. В этом способе реконструкции не используются

отражения ультразвука от донной поверхности объекта контроля. Способ может найти применение при контроле приповерхностных зон основного металла и сварного шва при отсутствии или глубоко залегающей донной поверхности.

Электромагнитно-акустический (ЭМА) способ возбуждения и приема ультразвуковых волн давно и успешно применяется в ультразвуковых толщиномерах и автоматизированных дефектоскопических установках. Этот способ позволяет легко возбуждать в металле поперечные волны, распространяющиеся по нормали к поверхности, с любым направлением вектора поляризации. Отсутствие промежуточных контактных сред позволяет выполнять прецизионные акустические измерения объемных скоростей ультразвука, а по ним вычислять упругие постоянные материала, что очень важно для диагностики работающего оборудования. В докладе В.Т. Боброва, В.М. Бобренко, ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр», Москва, и А.В. Гульшина, АО «НПО ЭНЕРГОМАШ им. акад. В.П. Глушко», Москва, «Акустический экспресс-способ измерения упругих констант металла потенциально опасных высокона-

груженных конструкций, работающих в экстремальных условиях» была изложена суть предложенного и запатентованного способа измерений упругих констант. Показаны осциллограммы принимаемых сигналов, по временам задержки которых видно, что скорости волн разных поляризаций отличаются, что позволяет оценивать также текстурную анизотропию материала. Приведены результаты измерений скорости и упругих констант в некоторых сталях ответственного назначения и в сплаве Д16Т.

Разнообразие тем докладов и объектов контроля еще раз доказывает практическую неограниченность сфер применения ультразвука для неразрушающего контроля материалов и изделий. Подробнее ознакомиться с докладами, представленными на конференцию, можно в прекрасно изданном сборнике трудов конференции «Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение безопасности общества в изменяющемся мире».

*Отчет подготовили
А.Х. Вopilкин, В.Г. Шевалдыкин*

СЕКЦИЯ № 2. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Руководители:

БЕХЕР Сергей Алексеевич,

канд. техн. наук, Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), Новосибирск

МУРАВЬЕВА Ольга Владимировна,

д-р техн. наук, ФГБОУ ВПО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова», Ижевск

РАЗУВАЕВ Игорь Владимирович,

канд. техн. наук, ЗАО «НПО «Алькор», Дзержинск

Работа секции «Акустико-эмиссионный контроль» проводилась в рамках трех заседаний 3–4 марта 2020 г. Интерес научного сообщества к секции оказался достаточно высоким, сравнимым с традиционно широко представленными секциями «Акустический контроль» и «Электромагнитный контроль», о чем свидетельствует количество заявленных докладов – 17, а также участвующих в работе секции докладчиков и слушателей – более 40 человек.



С.А. Бехер, О.В. Муравьева



И.В. Разуваев



С.И. Буйло



В.В. Чернова



В.В. Носов

Всего на секции заслушали и обсудили 14 докладов по всем основным направлениям развития акустико-эмиссионного (АЭ) метода: научно-исследовательские работы и методическое обеспечение, нормативно-правовое регулирование, разработка диагностических комплексов, преобразователей и программного обеспечения, опыт диагностирования реальных производственных объектов. Примечательно, что многие доклады были представлены молодыми учеными и специалистами.

В обзорном докладе председателя ТК371/ПК9 канд. техн. наук И.В. Разуваева (ЗАО «НПО «Алькор») освещены основные вопросы и выполнен анализ современного состояния и перспектив развития метода АЭ в нашей стране и за рубежом. Показано, что уровень отечественных АЭ-систем и методик контроля в целом соответствует мировому уровню, а дальнейшая работа сообщества российских специалистов АЭ-контроля должна быть направлена на гармонизацию нормативных документов с европейскими и международными стандартами, созданием правил и норм в области контроля новых современных материалов.

Обобщенный опыт ростовской школы акустико-эмиссионного контроля был отражен в докладе д-ра физ.-мат. наук С.И. Буйло и соавторов (Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича ФГАОУ ВО ЮФУ): теория инвариантов, основанная на пуассоновской модели источников АЭ, способы восстановления потока событий, методические вопросы и результаты диагностики теплоизоляции объектов космической отрасли. Д-ром техн. наук В.В. Носовым с соавторами (Санкт-Петербургский горный университет) представлены результаты комплексных исследований проблем определения ресурса опасных про-



изводственных объектов по результатам диагностирования методом АЭ.

Результаты акустико-эмиссионного контроля образцов и элементов авиационных конструкций, изготовленных из композитных материалов, представлены коллективом авторов ФГУП «СибНИИ им. С.А. Чаплыгина» д-ра техн. наук Л.Н. Степановой, канд. техн. наук С.И. Кабановым и В.В. Черновой. Получена устойчивая локация дефектов в режиме реального времени при прочностных испытаниях композитных материалов, установлена связь параметров разрушения структуры углепластика с изменением основных информативных параметров сигналов АЭ.

Новые перспективные направления исследований, связанные с решением методических вопросов акустико-эмиссионного контроля, прозвучали в докладах д-ра техн. наук С.А. Бехера с соавторами и д-ра техн. наук А.Л. Боброва с соавторами (Сибирский государственный университет путей сообщений СГУПС), канд. техн. наук Т.Б. Петерсен

(ООО «Диапак»), канд. техн. наук В.А. Барат с соавторами (ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ»). Намечены направления исследований в областях: спектральный анализ сигналов АЭ, вероятностные модели оценки достоверности результатов контроля, кластеризация по пространственной корреляции параметров сигналов АЭ, совершенствование критериев оценки технического состояния по результатам АЭ-контроля.

Особое внимание заслужили доклады, отражающие опыт производственного контроля на Кемеровском АО «Азот» (А.Г. Медведев с соавторами, г. Кемерово), а также доклады, связанные с разработкой методик и результатами контроля таких нестандартных объектов, как опоры контактной сети объектов (В.С. Фадеев, А.В. Никитин), запорная арматура ядерных энергетических установок (А.С. Стеклов) и др.

Отчет подготовили

О.В. Муравьева, С.А. Бехтер, И.В. Разуваев

СЕКЦИЯ № 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Руководители:

КОСТИН Владимир Николаевич,

д-р техн. наук, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

СМОРОДИНСКИЙ Яков Гаврилович,

д-р техн. наук, профессор, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

СЯСЬКО Владимир Александрович,

д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, ООО «Константа», Санкт-Петербург

Секция объединила доклады по трем видам НК: магнитному, вихретоковому и электрическому, ряд докладов был посвящен комплексному многопараметровому контролю с использованием в том числе и других видов НК.

Открыл работу секции доклад нашего коллеги из Беларуси д-ра техн. наук С.Г. Сандомирского «Повышение достоверности определения физико-механических свойств материалов по результату измерения их магнитных параметров», посвященный вопросам магнитного структурного анализа материалов, основанном на наличии связей между физико-механическими и магнитными свойствами, определяемыми структурой металла (напряжениями, распределением диспергированных частиц в матрице сплава, дефектов в кристаллической решетке, величиной зерна и др.), формируемой при термических обработках для выяснения влияния относительной и приведен-



В.Н. Костин



Я.Г. Смородинский



В.А. Сясько



Н.П. Кодак



С.Г. Сандомирский

ной погрешностей двухпараметрового косвенного измерения параметра на достижимое значение коэффициента корреляции между результатами его измерения и истинными значениями.

Большой интерес представил доклад А.В. Михайлова, Ю.Л. Гобова и Я.Г. Смородинского «Электромагнитно-акустические преобразователи для контроля магистральных трубопроводов», в котором подробно изложены результаты разработки нового поколения ЭМА-преобразователей, а также методик и систем сканирования объектов трубопроводного транспорта, позволившей исключить необходимость поперечного сканирования поверхности трубы при ультразвуковом контроле. Изложены практические результаты работы и технические характеристики разработанной системы контроля труб большого диаметра.

Достаточно редко на конференциях рассматриваются доклады по электрическому контролю. В представленном докладе В.А. Сясько и А.С. Мусихина «Электроискровой импульсный контроль функциональных диэлектрических покрытий толщиной от 25 мкм и более» показано,

что в области электрического контроля еще есть возможности оптимизации методов, в том числе достаточно широко применяемого электроискрового для контроля покрытий малой толщины, начиная от 25 мкм и выше. В докладе на основании теоретического анализа процессов искрообразования показаны возможности существенного увеличения чувствительности и приведены практические результаты электроискрового импульсного дефектоскопа, а также нового поколения электродов к нему.

Приятно было заслушать доклад наших коллег-метрологов из ВНИИМ им. Д.И. Менделеева Е.Б. Брюховецкой и А.Е. Ивкина «Контроль электромагнитных свойств металлических покрытий для обеспечения достоверности и повышения точности результатов измерений вихретоковых толщиномеров», в котором рассмотрены проблемы обеспечения единства измерений толщины металлических покрытий и результаты разработки распределенного эталонного комплекса свойств покрытий. В состав его вошли установки для измерения:

- толщины покрытия;
- удельной электрической про-

водимости покрытия;

- удельной электрической проводимости основания;
- относительной магнитной проницаемости основания.

Перспективным развитием данного направления является разработка нормативной документации на меры свойств покрытий с нормированием метрологических и технических характеристик, разработка поверочной схемы, в которой будут нормированы параметры, оказывающие влияние на результаты измерений вихретоковых толщиномеров.

Ряд докладов был посвящен актуальным проблемам и направлениям развития вихретокового контроля:

- доклад авторов И.В. Терехина и Е.А. Славинской «Импульсный вихретоковый контроль двухслойных немагнитных изделий накладным вихретоковым преобразователем», посвященный проблеме отдельного контроля электропроводности двухслойных электропроводящих структур;
- доклад Е.Г. Щукиса, А.Г. Жданова, В.П. Лунина и др. «Классификация и параметризация вихретоковых сигналов», позволивший по-новому взглянуть на

проблему многочастотного вихретокового НК и на вопросы обеспечения его достоверности с использованием алгоритмов нечеткой логики при обработке измерительной информации;

- доклад А.С. Крюкова, Е.Г. Шукиса, Н.О. Кодака и В.П. Лунина «Исследование и разработка комплекса вихретокового контроля оболочек тепловыделяющих элементов», в котором подробно изложены результаты разработки системы для выявления малоразмерных дефектов твэлов;
- доклад И.В. Терехина и Е.А. Славинской «Разработка вихретокового метода контроля уровня жидкой стали в сортовом кристаллизаторе», в котором рассмотрены вопросы разработки методики и аппаратуры вихретокового контроля уровня расплавленного металла при непрерывном литье; подробно описана теория, моделирование и принципы измерения, отличительные особенности измерительных преобразователей и практические результаты при использовании.

Традиционно большой интерес представляют вопросы магнитного контроля объектов РЖД. Теоретические и практические вопросы импульсного магнитного контроля изделий из ферромагнитных материалов, особенно магнитомягких, проанализированы в докладе П.А. Шарина, А.В. Чуприна, В.А. Чуприна и Т.А. Сосницкой «Контроль магнитомягких ферромагнитных материалов импульсным магнитным полем», в котором рассмотрена теория импульсного намагничивания таких материалов и показаны пути решения проблемы: выбора амплитуды импульсов намагничивания, их длительности и скважности. Разработано оборудование, обеспечивающее требуемую достоверность при контроле подвижного состава, технические характеристики которого подроб-



но изложены. В докладе А.Г. Антипова и А.А. Маркова «Намагничивающая система дефектоскопа с использованием колес в качестве магнитных полюсов» фундаментально проанализированы проблемы создания оптимальных по исполнению систем намагничивания и использующих колеса как их элементы, выполнено их моделирование и исследование характеристик опытного экземпляра, показавшее перспективность предлагаемых решений.

Два доклада наших коллег из Беларуси (В.Е. Антонюка и С.Г. Сандомирского «Анализ однородности распределения магнитных свойств в тонкостенных дисках для прогнозирования стабильности их формы» и С.Г. Сандомирского «Неразрушающий магнитный контроль физико-механических свойств ответственных крепежных изделий машиностроения и авиастроения») посвящены практическому использованию магнитного контроля на предприятиях республики для контроля остаточных напряжений деталей различного назначения и физико-механических свойств (в том числе твердости) крепежных изделий машино- и авиастроения.

С большим интересом были заслушаны доклады специалистов ведущего производителя оборудования для магнитного контроля стальных канатов фирмы «ИНТРОН +» Д.А. Слесарева, И.И. Шпакова и А.В. Семенова, в которых был обобщен опыт проектирования, производства и использования систем на конкретных объектах не только в нашей стране, но и за рубежом. При этом было отмечено, что более широ-

кое внедрение систем мониторинга технического состояния канатов требует разработки новых нормативно-технических документов и регламентов, которые будут учитывать дополнительные возможности таких систем и регламентировать их применение персоналом объектов, где используются стальные канаты.

Специалисты ООО «Константа» В.А. Сясько, А.Е. Ивкин и А.Ю. Васильев в докладе «Совершенствование магнитоиндукционного метода неразрушающего контроля толщины покрытий» традиционно уделили внимание проблемам разработки магнитных толщиномеров защитных покрытий и поделились опытом аппаратной и программной борьбы с мешающими параметрами, достижениями в оптимизации параметров геометрически подобных первичных измерительных преобразователей и моделировании систем измерительный преобразователь – многослойный объект контроля.

Объединение нескольких направлений исследований и разработок в рамках одной секции позволило специалистам, особенно молодым, шире посмотреть на проблемы трех видов НК, использующих электромагнитное поле в различных его проявлениях. Следует отметить возросший научный уровень докладов после нескольких лет провалов, за что хочется поблагодарить наших ведущих специалистов и подрастающую смену.

*Отчет подготовили
В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский,
В.А. Сясько*

СЕКЦИЯ № 4. КОНТРОЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Руководители:

ФЕДОРОВ Алексей Владимирович,

д-р техн. наук, Университет ИТМО,

Санкт-Петербург

ГОГОЛИНСКИЙ Кирилл Валерьевич,

д-р техн. наук, Санкт-Петербургский

горный университет, ООО «Константа»,

Санкт-Петербург

МУРАВЬЕВ Виталий Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, ИжГТУ

им. М.Т. Калашникова, Ижевск

Заседание секции № 4 «Контроль характеристик и напряженно-деформированного состояния материалов» состоялось 3 марта 2020 г. На секцию было заявлено 13 докладов, представлено 9 докладов. В работе секции приняло участие более 20 слушателей, активно участвовавших в обсуждении представленных докладов.

Тематика докладов охватывает широкий круг вопросов, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям различных средств и методов неразрушающего контроля (НК) параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и измерения механических характеристик материалов и изделий, в том числе ультразвуковых, электромагнитных, акустоэми-

сионных, а также методов твердометрии. Кроме того, в ряде докладов обсуждался опыт практического применения разработанных методик и оборудования для контроля технического состояния различных объектов, включая трубопроводы, железнодорожные пути, бетонные конструкции и др.

В докладе И. Алифановой с соавторами В.А. Быченком, И.В. Беркутовым «Акустические методы контроля механических напряжений в толстостенных трубах» были представлены два метода на основе эффекта акустоупругости: УЗ-метод с генерацией двух взаимно-поляризованных поперечных и одной продольной ультразвуковых волн и лазерно-ультразвуковой метод с генерацией головной подповерхностной волны. Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения и подтверждения характеристик разработанных средств контроля.

В докладе Л.А. Пасманика с соавторами «Применение метода акустоупругости для оценки остаточных сварочных и монтажных напряжений» рассмотрены вопросы практической реализа-

ции способа оценки остаточных сварочных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, использующий способность метода на основе эффекта акустоупругости обеспечивать измерение значений мембранных напряжений.

Д.В. Шитов в своем докладе с соавторами А.В. Жуковым и А.Н. Кузьминым «Оценка напряженно-деформированного состояния с помощью метода акустической эмиссии» рассмотрел возможность применения методов акустической эмиссии для оценки параметров НДС металлических конструкций и устройств, находящихся в эксплуатации, в том числе сосудов и участков магистральных газопроводов. Сделан вывод о возможности использования данного метода для предотвращения наступления предельных состояний.

В весьма обширном исследовании М.Р. Тютина и Л.Р. Ботвины, представленном в докладе «Исследование кинетики поврежденности конструкционных сталей с использованием физических параметров неразрушающего контроля», изучены вопро-





Д.В. Шитов

сы взаимосвязи деформации и разрушения конструкционных материалов на различных стадиях нагружения с физическими характеристиками, регистрируемыми широко применяемыми методами неразрушающего контроля. Данная работа представляет значительный интерес с точки зрения анализа перспектив применения различных методов НК для решения задач контроля механических характеристик и НДС.

Вопросы практического применения электромагнитного метода НК на основе эффекта Баркгаузена рассмотрены в докладе В.М. Хаткевича «Контроль напряженно-деформированного состояния рельсовой плети, основанный на эффекте Баркгаузена». Представлено устройство для определения фактической температуры закрепления, позволяющее осуществлять контроль напряженно-деформированного состояния рельсовой плети бесстыкового пути. Приведены результаты натурных экспериментов, подтвердившие эффективность данного технического решения.



В докладе Л.В. Волковой, А.В. Платунова и В.В. Муравьева «Разработка технологий оценки технического состояния рельсов с использованием ультразвуковых волн» представлены результаты разработки технологии оценки технического состояния рельсов, основанной на оценке напряженного состояния рельсов эхоимпульсным поляризационно-временным методом, а также результаты применения зеркально-теневого метода для контроля пера подошвы рельса.

В докладе А.В. Козлова «Определение упругих свойств материалов при поверхностном прозвучивании» представлены результаты лабораторных исследований акустического метода определения упругих параметров материала при поверхностном прозвучивании с помощью пары преобразователей с сухим точечным контактом. Полученные результаты подтверждают, что точность такого метода сопоставима со статическими методами определения упругих модулей и составляет порядка 1–10% измеряемой величины. Практическая ценность представленных результатов основана на применении в данном исследовании серийно выпускаемого оборудования. В процессе обсуждения были отмечены проблемы метрологического обеспечения данного вида измерений.

Комплексный метод НК дефектности диэлектрических материалов и изделий, в том числе изоляторов, конструкционных органических диэлектриков,

бетонных конструкций, основанный на контактном акустическом зондировании предмета контроля и бесконтактной регистрации электромагнитного отклика на такое воздействие с последующим амплитудно-частотным анализом электромагнитного сигнала, представлен в докладе А.А. Беспалько, А.П. Суржикова, Д.Д. Данна, Е.К. Помишина и М. Петрова «Акустико-электрический неразрушающий контроль дефектности диэлектрических материалов». Приведены результаты математического моделирования и лабораторных исследований.

К.В. Гоголинский с соавторами А.Д. Ашировой и А.А. Никазовым в докладе «Возможности применения портативных твердомеров для неразрушающего контроля механических свойств покрытий» представил результаты анализа применимости наиболее распространенных портативных твердомеров, в том числе динамических (Либа), ультразвуковых (УЗ) и портативных Роквелла (ПР), для измерения твердости различных типов покрытий. Полученные результаты подтверждают возможность применения УЗ- и ПР-твердомеров для НК защитных покрытий, в том числе гальванических на основе хрома, химически осажденного никеля, а также различных керамических и твердосплавных покрытий толщиной от нескольких десятков микрометров и более.

Отчет подготовил
К.В. Гоголинский

СЕКЦИЯ № 5. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ И ИНДУСТРИЯ 4.0

Руководители:

МАЕВ Роман Григорьевич,

академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт диагностической визуализации исследований в Виндзоре, Онтарио, Канада, ООО «Тессоникс», Москва

СЯСЬКО Владимир Александрович,

д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, ООО «Константа», Санкт-Петербург

ГОГОЛИНСКИЙ Кирилл Валерьевич,

д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, ООО «Константа», Санкт-Петербург

Революционные преобразования современного производства ставят перед специалистами в области НК и ТД много вопросов — от утилитарных до философских. Так и эта, впервые проводимая в рамках конференции, секция является первым небольшим шагом на пути к достижению глобальных целей — разработки принципов построения и реализации распределенных сетей связанных автономных измерительных преобразователей, образующих большие системы в пределах инфраструктуры распределенных умных про-

изводств, а также развития инженерных дисциплин в области физики методов НК, приборостроения, программирования как основы обеспечения долговременного функционирования этих систем на базе реалистичных многоуровневых моделей, встроенных в кибер-физические системы, использующих машинное обучение как основу реализации принципов искусственного интеллекта при переходе от выходного НК к сплошному мониторингу состояния (МС) и обеспечению системы достоверной ТД. В рамках работы секции рассмотрены принципы построения измерительных преобразователей, их метрологического обеспечения, а также валидации моделей, вопросы стандартизации. Часть докладов посвящена практической реализации измерительных преобразователей и систем, отвечающих принципам инициативы «Индустрия 4.0». Были представлены доклады, в том числе академика РАН Р.Г. Маева (Канада), ректора Южно-Уральского университета профессора А.Л. Шестакова, вице-президента Фраунгоферовского института неразрушающего контроля профессора Б. Валеске (Германия), вице-президента Китайского общества неразрушающего контроля профессора Лю Сонгпина, ученых из ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и других специалистов. Программа работы секции состояла из двух частей:

- I. Общие вопросы развития средств и методов НК в эпоху 4-й промышленной революции;
- II. Интеллектуальные измерительные системы и датчики.

В первой части секции «Общие вопросы развития средств и

методов НК в эпоху 4-й промышленной революции» было представлено 11 докладов.

Доклад Р.Г. Маева «NDE 4.0. New Approaches for “Zero-Defective” Mass-Manufacturing Production Using Ultrasonic Real-Time Monitoring of Bonded Joints Quality Based on Deep Learning Neural Network for Machine Learning Algorithms» был посвящен анализу перспективных концепций исключения ошибок при неразрушающем контроле на примере автоматизированного анализа качества точечной сварки в реальном времени (в процессе сварки) с помощью ультразвукового В-сканирования формирующегося свариваемого металла с помощью глубокого обучения, позволяющего классифицировать сварные швы (хорошие, приемлемые или плохие) и вносить корректирующие поправки в сварочный процесс, что делает революционным сам процесс сварки и его мониторинга с элементами технической диагностики.

В докладе Б. Валеске «NDT4.0 – Assistance Systems, Interfaces and Networked NDT Processes with Sensor and Data Intelligence for Services and Automated Devices in Digital Environments» выполнен анализ систем НК в изменяющемся промышленном производстве, что позволяет позиционировать его как NDT 4.0 – логическую составную часть Industry 4.0. Представлен обзор выполненных работ в следующих областях: универсальных платформ и электронных интерфейсов со стандартизованным форматом данных, технологий генерации информации, передовых методов обработки измерительной информации с использованием машинного об-



Р.Г. Маев



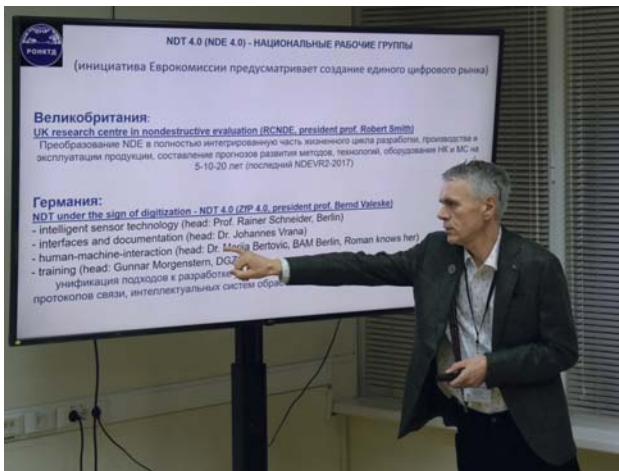
учения и искусственного интеллекта. Представлены первые демонстрационные проекты, представляющие возможности концепций NDT 4.0: интеллектуальная модульная система человеко-машинной помощи с интегрированным интерфейсом для выполнения тестов, документирования тестовых данных и оценки данных; ультразвуковая и вихретоковая системы с развитым интерфейсом для взаимодействия человека с машиной и межмашинной связи; интегральный монокристаллический датчик, реализующий концепцию «все на чипе» для хранения информации об изделии, настроек и результатов контроля; система объединения данных испытаний с многоуровневой моделью объекта и производственного процесса в едином формате с использованием открытых унифицированных интерфейсов для ультразвуковых, вихретоковых и микроволновых систем. Представлены прототипы разработок модулей для умных производств.

Доклад В.А. Сясько и К.В. Голинского «Актуальные цели и задачи метрологии и приборостроения в области неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния, связанные с тенден-

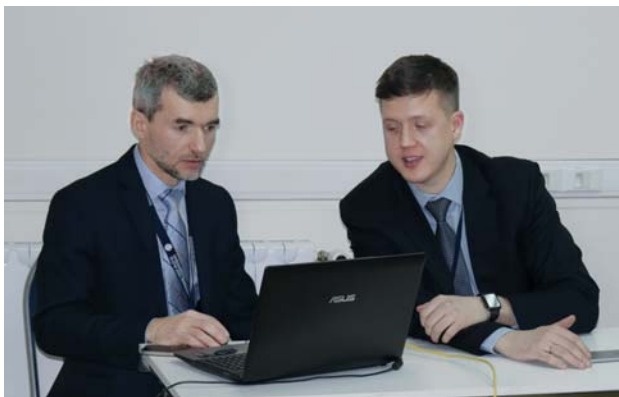
циями цифровизации промышленности и экономики» является завершающим в исследованиях, посвященных указанным в названии проблемам, применительно к интенсивно развивающимся умным распределенным производствам. Рассмотрены проблемы и задачи объединения в единую распределенную сеть средств измерения (СИ) и средств НК разных производителей, создания систем НК, функционирующих без человека, выработки единых подходов разработки, аттестации и применения цифровых моделей «система НК – объект контроля» и разработки соответствующих стандартов и принципов метрологического обеспечения, в частности: разработки и внедрения методических основ и технических решений при создании интеллектуальных многопараметрических датчиков; разработки новых методов метрологического обеспечения многопараметрических измерений, включая измерения при НК, в целях повышения достоверности результатов НК, а также автоматической адаптации средств НК к изменению параметров контролируемого объекта или окружающей среды; разработки стандартов на методы и средства самодиагностики и автокоррек-

ции СИ и средств НК, функционирующих в автоматическом режиме, а также их метрологического обеспечения; разработки средств и методов метрологического обеспечения цифровых моделей и встраивания виртуальных СИ и эталонов в цепь прослеживаемости; разработки стандартов для аттестации (верификации и валидации) цифровых моделей объектов контроля и средств НК.

В рамках двухстороннего научно-технического сотрудничества российского и китайского национальных обществ был представлен доклад Лю Сонгпина и Лю Фейфей «China Society of Non-Destructive Testing. Basic Technical Consideration and Action for Industry 4.0 in Composites NDT&E Direction», в котором помимо общих вопросов, касающихся перехода от традиционного НК к НК 4.0, подробно рассмотрены проблемы развития технологий производства композитных материалов до уровня Индустрии 4.0, в связи с которыми возникли новые практические требования к инновационным технологиям НК. Рассмотрены решения в области исследований, разработки и применения методов и систем НК композитов, проанализированы и обобщены некоторые основные



В.А. Сясько



К.В. Гоголинский, А.А. Кирьянов

технические идеи и последние действия в области NDT&E 4.0 для Индустрии 4.0 умных производств авиационной техники.

С фундаментальным докладом «Развитие метрологии в контексте четвертой промышленной революции» выступили сотрудники ВНИИМ им. Д.И. Менделеева Р.Е. Тайманов и К.В. Сапожников. В докладе были рассмотрены следующие вопросы: расширение спектра величин, требующих измерения и мониторинга их состояния (переход к многопараметрическим измерениям, усложнение моделей, необходимость мониторинга характеристик пространственно-разнесенных объектов, увеличение числа каналов измерения и объема данных при необходимости виртуальных испытаний систем и расширения межповерочного интервала при обеспечении требуемой достоверности информации); автоматизация метрологического обеспечения в процессе эксплуатации (стремительно увеличивающееся число датчиков многоканальных распределенных систем измерения не должно приводить к снижению достоверности результатов при условии расширения межповерочных интервалов и

условии выполнения самокалибровки и самовосстановления характеристик). Приведен пример и подробно описаны характеристики первых в мире измерительных систем с функциями самоконтроля — прямыми и диагностическими, в основу которых положено обеспечение избыточности различного типа в целях контроля критических составляющих погрешности и ее корректировки. Рассматриваемое направление актуально для всех видов измерений, а также НК. В будущем при широком использовании СИ и МИС с МСК, а также встроенных в аппаратуру серийных квантово-механических эталонов для большей части СИ периодическая поверка или калибровка не потребуется. Достаточно будет через 10–15 лет заменять их как морально устаревшие.

Четвертая промышленная революция предполагает более широкое применение информационных технологий путем трансформации предприятия в цифровое. В ПАО «Газпром нефть» цифровую трансформацию рассматривают как важнейший фактор роста, чему был посвящен доклад А.А. Кирьянова «Актуальные цели и задачи метрологии в нефтегазодобывающей отрасли в эпоху цифровизации». До 2030 г. компания предполагает создание собственной единой цифровой платформы и переход на управление бизнесом на основе данных с помощью искусственного интеллекта, в том числе в области измерений, НК и МС технологического оборудования. При этом главными вопросами будут: метрологическое обеспечение цифровой платформы (при обеспечении самодиагностики, самокалибровки, дистанционной поверки); построение защищенных распределенных информационно-измерительных систем на основе облачных вычислений; метрология цифровых двойников на основе моделирования процессов и объектов). За последние два года компания реализовала успешные проекты в области внедрения систем с искусственным интеллектом, предиктивной аналитики, а также технологии блокчейн. Высокую эффективность показали первые разработки цифровых двойников скважин, буровых и нефтеперерабатывающих установок, что позволяет использовать полученные результаты для выработки решений в области обеспечения единства измерений для развития цифровых технологий в области измерений, НК и МС.

Важным направлением развития систем НК и МС является использование риск-ориентированного подхода. Комплексный подход к проблеме обеспечения надежности технологического оборудования с применением этого подхода проанализирован А.Б. Самохваловым («Технико-экономическая модель планирования неразрушающего контроля с использованием риск-ориентированных

подходов») на примере обобщенной модели технического обслуживания и НК сосудов давления, насосов и компрессоров, учитывающей конструктивные особенности, условия эксплуатации, механизмы возникновения повреждений, виды отказов и их последствия, с учетом стратегии технического обслуживания и диагностики, истории техобслуживания и блока планирования. Предложенная модель реализована для установки первичной переработки нефти. Модель составлена для предприятий нефтеперерабатывающей отрасли с использованием методик RBI и RCM, но с учетом соответствующих модификаций может применяться более широко. Полученная информация использована для оптимизации планов применения НК в рамках предприятия в целях увеличения эффективности диагностики и технического обслуживания оборудования, снижения рисков и повышения надежности технологических процессов.

В докладе Г.Я. Буймистрюка «Неразрушающий контроль изделий на основе встраиваемой интеллектуальной волоконно-оптической сенсорики» рассмотрены возможности интеллектуализации НК изделий, производимых с помощью передовых аддитивных технологий, состоящие в обеспечении диагностического самоконтроля исправности (достоверности показаний) и метрологического самоконтроля погрешности (точности измерений) встроенных малоразмерных волоконно-оптических датчиков (микронного и субмикронного размера) в процессе их эксплуатации при контроле недопустимых внутренних напряжений. Основным посылом является то, что выходные сигналы волоконно-оптических сенсоров по своей физической природе мультимодальны (изменяемыми параметрами являются взаимосвязанные амплитуда, фаза, частота и поляризация их сигналов), что позволяет за время, меньшее времени изменения большинства контролируемых процессов, калибровать (градуировать) датчики в отсутствие эталонов, изменяя с помощью перестраиваемых оптико-электронных элементов один из четырех параметров при условном постоянстве других. Показано, что разработка и применение технологий сенсорного слияния многопараметровой информации от волоконно-оптической сенсорной сети малоразмерных и нервоподобных интеллектуальных датчиков является ключевой тенденцией развития систем оптического НК.

«Концепция мобильного модульного материало-ведческого комплекса на основе AR-технологий для нужд образования, производства и неразрушающего контроля» была рассмотрена коллективом авторов из Рыбинского государственного технического университета (М.А. Ганzenым, К.А. Во-

робьевым, А.В. Михрютиной, В.В. Мусиновым и Р.А. Серовым), предлагающим использовать технологии дополненной реальности (AR) в процессе обучения студентов технических специальностей, в том числе в области НК. При применении комплекса в учебном процессе предполагается взаимное обучение студента и слабого искусственного интеллекта под контролем тьютора (опытного преподавателя). При этом система генерирует набор возможных ответов, а студент итерационным методом выбирает оптимальное решение. Таким образом, одновременно в интерактивном режиме происходит обучение и студента, и системы искусственного интеллекта (аналог нейросети). При применении в промышленности в базу данных комплекса могут быть загружены цифровые двойники технологий сборки, дефектоскопии и ремонта ответственных изделий (в качестве примера авторами доклада рассматривались современные и перспективные газотурбинные двигатели).

Весьма содержательным представляется материал исследований коллектива авторов А.А. Маркова, Е.А. Максимовой, Н.В. Полонского (ОАО «Радиоавионика») «Мониторинг развития дефектов рельсов при многоканальном ультразвуковом контроле». Оценка сигналов от дефектов рельсов усложняется тем, что диагностические средства осуществляют многоканальный и многометодный контроль. Кроме того, средства разрабатываются разными производителями, имеют разные схемы ультразвукового прозвучивания и разную специфику отображения дефектоскопических сигналов. Для их оценки предлагается использовать интегральные параметры, охватывающие контролируемые параметры на основании типовых моделей дефектов. С применением разработанной на основании данного подхода методики были проанализированы десять реальных развивающихся дефектов разного типа в головке рельсов с момента их развития до изъятия рельсов. Результаты исследования показали, что, используя предлагаемый параметр, можно усовершенствовать алгоритмы автоматической расшифровки сигналов от дефектов на фоне шумов и ложных отражений в процессе МС и принятия решений. Предложенные подходы могут применяться при мониторинге развития дефектов и в других отраслях НК.

Доклад Е.В. Абрамовой «Оценка теплозащитных параметров ограждающих конструкций зданий и сооружений в условиях их эксплуатации тепловым методом. Методики контроля» посвящен практической реализации системы мониторинга сопротивления теплопередачи в условиях нестационарных условий окружающей среды на основе многоуровневых моделей «дефектоскоп/ограждающая конструкция», учитывающих основные



К.В. Гоголинский, выступает И.И. Федосов

требования существующей и перспективной нормативной документации, и разработки единой технологии контроля с учетом современной теории и практики теплового контроля.

Во второй части секции «Интеллектуальные измерительные системы и датчики» было представлено шесть докладов.

Перспективы применения концентрационных элементов (одножильных кабелей из меди или нержавеющей стали) для задач измерения уровня однофазных или двухфазных жидких сред (например, пар–вода) и реализации метрологического самоконтроля кондуктометрических и емкостных уровнемеров дискретного типа рассмотрены в докладе А.А. Калашникова «Уровнемеры с функцией метрологического самоконтроля на основе концентрационного эффекта».

«Особенности измерения силы совокупным методом» для больших значений силы (свыше 1 МН) рассмотрены сотрудниками ВНИИМ им. Д.И. Менделеева А.Ф. Остривным и И.Ю. Шмигельским. Описываемый метод совокупных измерений силы заключается в одновременном нагружении измеряемой силой нескольких предварительно отградуированных силоизмерительных датчиков, находящихся между двумя жесткими плоскостями. В условиях эксплуатации неизбежно появление систематических погрешностей, связанное с нестабильностью их градуировочных характеристик. Основными влияющими факторами при выявлении систематической погрешности каждого отдельного датчика в группе являются геометрия силовведения и возможное перераспределение силы. Соблюдение условий компланарности позволяет путем сравнения показаний датчиков между собой с применением специальной математической модели выявлять появление систематической погрешности измере-

ний и на этой основе в течение длительного времени эксплуатации обеспечивать метрологический самоконтроль измерительной системы.

Четыре доклада были представлены группой студентов и аспирантов Южно-Уральского государственного университета и их научным руководителем А.Л. Шестаковым.

И.И. Федосов, А.Л. Шестаков сделали доклад «Концепт системы диагностики датчиков температуры». Рынок средств измерения температуры составляет более 20% мирового рынка устройств для измерений и испытаний. Статистические данные показывают, что до 15% аварий энергетического оборудования вызваны выходом из строя измерительных систем, в том числе средств измерения температуры. В работе предложен концепт системы диагностики контактных средств измерения температуры, который позволит увеличить точность и надежность измерения температуры при сохранении простоты внедрения и низкой стоимости владения для пользователя. Система основана на получении дополнительной диагностической информации и будет совместима с существующими типами контактных средств измерения температуры и интерфейсами взаимодействия с АСУТП. Основными элементами новизны системы являются диагностические модели для одной или группы термопар на основе классических математических моделей и моделей, управляемых данными, критерии оценки текущего состояния термопары и качества теплового контакта с объектом измерения, метод компенсации дополнительной погрешности, метод оценки остаточного эксплуатационного ресурса.

С докладом «Разработка модели искусственной нейронной сети для диагностирования и прогнозирования состояний колонны бурильных труб на предмет риска возникновения прихватов» выступили Ш.Ш. Кодиров, А.Л. Шестаков. Наиболее распространенным и трудоемким видом аварий в процессе бурения скважин является прихват бурильной колонны — непредвиденный процесс при сооружении скважин, характеризующийся потерей подвижности колонны труб или скважинных приборов при приложении к ним максимально допустимых нагрузок с учетом запаса прочности труб и применяемого оборудования. На основе искусственных нейронных сетей разработана модель диагностирования и прогнозирования прихватов на стадии проектирования строительства и в процессе бурения скважины на основании анализа шестнадцати параметров с их бинаризацией. В разработке полученной модели диагностирования и прогнозирования применялись важные и обобщающие косвенные диагностические показатели, позволяющие прогнозировать все виды прихватов колонн бурильных труб. Представленный

способ преобразования элементов входных данных позволяет полученной модели нейронной сети адаптироваться к новым выборкам, в том числе от скважин различных месторождений. Экспериментальным способом обоснована архитектура сети и выявлены наилучшие гиперпараметры, а также комбинация активационных функций, благодаря которым получена оптимальная модель для решения данной задачи. При этом модель позволяет провести процедуру диагностирования и прогнозирования прихватов на стадиях проектирования и в процессе бурения скважины, в результате чего будут минимизированы риски возникновения непредвиденных аварий.

В.В. Синицин, А.Л. Шестаков представили доклад «Метод получения информации о техническом состоянии исполнительного механизма с его вращающегося вала». Крутильные колебания в ряде случаев несут важную диагностическую информацию о состоянии машины. Авторами разработан, изготовлен и исследован прототип (экспериментальный образец) датчика ускорений, который содержит три равноудаленных от центра вала одноосевых акселерометра, расположенных в одной плоскости. Датчик ускорений, обладающий высокой чувствительностью к собственным частотам механической системы и закрепляемый на валу машины-симулятора, раскручивается двигателем симулятора от состояния покоя до заданной частоты вращения, позволяет обнаруживать зарождающиеся дефекты механизмов и прогнозировать их состояние.

«Диагностика технического состояния датчика давления штуцерного исполнения» описана в докладе Е.С. Туговой, О.Ю. Бушуева, Д.Д. Салова, Е.А. Бобкова. Штатная электроника датчиков давления позво-



За столом А.Л. Шестаков, А.А. Кирьянов



ляет обнаружить ряд неисправностей чувствительного элемента, но не проблемы, происходящие с механико-гидравлической системой датчика давления (точечная коррозия или вытекание жидкости). В работе исследовались датчики для измерения избыточного давления – изменения состояния механико-гидравлической системы. Испытания проводили на гидропрлическом стенде при разных значениях давления рабочей среды, далее данные с них записывались и обрабатывались. Статистические характеристики исправных и неисправных модулей сравнивали между собой. В результате было установлено, что среднее квадратичное отклонение (СКО) кодов на выходе АЦП в случае исправных датчиков в технологическом процессе зависит от значения давления рабочей среды, и, напротив, при наличии неисправности (вытекание жидкости более 10 %) СКО становится минимальным

и не зависит от входного давления. Таким образом, СКО может служить признаком возникновения данного вида неисправности при наличии достаточного уровня шума в системе.

По результатам работы секции принято решение об организации рабочей группы, целями которой будет являться формирование задач и программы работы в области стандартизации и метрологического обеспечения распределенных СИ, систем НК и МС, а также систем моделирования, сбора и обработки измерительной информации для кибер-физических систем и перспективных умных производств.

*Отчет подготовили
В.А. Сясько, К.В. Гоголинский*

Отчеты по другим секциям конференции, а также отчеты по круглым столам форума читайте в №3 (июль-сентябрь), 2020 «Территория NDT»