DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-4-216-222
УДК 697.97+614.844: 614.838
Тип статьи: Обзорная статья

Нанотехнологии испытаний и диагностики материалов, конструкций и элементов инженерных систем зданий с огнезащитными покрытиями. Часть 2

В.В.Белозеров[1], Вл.В.Белозеров[1], А.И.Голубов[2], И.Е.Кальченко[2*], Ю.В. Прус[3]

[1] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», г. Москва, Россия
[3] ФГАБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», г. Москва, Россия

*** Контакты:** e-mail:ivanmd@mail.ru

РЕЗЮМЕ: Введение. Для определения эффективности огнезащитных покрытий (ОЗП) в настоящее время существует система методов огневых и высокотемпературных испытаний огнезащищенных материалов и конструкций из них, однако методов и средств текущей эффективности огнезащиты нет, а существующие методики не распространяются на определение предела огнестойкости строительных конструкций с огнезащитой, а устанавливают только группу эффективности самих огнезащитных составов. Поэтому для оценки качества и долговечности ОЗП, при условии обеспечения ими параметров термоустойчивости защищаемых материалов, конструкций и элементов инженерных систем объектов,необходимо было разработать экспресс-метод и переносной комплекс диагностики огнезащитных покрытий (ПКД ОЗП). **Методы, модели и средства.** На основе системного анализа существующих технологий противопожарной защиты строительных материалов из дерева, металлов, резины и полимеров была разработана методология экспресс-анализа и переносной диагностический комплекс (ПДК) термо-электро-акустического (ТЭА) зондирования ОЗП, использующие термо-акустические методы, что позволило определять теплопроводность, скорость ультразвука и коэффициент его поглощения в ОЗП на объекте, а также провести сравнительный анализ «образа ОЗП», полученного на БЭТА-анализаторе с измеренными характеристиками, по результатам которых вычислить время его работоспособности. **Результаты и обсуждение.** ПДК ОЗП состоит из корпуса с ноутбуком, с измерителем иммитанса и двухканальной осциллографической приставкой, подключённых к ноутбуку, на входы которых подключается блок ТЭА-зондирования, прижимаемый к ОЗП проверяемого объекта (конструкции, материала, кабеля) по тепловым, электрическим и акустическим сигналам, с которого программное обеспечение (ПО) ноутбука идентифицирует свойства и стадии эксплуатационной устойчивости ОЗП. ПДК ОЗП и предлагаемый подход позволили синтезировать модель Интернет-системы ТЭА диагностики ОЗП и надзора за эксплуатационной устойчивостью защищаемых материалов. Новизна исследования защищена патентами РФ. **Заключение.** Предлагаемый подход и ПДК ОЗП позволили реализовать экспресс-анализ ОЗП на объекте эксплуатации и синтезировать модель Интернет-системы ТЭА-диагностики ОЗП, которая может стать основой национальной системы надзора в данной предметной области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: огнезащитные покрытия, степень огнестойкости, материалы и конструкции, качество огнезащитных покрытий, долговечность огнезащитных покрытий, термо-электро-акустический метод, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, старение огнезащитных покрытий, опасные факторы пожара.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белозеров В.В., Белозеров Вл.В., Голубов А.И., Кальченко И.Е., Прус Ю.В. Нанотехнологии испытаний и диагностики материалов, конструкций и элементов инженерных систем зданий с огнезащитными покрытиями. Часть 2 // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 4. – С. 216–222. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-4-216-222.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения эффективности огнезащитных покрытий (ОЗП)в настоящее время существует система методов огневых и высокотемпературных испытаний огнезащищенных материалов и кон-

© Белозеров В.В., Белозеров Вл.В., Голубов А.И., Кальченко И.Е., Прус Ю.В., 2020

струкций из них [1, 2]. Однако методов и средств текущей эффективности огнезащиты нет, а существующая методика оценки разделяет ОЗП на семь групп, в зависимости от времени прогрева до 500°С стальной колонны двутаврового сечения профиля № 20 или профиля № 20Б1 высотой 1700 мм, покрытой ОЗП [3]:

1-я группа – не менее 150 мин.;
2-я группа – не менее 120 мин.;
3-я группа – не менее 90 мин.;
4-я группа – не менее 60 мин.;
5-я группа – не менее 45 мин.;
6-я группа – не менее 30 мин.;
7-я группа – не менее 15 мин.

При этом методика не распространяется на определение предела огнестойкости строительных конструкций с огнезащитой, а устанавливает только группу эффективности самих ОЗП.Такой же подход используется для ОЗП, применяемых для защиты древесины, кабелей и т.д. [2–5].

Таким образом, опять **налицо латентная форма оценки эффективности ОЗП** – не по работоспособности (прочности, термостойкости, изолирующей способности и т.д.) защищаемого материала, а по косвенным характеристикам самого ОЗП [6].

Именно поэтому для оценки качества и долговечности ОЗП в реальных условиях эксплуатации, при условии обеспечения ими параметров устойчивости к воздействию защищаемых материалов, конструкций и элементов инженерных систем объектов (зданий, сооружений), необходимо было разработать экспресс-метод и переносной диагностический комплекс огнезащитных покрытий (ПДК ОЗП).

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И СРЕДСТВА

На основе системного анализа существующих технологий противопожарной защиты строительных материалов из дерева, металлов, резины и полимеров была разработана методология экспресс-анализа и переносной диагностический комплекс (ПДК) термо-электро-акустического (ТЭА) зондирования ОЗП, использующие термо-акустические методы, что позволило определять теплопроводность, скорость ультразвука и коэффициент его поглощения в ОЗП на объекте, а также провести сравнительный анализ «образа ОЗП», включающего его эксплуатационное старение, полученного на БЭТА-анализаторе, с измеренными характеристиками на объекте во время проверки, по которым вычислить время его работоспособности [6–10].

Разработанный способ термо-электро-акустического (ТЭА) зондирования использует не только метод акустической эмиссии (АЭ), но и метод молекулярно-акустического анализа (МА), что позволяет определить скорость – $c(T)$ и частоту – $\omega(T)$ ультразвука в ОЗП, после чего вычислить коэффициент его поглощения – αc и проверить значение E – модуля Юнга, полученного на БЭТА-анализаторе [9–11]:

$$E = \rho \cdot c^2, \text{ were } c(T) = (2l_в + d/2)/(\tau_г - \tau_п), \quad (1)$$

$$\alpha_c = \frac{\omega^2}{2\rho \cdot c^3}\left[\frac{4}{3}\eta + \varepsilon + \lambda \cdot \left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P}\right)\right], \quad (2)$$

где $l_в$ – длина акустического волновода, d – диаметр образца, $\tau_г$ – время возбуждения первым датчиком импульса от эталонного генератора, $\tau_п$ – время приема вторым датчиком импульса от эталонного генератора, ρ – плотность образца, c – скорость звука в образце, ω – круговая частота звуковой волны, η – коэффициент сдвиговой вязкости, ε – коэффициент объемной вязкости, λ – коэффициент теплопроводности, C_V – теплоемкость при постоянном объеме, C_P – теплоемкость при постоянном давлении.

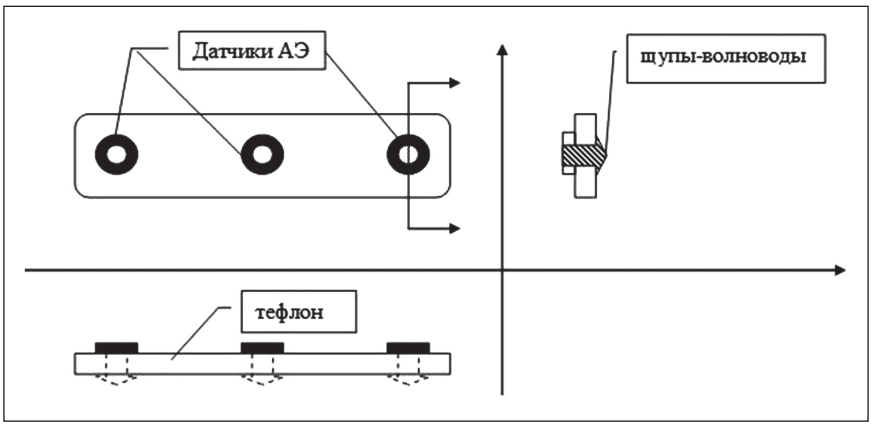

Рис. 1. **Плата ТЭА-зондов**

ТЭА-зондирование осуществляется с помощью специальной платы (рис. 1), которая содержит три металлических зонда, установленных на фторопластовой пластине по прямой линии на фиксированных расстояниях, на каждом из которых установлен акустический датчик. Крайние датчики подключаются на отдельные входы осциллографической приставки через предусилители, регистрируя акустические сигналы, а центральный – на выход ее эталонного генератора через управляемый электронный ключ, работая как излучатель ультразвуковых сигналов [7, 9].

На каждом из трех зондов установлено по одному тепловому датчику, подключаемому на вход измерителя иммитанса через управляемый коммутатор, измеряя температуру (по изменению их сопротивлений). Каждый из трех зондов представляет заостренный термо-электро-акустический волновод из молибдена, подключаемый на вход измерителя иммитанса через управляемый коммутатор, для измерения электрических и тепловых параметров ОЗП между зондами, а к осциллографической приставке – для измерения акустических сигналов [9].

При калибровке по известной плотности стенки корпуса ПДК ОЗП из алюминиевого сплава (ρ), теплоемкости (Cp) и модулю объемной упругости ($K = 1/\beta$), а также калиброванных расстояний между зондами (lц и lк) специальное программное обеспечение (рис. 2) управляет ПДК и определяет следующие параметры [9, 12]:

– механические – модуль Юнга ($E = \rho C^2$), модуль сдвига ($G = 3E/(9\text{-}E/K)$ и коэффициент Пуассона ($v = E/2G\text{-}1$);
– тепловые – температуры поверхности (Tц и Tк), коэффициенты теплопроводности (λ) и температуропроводности ($a = \lambda/(\rho \cdot C$p);
– электрические – проводимость (G), комплексное сопротивление (Z), тангенс угла потерь (tgσ), диэлектрическую (ε) и магнитную проницаемость (μ), решая уравнение характеристического (поверхностного по Леонтовичу) импеданса ($Z = (\mu/\varepsilon)1/2$);
– акустических – интенсивности потока (количества в единицу времени) актов акустической эмиссии (АЭ) dN_a/dt, их общего количества N_a, амплитуды Аи спектрального состава излучения $U(f)$, а также скорости звука (C).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе калибровки осуществляется настройка всех измерительных каналов на параметры «корпуса-шунта» из алюминиевого сплава (рис. 3), путем вычисления соответствующих погрешностей элек-

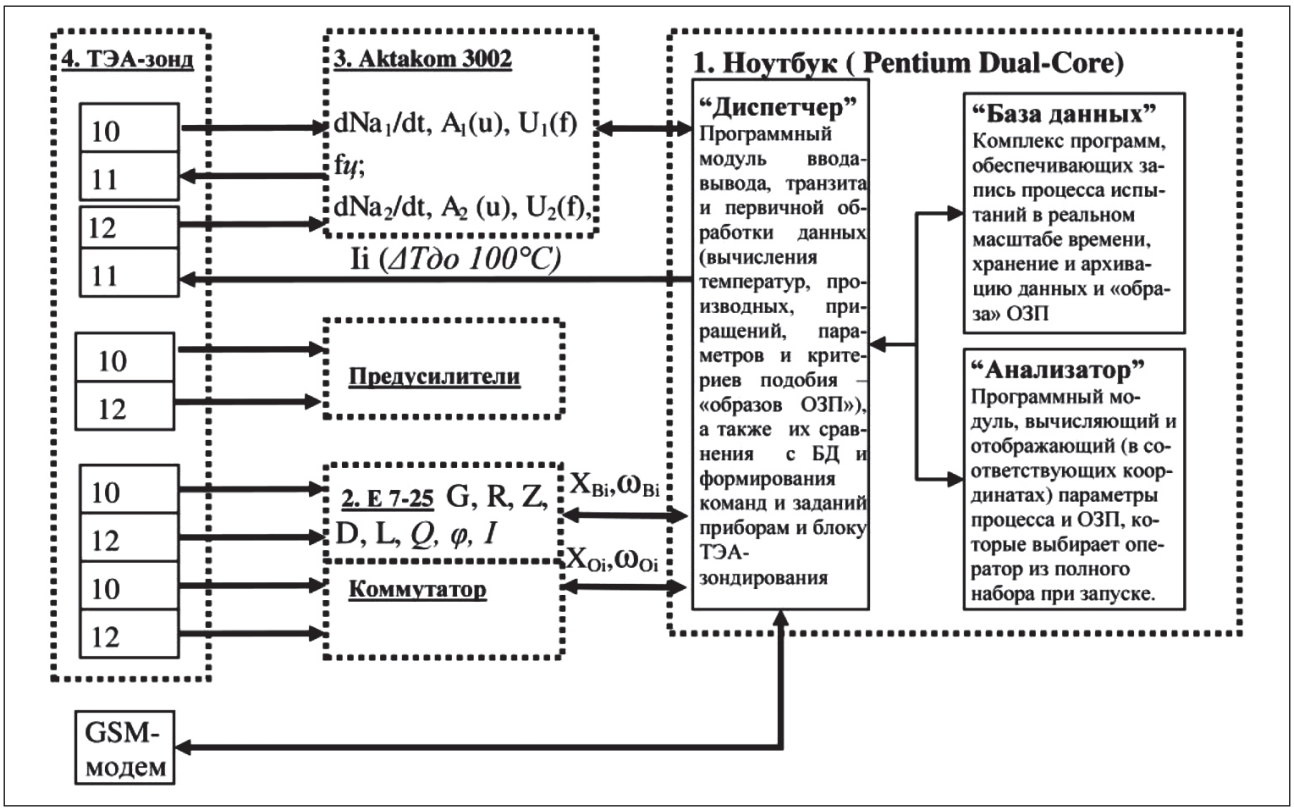

Рис. 2. **Структурная схема СПО**

трических (Δэ), температурных (Δт) и акустических (Δа) измерительных каналов и их корректировка.

ПДК ОЗП состоит из корпуса (1) с ноутбуком (2), с измерителем иммитанса (3) и двухканальной осциллографической приставкой (4), подключенных к ноутбуку, на входы которых соответствующими кабелями подключается блок термо-электро-акустического (ТЭА) зондирования (5), прижимаемый к ОЗП проверяемого объекта (конструкции, материала, кабеля) по тепловым, электрическим и акустическим сигналам, с которых специальное программное обеспечение (СПО) ноутбука идентифицирует свойства и стадии эксплуатационной устойчивости ОЗП. При этом осциллографическая приставка подключается и питается от разъема USB ноутбука (рис. 4), а измеритель иммитанса питается от встроенного в него аккумулятора и подключается к другому разъему USB. Блок ТЭА зондирования входит в переносной комплекс, состоит из двух предусилителей (6), коммутатора (7), многожильного соединительного кабеля (9) и платы ТЭА-зондов (8), на которой установлен эталонный зонд (10), центральный измерительный зонд (11) и крайний измерительный зонд (12). Эталонный зонд содержит акустический датчик, излучающий ультразвуковой импульс, тепловой датчик-нагреватель молибденового щупа до температуры 100°С. Центральный и крайний измерительные зонды одинаковы и представляют собой заостренные металлические стержни, выполняющие функции термо-электро-акустических щупов-волноводов, на которых смонтированы тепловые и акустические датчики. Для измерения температуры и сопротивления ОЗП между зондами используется измеритель иммитанса с коммутатором, а датчики, регистрирующие акустические сигналы, подключаются к осциллографической приставке [9, 12].

Ноутбук может представлять собой любой двухпроцессорный компьютер с ОЗУ не менее 4 Гбайт и ОС Windows 7, программное обеспечение (ПО) которого помимо пакетов программных модулей (ППМ), измерителя иммитанса и двухканальной осциллографической приставки включает в себя специальное программное обеспечение (СПО), которое синхронизирует работу всех указанных составных частей ПК и, обрабатывая получаемые ТЭА-данные, вычисляет текущие параметры ОЗП, по которым идентифицирует стадии его эксплуатационной устойчивости и определяет эффективность защиты [9, 12].

В качестве измерителя иммитанса использован Е7-25 с автономным питанием, а осциллографическая приставка должна быть двухканальной (например, Актаком 3002) с функцией анализатора спектра и питанием от USB – разъема ноутбука (рис. 4).

ПДК ОЗП приводится в действие включением ноутбука и измерителя иммитанса с выбором из «меню» процедуры «калибровка», после которой блок ТЭА-зондирования вынимается из корпуса ПК и прижимается к проверяемому объекту с ОЗП (конструкции, кабелю, материалу), после чего запускается режим «диагностика ОЗП» с помощью того же специального программного обеспечения (рис. 2). При этом для идентификации состояния

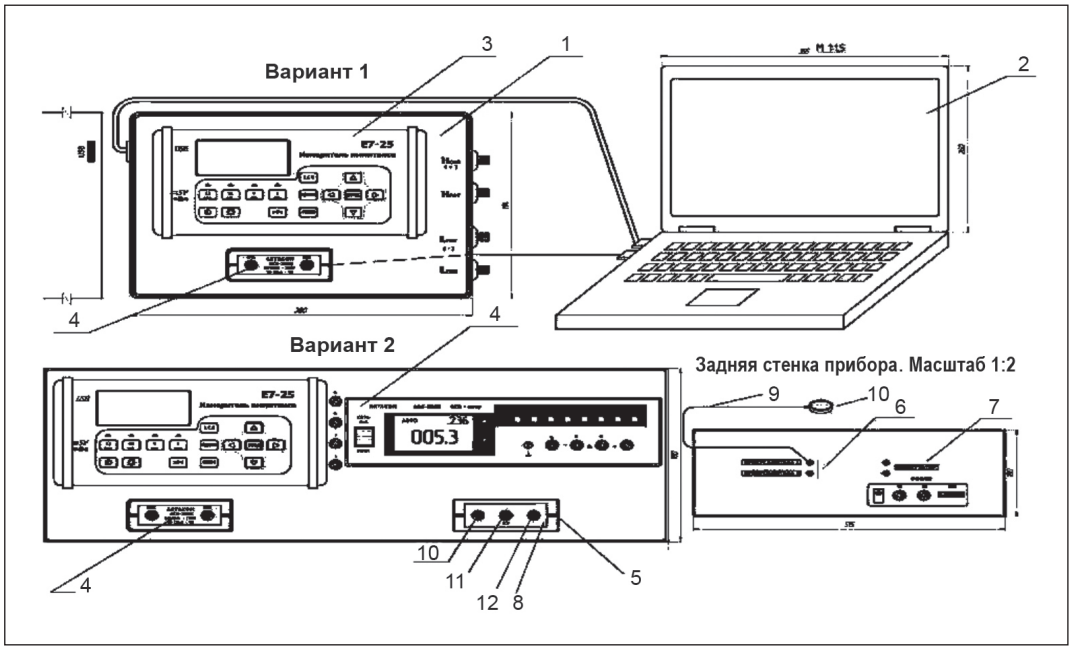

Рис. 3. **Общий вид ПКД ОЗП с вариантами исполнения**

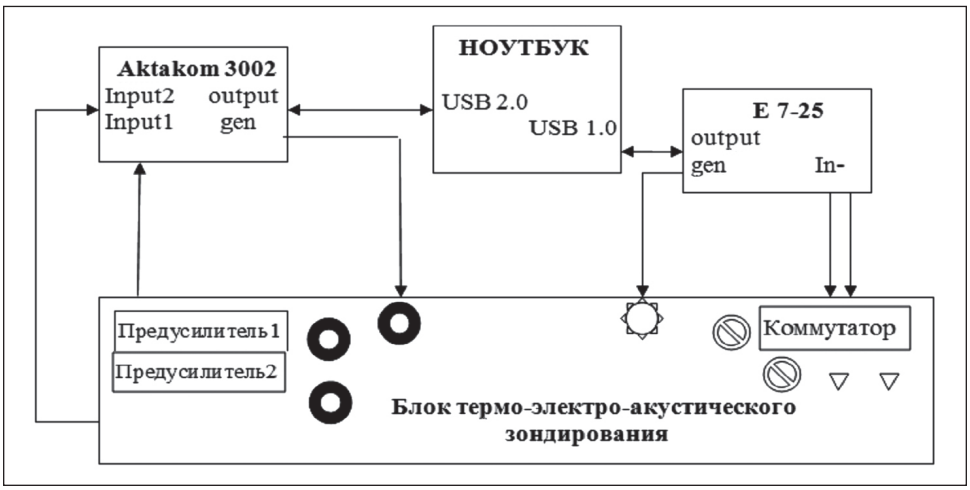

Рис. 4. **Блок-схема программно-технического комплекса**

ОЗП, т.е. стадии его эксплуатационного старения, в базе данных ПК должен быть «образ ОЗП», который представляет собой его вектор-функцию жизненного цикла в интервале температур от минус 55 до плюс 65°С, полученный на БЭТА-анализаторе, по которым определяется стадия устойчивости и вычисляется время обновления ОЗП [12, 13].

ПДК ОЗП и предлагаемый подход позволили осуществить системный синтез модели Интернет-системы термо-электро-акустической диагностики ОЗП и эксплуатационной устойчивости защищаемых материалов (конструкций и элементов инженерных систем), которая может стать основой национальной системы надзора в данной предметной области [12, 14].

Такая национальная макросистема надзора представляет собой автоматизированную лабораторно-оперативную Интернет-систему (рис. 5), состоящую из 3-х отдельных, но функционально связанных систем – испытательной, контрольной и информационной[14].

Испытательная система должна состоять из БЭТА-анализаторов с предлагаемой адаптацией, которыми должны быть оснащены все региональные судебно-экспертные учреждения «Испытательные пожарные лаборатории» (СЭУ ИПЛ) МЧС России и Центры стандартизации, метрологии и сертификации (ЦСМ) Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) [10, 15, 16].

Контрольная система состоит из ПКД ОЗП, которые с помощью ТЭА-зондов позволят измерять, обрабатывать и осуществлять специалистами указанных испытательных подразделений диагностику состояния защищаемых материалов и ОЗП в условиях эксплуатации на объектах [8, 12, 14].

Информационная система (рис. 5) будет состоять из серверов и сайтов Росстандарта и ВНИИ ПО МЧС России, с банком ТЭА-данных ОЗП и защищаемых материалов, наполняемых ЦСМ и ИПЛ МЧС России, а также базой данных текущей ТЭА-диагностики ОЗП на объектах, наполняемых в «on-line» режиме через указанные сайты органами по сертификации продукции, объектами и органами надзора [14].

Решение задач в информационной системе может быть осуществлено с помощью имеющихся Интернет-порталов [12,14]:

– ФГБУ ВНИИ ПО МЧС России (http://www.vniipo.ru),
– Росстандарта (http://www.gost.ru/wps/portal/).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход и ПДК ОЗП реализуют экспресс-анализ ОЗП на объекте эксплуатации, дополняя известные методы определения огнезащитной эффективности, которые отражены в соответствующих нормативных документах [2–5] и исследованиях [6–8], в т. ч. методами термического [17] и термо-электро-акустического анализа [18, 19], создавая «образ ОЗП» для последующей идентификации стадий его «старения», а следовательно, и для определения фактического времени его обновления на любых объектах надзора [12, 14, 15].

Предлагаемый подход и ПДК ОЗП позволили синтезировать модель Интернет-системы термо-электро-акустической диагностики ОЗП и эксплуатационной устойчивости защищаемых материалов (конструкций и элементов инженерных систем), которая может стать основой национальной системы надзора в данной предметной области [14].

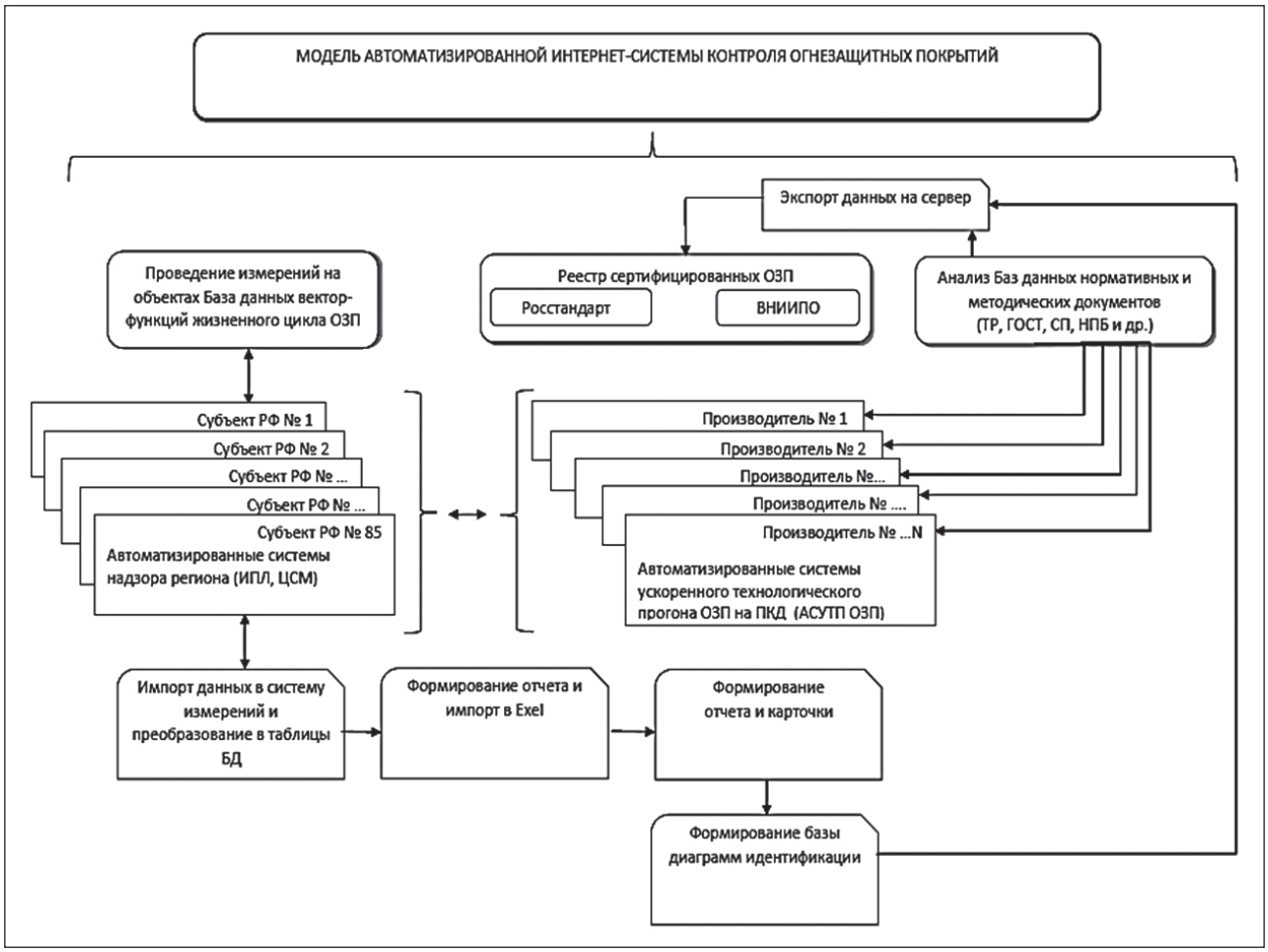

Рис. 5. **Общий вид схемы обмена информации**

Часть I статьи «Нанотехнологии испытаний и диагностики материалов, конструкций и элементов инженерных систем зданий с огнезащитными покрытиями» опубликована в номере 3/2020 журнала «Нанотехнологии в строительстве».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НПБ 236-97 Огнезащитные составы для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности // Сборник руководящих документов Государственной противопожарной службы. Часть 6. – М: ГУГПС МВД России, 1997. – 13 с.

2. ГОСТ Р 53292-2009 Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.

3. ГОСТ Р 53295-2009 Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. – М.: Стандартинформ, 2009. – 9 с.

4. ГОСТ Р 53311-2009 Покрытия кабельные огнезащитные. Методы определения огнезащитной эффективности. – М.: Стандартинформ, 2009. – 9 с.

5. ГОСТ Р 53293-2009 Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. – М.: Стандартинформ, 2009. – 23 с.

6. Кальченко И.Е. Анализ объективности оценки огнестойкости и эффективности огнезащиты конструкций объектов инфраструктуры различного назначения // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. – № 3-1. – С. 64–72.

7. Белозеров В.В., Кальченко И.Е., Прус Ю.В. Система термоэлектроакустической диагностики пожарной устойчивости объектов // Ежегодная международная научно-техническая конференция Системы безопасности – СБ-2013. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – С. 224–227.

8. Кальченко И.Е. Имитационные методы оценки качества огнезащитных покрытий//Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 1(59). – С. 5. – URL: http://academygps.ru/ttb.

9. Кальченко И.Е. Переносной комплекс диагностики огнезащитных покрытий – патент на полезную модель № 157151. – Бюл. № 32. 20.11.2015.

10. Белозеров В.В., Марченко А.В., Прус Ю.В. БЭТА-анализ в диагностике безопасности и прочности конструкционных материалов // Ежегодная международная научно-техническая конференция Системы безопасности. – СБ 2008: Матер. 17-й междунар. конф. – М: АГПС МЧС РФ, 2008. – С. 54–57.

11. Белозеров В.В. Автоматизированная система испытаний материалов электротехнической и радиоэлектронной промышленности с контролем их пожарной опасности: дис. ... канд. тех. наук. – М.: АГПС МЧС РФ, 2008. – 153 с.

12. Прус Ю.В., Голубов А.И., Кальченко И.Е. Термо-электро-акустический метод и система диагностики качества и долговечности огнезащитных покрытий // Электроника и электротехника. – 2016. – № 1. – С. 146 –160. – DOI:10.7256/2453-8884.2016.1.21075.

13. Белозеров В.В. Вектор-функция жизненного цикла материалов // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Сб. мат-лов II Всероссийской научной Интернет – конференции с международным участием. – Казань: ИП Синяев Д.Н., 2014. – С. 11–13.

14. Белозеров В.В., Кальченко И.Е., Прус Ю.В. Модель Интернет-системы термо-электро-акустической диагностики материалов и огнезащитных покрытий // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – 15 с. – http://www.science-education.ru/115-11952.

15. Белозеров В.В., Голубов А.И., Кальченко И.Е., Нгуэн Т.А., Топольский Н.Г. Нанотехнологии испытаний и диагностики материалов, конструкций и элементов инженерных систем зданий с огнезащитными покрытиями. Часть 1 // Нанотехнологии-ивстроительстве. – 2020. – Том 12, № 3. – С. 174–184. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-3-174-184.

16. Belozerov V.V., Nguyen Tuan A., Belozerov Vl.V. Improvement of BETA-analysis for viscous media, flammable liqvids and flame-retardant coatings // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2019) Editors: I. Parinov, B.T. Long, N.T.H. Minh, N.D. Toan, S.H. Chang. 2019. С. 52–54.

17. СТБ 1333.2-2002. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности труб полимерных для инженерно-технических систем (при номинальном значении энергии активации термоокислительной деструкции...). – http://www.nestor.minsk.by/sn/2003/06/sn30606.html.

18. Belozerov V.V., Golubov A.I., Kalchenko I.E. About unification of diagnostics and tests of solid and liquid materials and fireproof coverings // 7th International Scientfic and Practical Conference «Science and Society» / London 23–30 March 2015, pp. 31–41.

19. Босый С.И., Буйло С.И. О синхронизации термического анализа с акустической эмиссией и электрометрией // Электроника и электротехника. – 2016. – № 1. – С. 1–20. – DOI:10.7256/2453-8884.2016.1.21026.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белозеров Валерий Владимирович, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6999-7804, e-mail: safeting@mail.ru;

Белозеров Владимир Валерьевич, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», профессор РАЕ, г. Ростов-на-Дону, Россия, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4758-1036, e-mail: isagraf@mail.ru

Голубов Андрей Иванович, соискатель, кафедра автоматизированных систем и информационных технологий, ФГБОУ ВО «Академия ГПС» МЧС России, г. Москва, Россия, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2877-7826, e-mail: andreasen@yandex.ru

Кальченко Иван Евгеньевич, соискатель, кафедра автоматизированных систем и информационных технологий, Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Россия, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7449-2464, e-mail: ivanmd@mail.ru

Прус Юрий Витальевич, д.ф.-м.н., профессор, ФГАБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Москва, Россия, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9781-9458, e-mail: prus.yurii@gmail.com

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 18.04.2020.
Статья поступила в редакцию после рецензирования: 22.05.2020.
Статья принята к публикации: 04.06.2020.