

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАУКОВОЇ ШКОЛИ професора В. І. Большакова (до 70-річчя від дня народження)

УДК 621.311.25:681.518.5-022.532

### ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ НАНОКОМПОЗИТЫ ДЛЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК АЭС

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
САВИЦКИЙ Н. В.<sup>2\*</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, 49005, Украина, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

**Аннотация. Постановка проблемы.** Герметичные железобетонные конструкции оболочечного типа локализирующей системы безопасности, предназначенные для удержания и локализации радиоактивных продуктов распада в случае особых природных или техногенных воздействий на энергоблок, являются одним из наиболее важных компонентов, обеспечивающих безопасность атомной электростанции. Для разработки системы мониторинга технического состояния защитных оболочек АЭС перспективным направлением может быть использование электропроводящих нанокomпозитов, как первичных элементов информации. **Цель статьи** — рассмотрение теоретических предпосылок и опыта создания электропроводящих нанокomпозитов для систем диагностики локализирующих систем безопасности АЭС. **Выводы.** Перспективным направлением для разработки систем диагностики локализирующих систем безопасности АЭС является использование электропроводящих нанокomпозитов (электропроводящие бетоны — бетэлы, штукатурные растворы, лакокрасочные покрытия). Механизм создания электропроводящих нанокomпозитов заключается в использовании в виде наполнителя металлических и углеродсодержащих наночастиц. В качестве связующего в нанокomпозитах представляется перспективным использование как минеральных вяжущих (цемент), так и жидкого стекла.

**Ключевые слова:** безопасность АЭС, системы диагностики, электропроводящие нанокomпозиты, углеродсодержащие наночастицы

### ЕЛЕКТРОПРОВІДНІ НАНОКОМПОЗИТИ ДЛЯ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГЕРМЕТИЗУЮЧИХ ОБОЛОНОК АЕС

БОЛЬШАКОВ В. І.<sup>1</sup>, д. т. н., проф.,  
САВИЦЬКИЙ М. В.<sup>2\*</sup>, д. т. н., проф.

<sup>1</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, 49005, Україна, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

**Аногация. Постановка проблеми.** Герметичні залізобетонні конструкції оболонкового типу локалізуючої системи безпеки, що призначені для утримання і локалізації радіоактивних продуктів розпаду у випадку особливих природних або техногенних впливів на енергоблок – це одні з найважливіших компонентів, які забезпечують безпеку атомної електростанції. Для розробки системи моніторингу технічного стану захисних оболонок АЕС перспективним напрямом може бути використання електропровідних нанокomпозитів як первинних елементів інформації. **Мета статті** — розгляд теоретичних питань і досвіду створення електропровідних нанокomпозитів для систем діагностики локалізуючих систем безпеки АЕС. **Висновки.** Перспективним напрямом для розробки систем діагностики безпеки АЕС є використання електропровідних нанокomпозитів (електропровідні бетоны – бетели, штукатурні розчини, лакофарбові покриття). Механізм створення електропровідних нанокomпозитів полягає у використанні як наповнювача металевих та вуглецевмісні

наночастинок. В якості в'язучого у нанокompозитах вбачається перспективним використання як мінеральних в'язучих (цементу), так і рідкого скла.

**Ключові слова:** безпека АЕС, системи діагностики, електропровідні нанокompозити, вуглецьмісткі наночастишки

## ELECTRICALLY CONDUCTIVE OF NANOCOMPOSITES FOR SYSTEMS DIAGNOSTICS OF THE ENVELOPE WALLS TECHNICAL CONDITION OF NPP

BOLSHAKOV V. I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
SAVYTSKYI M. V.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1</sup> Department of Materials and Materials Processing, State Higher Educational Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, Tel. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup> Department of Reinforced-Concrete and Stone Constructions, State Higher Education Establishment «Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnepropetrovsk 49005, Ukraine, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

**Summary. Raising of the problem.** Enveloped concrete wall type structures of localizing safety systems for restraint and localization of radioactive decay products or in the case of special natural or man-made impacts on the power unit is one of the most important components to ensure the safety of nuclear power. The promising direction for the development of the NPP technical system monitoring is to use conductive nanocomposites as primary elements of information. **The purpose of the article** is to review the theoretical background and experience in the conductive nanocomposites creating for diagnostics of localizing nuclear safety systems. **Conclusions.** A promising area for the development of diagnostic systems of localizing nuclear safety systems is the use of electrically conductive nanocomposites (conductive concrete - bethels, plasters, paint coatings). A mechanism for conductive nanocomposites creating is the use of the filler metal and carbon nanoparticles. As binders is promising to use nanocomposites of the mineral binders (cement) and water glass.

**Keywords:** safety of NPPs, diagnostic systems, electrically conductive nanocomposites, carbon nanoparticles

### Постановка проблеми.

Атомні електростанції, на яких установлені енергоблоки типу ВВЭР-1000 с железобетонной локализирующей системой

безопасности (ЛСБ), являются ключевым компонентом энергетической индустрии Украины (рис.1–3) [1–8].

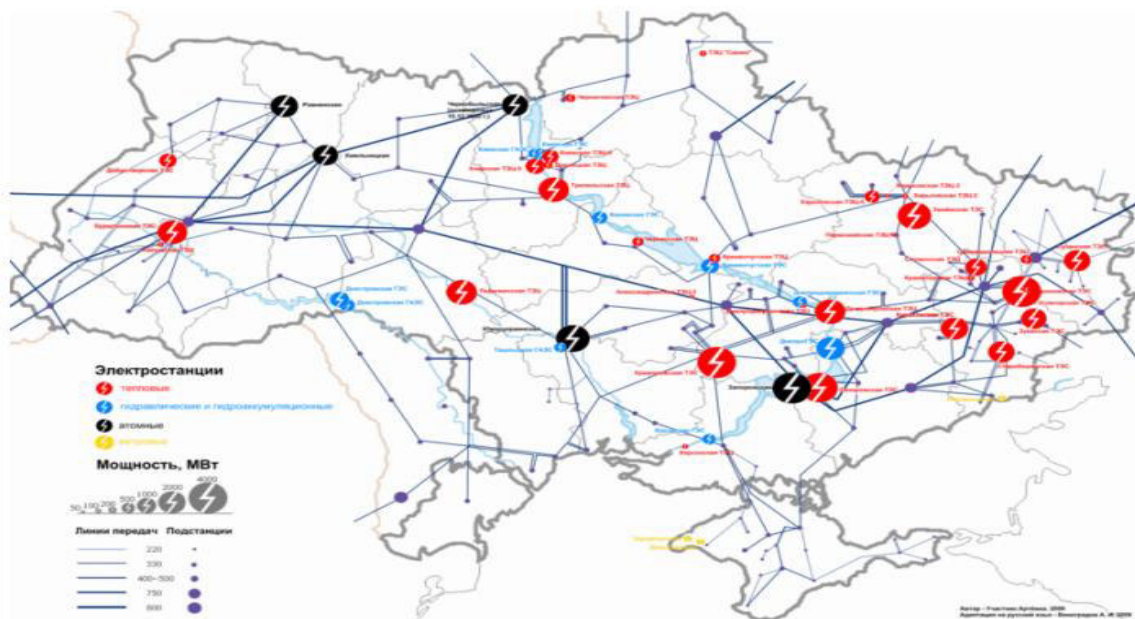


Рис. 1. Енергогенеруючі станції в Україні.



Рис. 2. Действующие АЭС Украины



Рис. 3. Общий вид на Запорожскую АЭС с энергоблоками ВВЭР-1000

По состоянию на 2014 год выработка электроэнергии украинскими электростанциями составила около 200 млрд кВт·ч, из них АЭС — 50% от общенационального производства электроэнергии (табл. 1).

Строительные конструкции АЭС являются одним из наиболее важных компонентов, обеспечивающих безопасность атомной электростанции. Отдельным предметом рассмотрения являются конструкции локализирующей системы

безопасности АЭС — железобетонные герметичные конструкции оболочечного типа, предназначенные для удержания и локализации радиоактивных продуктов распада в случае особых природных или техногенных воздействий на энергоблок.

Таблиця 1

## Структура енергоресурсов України, %

Потребление первичных энергоресурсов		Тип ЭС	Установленные мощности	Производство в 2014 году
Природный газ	16	ТЭС и ТЭЦ	57,5	45
Уголь и торф	8			
Нефть, нефтепродукты	3			
Атомная энергия	64	АЭС	29,6	50
Другие виды энергоресурсов	0,5	ГЭС и ГАЭС	12,4	4
		Солнечные ЭС	0,3	0,5
		Ветряные ЭС	0,2	0,5

Герметичная оболочка является локализирующей системой безопасности и предназначена для предотвращения выхода радиоактивных веществ при тяжёлых авариях с разрывом крупных трубопроводов первого контура и удержания в зоне локализации аварии среды с высоким давлением и температурой. Она имеет цилиндрическую форму и состоит из предварительно

напряжённого железобетона толщиной 1,2 метра.

В настоящее время как в мировой, так и в национальной атомной энергетической отрасли становится актуальной проблема продления срока действия лицензий на эксплуатацию энергоблоков, так как существующие энергоблоки подходят к концу 40-летнего срока эксплуатации (табл. 2).

Таблиця 2

## Общие данные об энергоблоках типа ВВЭР-1000, построенных в Украине

Энергоблок	Мощность (МВт электрических)		Ввод в эксплуатацию	Срок службы
	фактическая	номинальная		
ХАЭС-1-ВВЭР-1000/В320	950	1000	31.12.1987	28
ХАЭС-2-ВВЭР-1000/В320	950	1000	07.08.2004	11
ХАЭС-3-ВВЭР-1000/В320	950	1000	01.01.2015	
ХАЭС-4-ВВЭР-1000/В320	950	1000	01.01.2016	
РоАЭС-1-ВВЭР-440/В213	381	420	31.12.1980	35
РоАЭС-2-ВВЭР-440/В213	376	415	30.12.1981	34
РоАЭС-3-ВВЭР-1000	950	1000	21.12.1986	29
РоАЭС-4-ВВЭР-1000/В320	950	1000	10.10.2004	11
ЮУАЭС-1-ВВЭР-1000/В302	950	1000	31.12.1982	33
ЮУАЭС-2-ВВЭР-1000/В302	950	1000	06.01.1985	30
ЮУАЭС-3-ВВЭР-1000/В320	950	1000	20.09.1989	26
ЗАЭС-1-ВВЭР-1000/В320	950	1000	10.12.1984	31
ЗАЭС-2-ВВЭР-1000/В320	950	1000	22.07.1985	30
ЗАЭС-3-ВВЭР-1000/В320	950	1000	10.12.1986	29
ЗАЭС-4-ВВЭР-1000/В320	950	1000	18.12.1987	28
ЗАЭС-5/В320	950	1000	14.08.1989	26
ЗАЭС-6	950	1000	19.10.1995	20

В связи с этим актуальной является разработка систем мониторинга

технического состояния конструкций АЭС и в частности, ЛСБ.

Обеспечение безопасности энергоблока в целом осуществляется за счет так называемой системы глубоко эшелонированной защиты, основанной на физических на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду.

Существует пять уровней глубокоэшелонированной защиты энергоблока. Железобетонные конструкции энергоблока первой категории ответственности относятся к третьему уровню глубокоэшелонированной защиты.

Таблица 3

Учитываемые сочетания воздействий на защитные конструкции АЭС

Режимы	Нагрузки и воздействия											
	Предпусковые	Постоянные и длительные	Технические, соответствующие			Сейсмические		Климатические		Связанные с деятельностью человека		
			условия нормальной эксплуатации	нарушению условий нормальной эксплуатации	проектная авария	проектное землетрясение	максимальное расчетное землетрясение	характерные	экстремальные	удар падающего самолета	ударная воздушная волна	
Предпусковые	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Эксплуатационные длительные кратковременные	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-
	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-
	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
Особые	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-
	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-
	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-
	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+
	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+

Нормативные документы, регулирующие проектирование, расчет и эксплуатацию строительных конструкций АЭС I категории ответственности, условно делятся на несколько групп:

- Стандарты МАГАТЭ, регулирующие проектирование конструкций;
- Стандарты МАГАТЭ, регулирующие мониторинг безопасности при эксплуатации АЭС;
- Доклады МАГАТЭ, которые не имеют статуса действующего нормативного документа и служат информационными источниками;
- Национальные стандарты стран-участниц МАГАТЭ;

Государственные и отраслевые стандарты, действующие в Украине (рис. 4): в зависимости от конкретного элемента конструкций АЭС, важных для безопасности, а также в зависимости от влияния внешней среды, требуется соблюдение нормативов проектирования и рекомендаций по конструированию, специфических для данного типа элементов и в конкретных условиях внешних воздействий (табл. 3). Существующая иерархия нормативных документов представлена на рисунке 4.



Рис. 4 Система нормативной документации, регламентирующей расчет, проектирование и контроль состояния (мониторинг) конструкций АЭС

Защитная оболочка АЭС с ВВЭР 1000 (рис. 5) имеет форму цилиндра сопряженного с пологим куполом и днищем.

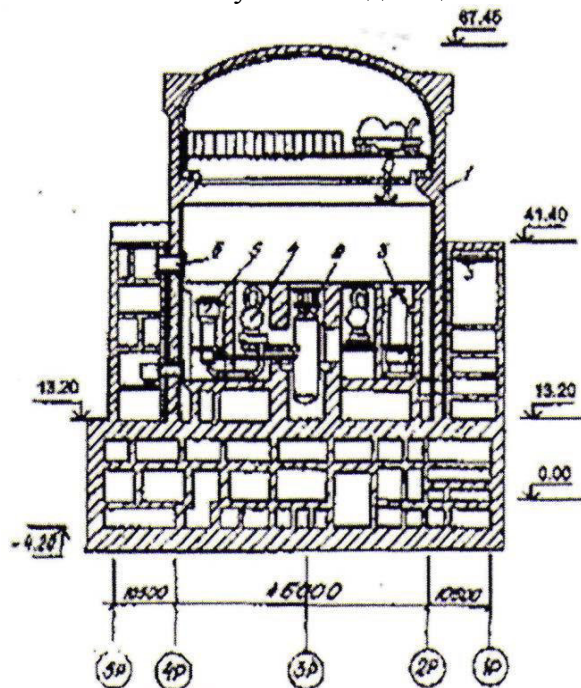


Рис. 5. Реакторное отделение энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 (серийный проект):

- 1-железобетонная преднапряженная оболочка;
- 2-реактор; 3-компенсатор объема; 4-парогенератор;
- 5-главный циркулярный насос; 6-шлюз.

Под днищем расположен цокольный этаж. Высота оболочки и диаметр ее ци-

линдрической части равны соответственно 68 и 45 м, толщина стенки цилиндра и купола составляет 1200 мм и 1000 мм. Оболочка выполнена из монолитного бетона, с внутренней стороны облицована сталью толщиной 6 мм. В месте сопряжения цилиндра с куполом имеется кольцо, в котором с помощью анкерного устройства закрепляется напрягаемая арматура. Купол предварительно напряжен двумя группами арматурных пучков, расположенных в плане под углом 90° одна к другой. Днище армировано ненапрягаемой арматурой. Цилиндрическая часть оболочки напрягается арматурой, идущей спирально в двух направлениях навстречу одна другой под углом 35° к горизонтальной плоскости (рис. 6).

Как уже указывалось, одним из основных требований, предъявляемых к защитной оболочке, является недопущение разгерметизации и выхода радиоактивных материалов в окружающую среду.

С целью разработки системы мониторинга технического состояния защитных оболочек АЭС нами предложено использование электропроводящих нанокомпозитов

как первичных элементов информации. Для этого на бетонную поверхность защитной оболочки наносятся полосы из электропроводящих нанокompозитов. По изменению электропроводности таких элементов возможно выявить места локализации повреждений для разработки системы мероприятий по восстановлению работоспособного состояния.

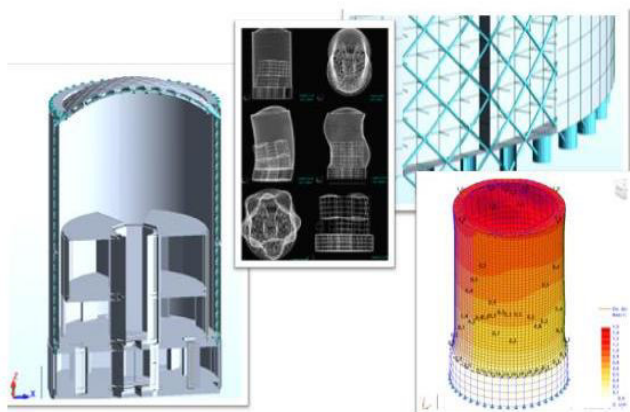


Рис. 6. Расположение канатов преднапряженной арматуры

#### Теоретические предпосылки создания электропроводящих нанокompозитов.

Изучение электрических свойств композитов (бетонов (бетэлов), растворов, лакокрасочных покрытий) и создание новых типов электропроводящих композитов идет в двух направлениях [9–18]:

- создание электропроводящих композитов с малым удельным электрическим сопротивлением и стабильностью электрических параметров во времени при изменяющихся условиях эксплуатации;
- изучение электрических свойств существующих композитов и создание композитов с улучшенными электроизоляционными свойствами: высоким удельным электрическим сопротивлением, малым значением диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости, высокой электрической прочностью.

Механизм электропроводности в композитных электропроводящих материалах достаточно сложен. Согласно результатам

проведенных исследований перенос заряда может осуществляться двумя способами:

- 1). непосредственный контакт частиц наполнителя-проводника;
- 2). эмиссия электронов наполнителя через зазоры между частицами (туннельный эффект).

Механизм проводимости через, например, диэлектрики может носить как ионный, так и электронный характер. Величиной проводимости самого связующего можно пренебречь, так как она на несколько порядков меньше проводимости компонентов и проводимости за счет туннельного эффекта. Перспективным вопросом является поиск связующего с относительно высоким показателем электропроводности, что будет иметь эффект на общую электропроводность композита.

Анализ результатов исследований показывает, что изменение концентрации электропроводящего наполнителя прямо пропорционально изменению электропроводности покрытий. Кроме того, на электропроводность покрытий оказывает влияние степень дисперсности наполнителя, наличие оксидных пленок, температура и другие факторы.

В исследованиях бетэлов (электропроводящих бетонов) установлено, что при увеличении концентрации углерода с 250 до 500 кг/м<sup>3</sup> удельное электрическое сопротивление бетэла падает более чем в 10 раз.

#### Электропроводящие компоненты (наполнитель)

Электропроводящие наполнители можно объединить в две основные группы:

- металлические;
- углеродистые.

Данные об удельном электрическом сопротивлении металлов, использующихся для электропроводящих материалов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Металл	Железо	Медь	Цинк	Алюминий	Серебро	Никель	Титан	Сталь
$\rho, \text{ Ом м}^2/\text{м}$	0,013	0,0175	0,059	0,0271	0,016	0,087	0,5562–0,7837	0,14

В последние годы предложено применение проводящих нестехиометрических соединений титана типа фаз внедрения  $TiC_x$ ,  $TiN_x$ ,  $TiC_xN_y$  ( $0,5 < x, x+j < 1,0$ ) (карбидов, нитридов, карбонитридов либо других бинарных или более сложных соединений указанного элемента и различных неметаллов). Эти перспективные наполнители отличаются высокой стойкостью к факторам внешней среды с высокой электро- и теплопроводностью, превышающей характеристики самого металла, и высокой активностью в химических реакциях на поверхности вследствие нестехиометричности. Однако пока данные материалы являются достаточно дефицитными и дорогостоящими.

К углеродистым наполнителям относятся сажи, графиты, технический углерод.

Эти наполнители дешевые, доступные в любом регионе, обладают очень низким удельным электрическим сопротивлением. Углерод, как и металл, обладает электронной проводимостью. Однако эти материалы понижают прочность композитов. Так при объемном содержании сажи выше 30% происходит полная потеря механической прочности бетэла.

В качестве наполнителя электропроводного бетона, силикатного кирпича, кладочных и штукатурных растворов, красок, асфальтов предлагается использовать тонкомолотый минерал шунгит. Однако данный материал достаточно редко встречается и является более дорогостоящим, нежели сажа и графит. И все же шунгит достаточно перспективный в регионах, где он широко распространен.

#### **Связующие компоненты**

Связующие электропроводящих композитов можно разделить на следующие группы:

- полимерные;
- жидкостекольные;
- минеральные.

В настоящее время существуют полимеры с различными электрофизическими характеристиками. Современные полимеры могут быть как диэлектриками (полу-

проводниками), так и проводниками и даже сверхпроводниками.

Обычные полимеры, такие как полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид, являются диэлектриками с высоким удельным электрическим сопротивлением  $1 \cdot 10^{16}$  Ом·м.

Для использования полимеров в качестве связующего вещества для электропроводящих материалов с 1950-х годов к ним начали добавлять порошки металлов, сажу, графит, различные волокна.

В 1970-е на основе полиацетилена удалось создать полимер со свойствами полупроводника с удельным электрическим сопротивлением  $10^{11}-10^7$  Ом·м. В 1963 году группе австралийских ученых удалось достигнуть удельного электрического сопротивления для йодо-легированного полипиррола  $0,3$  Ом·м.

Было предложено множество других полимеров, имеющих внутреннюю проводимость, в частности, полианилин и политиофен электрической проводимостью от  $10^{-8}$  до  $10^{-6}$  См/м. Кроме того, хорошо изученные классы органических проводящих полимеров представляют полианилин, полисульфид-р-фенилена, также полипара-фенилен-винилен (ППВ).

Одними из самых важных критериев, предъявляемых к связующему электропроводящих композитов, являются доступность и низкая стоимость. Поэтому более целесообразно использовать недорогое связующее - диэлектрик в композиции с электропроводящим компонентом.

По литературным данным, в качестве полимерного связующего в электропроводящих композитах (в частности, покрытиях) используются эпоксидные, акрил-амидные, фенолформальдегидные, карбамидо-формальдегидные смолы, полиэферы, полиуретаны, полиолефины, кремнийорганические полимеры, поливинилацетат, сополимеры винилацетата и винилхлорида и т. д.

Для создания подогревательных элементов в машиностроении предложены саморегулируемые электропроводящие композиционные материалы на основе по-



лиолефинов. В качестве электропроводящих компонентов использованы мелкодисперсный кокс и высокодисперсный графит (соответственно, 15 об.% – 0,5 об. %). Данные составы обладают высокой стабильностью удельного электрического сопротивления.

Наиболее доступными и недорогими связующими из перечисленных являются карбамидоформальдегидные и акриламидные смолы.

В качестве альтернативы перечисленным связующим используется натриевое и калиевое жидкое стекло. Жидкое стекло (натриевое и калиевое) представляет собой коллоидный водный раствор силиката натрия или калия  $K_2O \cdot mSiO_2$ , где  $t$  — модуль жидкого стекла,  $K$  - натрий (Na) или калий (K). Жидкое стекло должно отвечать требованиям натриевого ГОСТ -13078-81, калиевого — ГОСТ -18978-71.

Для получения составов высокой прочности натриевое жидкое стекло отверждается кремнийфтористым натрием  $Na_2 SiF_6$ , кремнефтористоводородной кислотой  $H_2 SiF_6$ , портландцементом, феррохромовым шлаком, углекислым газом и др. Недостатком натриевого жидкого стекла является его низкая водостойкость, а также существенное высолообразование на его поверхности. К положительным качествам данного материала можно отнести его достаточно низкую стоимость и большую распространенность.

В отличие от натриевого, калиевое жидкое стекло является водостойким материалом, на поверхности отсутствуют высолы, и используется оно как связующее в силикатных красках.

Разработано оборудование для изучения кинетики отверждения жидкостекольных композиций углекислым газом (рис. 7).

### ***Электропроводящие бетоны (бетэлы)***

Обычный бетон в определенных температурно-влажностных условиях обладает способностью проводить электрический

ток, однако это его свойство не стабильное. Кроме того, в большинстве случаев электропроводность обычного бетона рассматривается как вредная, так как с ней связана электрокоррозия арматуры в железобетонных конструкциях под воздействием блуждающих токов.

При сезонных колебаниях температуры и влажности электрическое сопротивление обычного бетона меняется на 6–8 порядков. Объясняется это тем, что он обладает ионным характером проводимости. При насыщении бетона водой происходит переход легкорастворимых компонентов цементного камня в жидкую фазу и он становится полупроводником с низким удельным электрическим сопротивлением. Высушивание же бетона приводит к росту его сопротивления.

Предлагались различные способы улучшения электрических свойств бетона. Попытки использовать проводящие свойства бетона во влажном состоянии имели ограниченный успех. Объясняется это тем, что влажный бетон, с одной стороны, не выдерживал импульсов тока, с другой — при низких температурах, когда вода, находящаяся в бетоне, замерзала, он становился плохим проводником.

Характерная особенность большинства работ заключалась в том, что бетон рассматривался с электрической точки зрения как нечто единое без достаточного учета его химического и фазового состава, микро- и макроструктуры, особенностей физико-химических процессов, приводящих к образованию его как материала.

В основу ведущихся исследований положен иной принцип получения токопроводящих бетонов. Для электропроводящих бетонов это, во-первых, отыскание токопроводящей добавки, изменяющей свойства бетона в сторону повышения его электропроводности, и, во-вторых, получение на ее основе композиционного материала — специального бетона с качествами проводника электрического тока.



Рис. 7. Оборудование для исследования процесса кинетики отверждения жидкостекольных композиций углекислым газом

В результате этих работ был создан электропроводящий бетон, названный бетэлом, обладающий, наряду с конструктивными свойствами, способностью проводить электрический ток.

На основании теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что изменение в нужном направлении фазового состава и структуры цементного камня и бетона, а также использование токопроводящих добавок является одним из основных путей получения бетонов с заданными электрическими свойствами. Этого следует добиваться не только за счет выбора исходного вяжущего, заполнителя и добавок, но и создания оптимального с точки зрения электрических свойств режима твердения. В ранее выполненных работах первое учитывалось недостаточно, а второе не принималось во внимание вообще.

Связка, используемая в бетоне, может быть самой различной и в зависимости от ее вида различают следующие типы бето-

на: полимербетон, полимерцементный бетон, бетон на цементном вяжущем, бетон на жидкостекольном вяжущем. Если проанализировать их с точки зрения электрической, конструктивной и экономической эффективности, то можно сказать, что наиболее подходящим для электрических целей является бетон на цементном вяжущем, так как он имеет, помимо высоких конструктивных и технико-экономических показателей, достаточно хорошую коррозийную стойкость и дугостойкость.

Электропроводящие бетоны относятся к числу дешевых и доступных материалов.

Их стоимость лишь в некоторых случаях будет незначительно превышать стоимость обычных строительных бетонов. Это объясняется тем, что при изготовлении электропроводящих бетонов и конструкций на их основе используются распространенные составляющие — вяжущие, добавки, заполнители, а также в основном освоенные промышленностью технологические процессы.

Получение бетэла основано на введении в его состав заполнителей, обладающих электронным характером электропроводности (так называемой проводящей фазы) и превращении его в неметаллический проводник композиционного типа. Цементный камень, как обладающий ионным характером электропроводности, должен быть почти полностью исключен из общей проводимости композиции, а его сопротивление должно быть на 6–10 порядков выше, чем у всей системы. Этого можно добиться как за счет подбора исходного состава цемента, так и путем изменения в нужном направлении фазового состава цементного камня, что достигается с помощью оптимального, с точки зрения получения необходимых электрических свойств, режима твердения вяжущего.

Изделия на основе портландцемента в интервале температур от  $-50$  до  $+200$  °C обладают хорошей температуростойкостью. В качестве недостатка следует отметить некоторую его пористость, что вызывает необходимость в ряде случаев защиты конструкций из бетэла от увлажнения при наружной установке.

Многолетний отечественный и зарубежный опыт получения и применения композиционных неметаллических проводников позволяет сформулировать основные требования к проводящей фазе, которые распространяются и на бетэл.

Проводящая фаза бетэла должна обладать необходимой электропроводностью, достаточной механической прочностью, температуростойкостью и способностью не окисляться при локальных перегревах композиции. Она не должна вступать в химическое взаимодействие с вяжущим, приводящее к новым качественным состояниям и изменению электропроводности системы; коэффициент ее линейного расширения должен быть близким по величине к коэффициенту линейного расширения вяжущего или несколько меньшим. В противном случае увеличение давления в контактах цепочек проводящей фазы при изменении температуры приведет к значительному увеличению про-

водимости и, следовательно, температурной нестабильности композиции или может даже вызвать разрушение изделия. Кроме того, ее собственная электропроводность должна иметь минимальную зависимость от температуры.

Наиболее полно этим требованиям отвечают разновидности специальных саж, которые и нашли широкое применение для получения композиционных проводников на основе керамики, жидкого стекла, полимеров и каучука. Сажевый компонент, в частности наряду с железными опилками, составляет основу американского электропроводного бетона. В отличие от него, в качестве проводящей фазы бетэла приняты углеродистые химпродукты, полученные в результате специальной высокотемпературной обработки природных углей и нефти (некоторые коксы, электродная масса ЭУ и др.).

Сегодня в качестве электропроводящего компонента в бетэлах используются сажа, железные опилки, размолотые продукты высокотемпературной обработки углей и нефти (некоторые коксы, электродная масса ЭУ и др.). Удельное сопротивление таких бетонов находится в пределах 102–106 Ом·м.

Канадские ученые-исследователи разработали новый тип бетона, который обладает хорошей электропроводностью. Принцип, лежащий в его основе, – это добавление в бетон электропроводящих материалов, таких как углеродное волокно, графит, дешевые побочные продукты производства стали, позволяющих создать непрерывную сеть из проводящего материала. Данный принцип позволяет увеличить проводимость бетона на несколько порядков при добавлении определенного количества проводящего наполнителя — пороговое содержание. Дальнейшее увеличение его содержания даст незначительное увеличение проводимости. Исследования показали, что оптимальным вариантом является небольшое превышение порогового значения, которое позволит добиться высокой проводимости

и механической прочности, а также хороших условий перемешивания.

Наиболее распространенным типом проводящей добавки в композиционных проводниках являются различные углеродистые продукты — сажи, графиты и др. Однако возможность сочетания цементной связки с углеродистым наполнителем до последнего времени оставалась сомнительной. Последние работы показали, что при определенных условиях такое сочетание возможно, и полученный композиционный материал, наряду со стабильной электропроводностью, регулируемой в широких пределах, обладает достаточно высокой механической прочностью.

Основное отличие бетэла от известных композиций в том, что используется не специальная сажа, а размолотые продукты высокотемпературной обработки углей (кокс пековый и др.), а в качестве вяжущего — цемент.

На основе анализа зависимости удельного сопротивления углерода от температуры приготовления установлено, что наиболее приемлемыми для бетэла являются добавки поликристаллического углерода (углеродистые добавки) с температурой приготовления от 1000 до 2000 °С, что является наиболее характерным для коксов, используемых при получении всевозможных электродных масс. Для изготовления бетэла используется, в основном, кокс пековый, представляющий собой поликристаллический углерод, образующийся при высокотемпературной (1300 °С) обработке продуктов, получаемых при коксовании.

Цементное вяжущее является вполне подходящим видом связки, так как его удельное электрическое сопротивление на 6-8 порядков выше, чем у углерода, и коэффициент линейного расширения близок к коэффициенту линейного расширения добавки. Требования к интервалу допустимых рабочих температур определяются температуростойкостью цементного камня (+150 °С), так как углерод допускает нагрев до 550 °С.

Дальнейшие работы по изучению бетэла шли по пути исследования электрических свойств композиции в целом. Различие в коэффициентах линейного расширения углерода и цементной связки дало возможность предположить, что при нагреве удельное сопротивление бетэла будет уменьшаться, что полностью подтвердилось экспериментально. Хотя подобные изменения электрических параметров нежелательны, следует отметить, что их абсолютная величина не выходит за пределы допустимых для непроволочных сопротивлений значений.

Для исследования влияния добавки углерода на электрические свойства бетона была изготовлена и испытана серия образцов. Изготовление мелкозернистой бетэловой смеси производилось вручную, крупнозернистой — в лабораторной бетономешалке.

Исследовалось объемное электрическое сопротивление и предел прочности при сжатии. Электрические испытания образцов проводились в воздушно-сухом состоянии на прессе с установкой на подкладку из станиоля и резины для обеспечения контакта по всему торцу образца. Замер омического сопротивления образца производился при усилии в 1 г с помощью моста постоянного тока. Удельное объемное сопротивление определялось по кубиковому призмному омическому сопротивлению. Образцы из мелкозернистого бетэла после замера омического сопротивления шести образцов — кубов и призмы — испытывались на сжатие в соответствии с требованиями ГОСТ 5802–51. Образцы из крупнозернистого бетэла испытывались на прочность в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–62 как для обычного тяжелого бетона.

Результаты испытаний показали, что величина удельного объемного сопротивления зависит только от содержания углерода. Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать очень важные выводы о том, что при определенном содержании углерода в смеси (420–450 кг/м) происходит качественный скачок в свойствах

бетэла, при котором  $\rho$  меняется почти на порядок величины, а затем уже изменяется мало. По-видимому, в этот момент в бетоне создаются непрерывные устойчивые цепочки из углерода. Об этом же говорит и небольшой разброс данных испытаний для бетэла с указанным содержанием углерода.

По имеющимся экспериментальным данным сделана попытка изучить вопрос стабильности электрического сопротивления плит в условиях эксплуатации их под нагрузкой, т. е. вопрос старения (старением считается увеличение омического сопротивления). Для анализа взяты однослойные плиты. За время опыта в течение двух месяцев во всех случаях оказалось, что сопротивление плит не только не увеличивается, как ожидалось, а уменьшается, и довольно значительно, в среднем на 5–7 %. Это говорит о том, что получение плит–панелей со стабильными во времени свойствами возможно, и их сопротивление в условиях длительной эксплуатации будет сохраняться.

Повторные испытания проводились на образцах–цилиндрах диаметром 60 мм с металлическими фланцами. Эти испытания проводились по более жесткому режиму (перепад температур) и показали увеличение величины сопротивления в течение 25 циклов до 6–10 %. Однако полностью отнести это к старению материала нельзя, так как, по-видимому, из-за больших колебаний температуры значительно растет контактное сопротивление под фланцем.

Проведенные исследования показали, что бетэл имеет стабильные электрические характеристики и изменение его сопротивления в процессе эксплуатации не превышает 5 %.

В состав бетэла в зависимости от вида и назначения конструкций вводят мелкий и крупный заполнители. Таким образом, бетэл представляет собой разновидность бетона с микрозаполнителем. Основными параметрами бетэла, как это вытекает из его назначения, являются электропроводность и механическая прочность.

Удельное электрическое сопротивление композиционного проводящего мате-

риала будет в первую очередь зависеть от объемной концентрации проводящей фазы, ее гранулометрии или удельной поверхности, удельного электрического сопротивления самого углерода и от количества воды в бетэловой смеси. При работе с одним видом технического углерода и определенной его гранулометрией решение задачи сводится при заданном конечном удельном сопротивлении бетэла к нахождению необходимой объемной концентрации углерода и оптимального количества воды.

Проводящие частицы и волокна добавляются к обычным компонентам бетона при его затворении. Существует два способа производства проводящего бетона. Первый – это традиционное смешивание, который позволяет добиться относительно невысокого удельного сопротивления и высокой прочности на сжатие. Второй — это суспензионная инфильтрация. Этот способ позволяет добиться более высокой прочности на сжатие и изгиб, а также более низкого удельного сопротивления.

Проводящий бетон можно использовать в качестве конструкционного материала и сочетать его с обычным бетоном. Традиционный способ смешивания может быть применен, если содержание обычных компонентов бетона не будет ниже 70 %.

Концентрация проводящей фазы в бетэле будет зависеть от соотношения углеродцемент, коэффициента раздвижки к раздвижке зерен мелкого заполнителя и его пустотности.

Наиболее сложно выявить зависимость удельного электрического сопротивления бетэла от воды затворения. Цемент и углерод, входящие в состав смеси — это сильнодисперсные гидрофильные материалы и для придания смеси необходимой подвижности. Требуется ввести в нее значительное количество воды. При этом подвижность бетэловой смеси не является функцией водоцементного отношения, так как при изменении соотношения углеродцемент для сохранения той же подвижности необходимо менять В/Ц в значительных пределах. Вместе с тем при

превышении определенного предела содержания воды в смеси наблюдается рост электрического сопротивления при неизменном количестве углерода.

Прочностные характеристики бетэла, по-видимому, будут зависеть от тех же факторов, что и для обычного бетона, т. е. от марки цемента и водоцементного отношения. Однако эта зависимость в связи с наличием в системе значительного количества тонкодисперсного углерода будет более сложной и ее необходимо исследовать в дальнейшем.

Проектирование состава бетэловой смеси наиболее рационально вести, пользуясь методом абсолютных объемов. Содержание воды в смеси необходимо определять в каждом отдельном случае экспериментально, добиваясь заданной величины удобоукладываемости.

Приготовление бетэловой смеси осложнено по сравнению с обычными бетонными и растворными тем обстоятельством, что в нее вводится большое количество тонкодисперсной проводящей фазы, которая должна быть максимально равномерно распределена по всему ее объему. В противном случае бетэл, полученный из этой смеси, будет недостаточно однороден, что может резко снизить его эксплуатационные характеристики или вообще сделать невозможным его применение в качестве электропроводящего материала.

Наиболее целесообразно приготовление бетэловой смеси вести при помощи агрегатов принудительного действия в следующей последовательности. Отдозированные компоненты загружаются в мешалку, где перемешиваются всухую не менее 3 мин. Затем туда наливается вода и смешение продолжается еще не менее 3 мин. Смесь из растворомешалки выгружается и транспортируется к месту укладки. После освобождения растворомешалки от бетэловой смеси необходимо произвести ее тщательную очистку и промывку. Уплотнение смеси в формах производится на стандартных виброплощадках или с помощью поверхностных или глубинных

вибраторов. Контрольные испытания прочности бетэла проводятся на образцах стандартного для бетона размера по существующим ГОСТ. Режим твердения изделий подбирается в зависимости от имеющихся возможностей и технических условий на изготовление, при этом оптимальной является гидротермальная обработка при повышенном давлении.

Технология изготовления изделий из бетэла с мелким наполнителем производится в следующей последовательности:

- обработка проводящего компонента – дробление, вибропомол, отсев крупной фракции и весовая дозировка;
- обработка и весовая дозировка кварцевого песка;
- весовая дозировка цемента;
- сухое перемешивание трех исходных компонентов;
- весовая дозировка воды;
- влажное перемешивание смеси;
- укладка (формовка) бетэловой смеси и ее уплотнение;
- выдержка изделий перед тепловой обработкой;
- гидротермальная обработка;
- распалубка и доводка изделий;
- контроль качества изделий и их складирование.

Технология изготовления изделий из бетэла принципиально ничем не отличается от технологии изготовления конструкций из обычного бетона, дополняясь лишь технологической ниткой переработки и дозирования технического углерода, а также, в случае необходимости, для ряда изделий — операциями по их специальной доводке (нанесение защитных покрытий, установка электродов и др.). Следует также отметить, что при изготовлении изделий из бетэла резко возрастают требования к культуре производства и к точности выполнения отдельных операций, в частности, к дозировке воды, так как при ее нарушении может значительно измениться удельное электрическое сопротивление и изделие нужного качества не будет получено.

Предварительные исследования прочностных и электрических свойств бетэла показали, что он может быть получен с большим диапазоном электрических и механических свойств.

Физико-механические и электротехнические свойства бетэлов приведены в таблице 5.

Таблица 5

**Физико-механические и электротехнические свойства бетэлов**

Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	10—104
Прочность на сжатие, кг/см <sup>2</sup>	85—250
Прочность на растяжение, г·с/см <sup>2</sup>	15—30
Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	1,8—2,2
Допустимая плотность тока, а см <sup>2</sup>	10—0,1
Рабочий диапазон температуры, °С	-60—100
Рабочая температура перегрева, °С	120
Допустимая скорость перегрева, °С/сек	200
Удельная разрушающая энергия при однократном включении токовой нагрузки, в·сек см <sup>5</sup>	230—300
Удельный объем, необходимый для рассеивания энергии 1 М в!-сек при пере! реве на 1СС	0,57
Удельная теплоемкость, ккал 1-1 рад	0,22

**Электропроводящие покрытия**

Известны составы электропроводящих клеев и шпаклевок, связующим веществом для которых является калиевое жидкое стекло. Недостатком указанных составов является особенность технологии изготовления, которая заключается в отверждении состава с помощью выдержки его при высокой температуре до 300 °С. Такая технология не позволяет изготавливать электропроводящие покрытия зданий и сооружений.

Известна антикоррозионная цинксилкатная краска В-ЖС-41, разработанная ЛНПО Пигмент. Она представлена в виде трех компонентов: основа (жидкое калиевое стекло), пигментная смесь (алюминиевый порошок и каолин) и порошок цинка. Назначение краски — создание протекторной защиты металлических сооружений. К недостаткам данного состава следует отнести наличие трёх компонентов, что усложняет технологию приготовления краски. Кроме того, при создании краски не стояла задача достижения низких величин удельного электрического сопротивления и возможности нанесения данной краски на бетон.

Для получения прочных пленок в силикатных красках на основе калиевого жидкого стекла используются пигменты и

наполнители, которые по активности разделяются на следующие группы: высокоактивные, активные, пониженной активности, пассивные, нейтральные.

Высокоактивные пигменты, такие как известь-пушенка, окись магния, сурик свинцовый, белила свинцовые, не могут использоваться в силикатных красках, так как они способствуют быстрому свертыванию стекла и концентрированию образовавшегося геля вокруг комочков.

В дальнейших экспериментальных исследованиях целесообразно применять следующие наполнители и пигменты: активные — белила цинковые, окись цинка, цинковая пыль, алюминиевая пудра, доломит, маршалит пониженной активности — мел, железистоокисные пигменты, тальк.

Согласно проведенным исследованиям, наиболее атмосферостойкими являются покрытия, содержащие в своей пигментной смеси наполнители и пигменты, как активные, так и пониженной активности, при примерном соотношении 1:5.

Для получения покрытий с удельным сопротивлением 0,02 Ом·м необходимо не менее коллоидного графита С-1-40-50 об. %, канального технического углерода ДГ-100 или смеси этих наполнителей. Однако графит и сажа относятся к группе пигментов и наполнителей

нейтральных по отношению к калиевому жидкому стеклу. Они не способны вступать в реакцию с жидким стеклом или сорбировать на своей поверхности молекулы силикогеля, поэтому в их присутствии внутренняя структура покрытия становится менее устойчивой к действию атмосферных факторов, в то же время в качестве черного пигмента в силикатных красках в некоторых работах рекомендуется использовать сажу.

Таким образом, существуют неоднозначные мнения по поводу возможности применения углеродсодержащих пигментов в силикатных составах, поэтому счита-

ем целесообразным проведение дальнейших экспериментальных исследований с углеродсодержащими пигментами в смеси с другими активными пигментами и наполнителями для получения покрытий повышенной электропроводности и высокой долговечности в атмосферных условиях.

Для оптимизации состава электропроводящей краски был проведен анализ патентов с покрытиями на основе полимеров с содержанием углеродных электропроводящих компонентов (табл. 6).

Таблица 6

**Электропроводящие краски, их составы и удельное электрическое сопротивление**

№	Состав электропроводящей краски	$R, \text{ Ом}\cdot\text{м}$
1	Эпоксидное связующее 8 – 20, углеродсодержащий наполнитель 11 – 39, отвердитель органический растворитель остальное. Углеродсодержащий наполнитель представляет собой смесь графита и сажи в соотношении 0,1:1,0.	$10^{-1} - 10^{-2}$
2	Связующее – бутадиен-стирольный термоэластопласт ДСТ-30-100 мас.ч., смесь печной сажи ПМЭ-80 и электропроводной сажи «Хезакарб ЭЦ» с удельной адсорбционной поверхностью 900 м <sup>2</sup> /г в соотношении 1:(1-2) 26 – 30 мас.ч. и органический растворитель 600 – 700 мас.ч.	$0,63 \cdot 10^{-4} - 3,0 \cdot 10^{-4}$
3	Связующее – хлорсульфированный полиэтилен 6 – 9, углеродсодержащий наполнитель 0,6 – 11, отвердитель аминного типа 4,5 – 7, и органический растворитель – остальное. Углеродсодержащий наполнитель – сажа и графит с массовым отношением 0,05 – 0,1.	10 - 1
4	Синтетическое полимерное связующее (политетрафторэтилен или политрифторэтилен) 6 – 9, углеродсодержащий наполнитель 0,6 – 11 органический растворитель остальное. Углеродсодержащий наполнитель - сажа и графит с массовым отношением 0,05 – 0,1.	1 – 0,1
5	Синтетическое полимерное связующее (полиметилфенилсилоксаны) 7 – 17, углеродсодержащий наполнитель 0,7 – 16,1, отвердитель 2,5 – 5,5, органический растворитель остальное. Углеродсодержащий наполнитель – смесь графита с сажей при массовом отношении сажи к графиту 0,05 – 0,1.	$10^{-1} - 10^{-2}$
6	Пленкообразующий сополимер 13,0 – 15,0 порошок графита 15,5 – 20, порошок технического углерода (сажа) 7,5 – 10, порошок карбонильного железа 3,0 – 4,0, органический растворитель – остальное.	$1 \cdot 10^{-2}$
7	Силикатная краска В-ЖС-41. Калиевое жидкое стекло плотностью 1,31 – 1,35 г/см <sup>3</sup> , цинковый порошок марок ПЦ-1 и ПЦ-2, пиксотропная добавка – каолиналиюминиевая пудра ПАП-1 или ПАП-2, хромовый ангидрид, техническая ортофосфорная кислота и вода	–

При подборе составов покрытий следует также руководствоваться технологическими требованиями к составам: толщина влажной и сухой пленки единичного слоя покрытия, консистенция (до удобоносимости), время высыхания (полимеризация), расход и др.

Для дальнейших исследований приняты составы с типами связующего — натриевое жидкое стекло, наполнитель углеродсодержащий (графит, сажа, техни-

ческий углерод), металлический (алюминиевая пудра, цинковый порошок), в качестве отвердителя жидкого стекла рассматривается углекислый газ.

#### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

1. АЭС с ВВЭР-1000 являются ключевым элементом энергетической безопасности Украины. В связи с достижением плановых сроков службы отдельных блоков АЭС в Украине остро стоит вопрос о



разработке системы мониторинга технического состояния локализующих систем безопасности (ЛСБ), к которым относится предварительно напряженная оболочка главного корпуса АЭС.

2. Перспективным направлением для разработки систем диагностики технического состояния строительных конструкций АЭС представляется использование электропроводящих нанокompозитов как элементов первичных датчиков информации.

3. В качестве материалов для элементов системы диагностики могут использоваться электропроводящие бетоны (бетэлы), штукатурные шпаклевочные растворы, лакокрасочные покрытия.

4. Механизм создания электропроводящих нанокompозитов заключается в ис-

пользовании в виде наполнителя электропроводящих металлических и углеродсодержащих наночастиц.

5. В качестве связующего материала для электропроводящих нанокompозитов представляется перспективным использование как минеральных вяжущих (цемент), так и жидкого стекла с отверждением последнего углекислым газом.

6. Разработано оборудование для изучения кинетики отверждения жидкостекольных композиций углекислым газом.

7. Требуется проведение дальнейших исследований для создания электропроводящих композитов с оптимальными физико-механическими, электротехническими, эксплуатационными и экономическими характеристиками.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций : ПНАЭ Г-10-021-90 / Госпроматомнадзор СССР ; исп. : В. В. Антошин, С. С. Антонов, Б. Ф. Демидов, С. Г. Дронов, М. Л. Клоницкий, Н. Д. Курносова, Д. Л. Фролов, Н. Н. Шишканов, С. С. Якобсон. – Москва 1991. – Режим доступа: <http://document.ua/pravila-ustroistva-i-yekspluatcii-lokalizuyushih-sistem-bez-nor5286.html>. – (Правила и нормы в атомной энергетике).
2. Пергаменщик Б. К. Возведение специальных защитных конструкций АЭС / Б. К. Пергаменщик, В. И. Теличенко, Р. Р. Темишев; под общ. ред. В. И. Теличенко. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2011. – 240 с.
3. Nuclear containments: state-of-art report / Fédération Internationale de la Précontrainte, Fédération internationale du béton // Nuclear containments. – Stuttgart, 2001. – Bulletin № 13. – 130 p.
4. Nelson R. Manufactured Meltdown / R. Nelson. // Popular Science. – 1988. – vol. 232, № 1. – P. 66–67.
5. Коробов Л. А. Железобетонные пространственные конструкции атомных и тепловых электростанций / Л. А. Коробов, О. К. Назарьев, В. Я. Павилайнен. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 328 с.
6. Демидов А. П. Защитные оболочки реакторных отделений зарубежных АЭС / А. П. Демидов, В. А. Савченко // Энергетическое строительство за рубежом. – 1989 – № 5. – С. 2–7.
7. Строительство атомных электростанций. / под ред. В. Б. Дубровского ; В. Б. Дубровский, А. П. Кириллов, В. С. Конвиз, П. А. Лавданский, Ф. С. Нешумов, Ю. В. Пономарев, А. Б. Пуховский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
8. Безопасность российских АЭС // Росатом. – Режим доступа: [http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/nuclearindustry/npp\\_safety](http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/nuclearindustry/npp_safety).
9. Использование бетона в качестве электропроводного материала // Бетон. – Режим доступа: <http://betony.ru/betel/ispolzovanie-betona-v-kachestve-elektroprovodnogo-materiala.php>.
10. Корнеев В. И. Растворимое и жидкое стекло / В. И. Корнеев, В. В. Данилов. – Санкт-Петербург : Стройиздат, 1996. – 216 с. // Справочник химика 21. Химия и химическая технология. – Режим доступа: <http://chem21.info/page/169042004212115240017068169076168051171155043145/>.
11. Субботкин М. И. Кислотоупорные бетоны и растворы на основе жидкого стекла / Субботкин М. И., Курицына Ю. С. ; под ред. М. А. Матвеева. – Москва : Стройиздат, 1967. – 135 с.
12. Бичевой П. П. Влияние природы жидкого стекла на свойства силикатных мастик / Бичевой П. П., Чухниловский Н. А. // Монтажные и специальные строительные работы. Сер. 4 : Противокоррозионные работы в строительстве : науч.-техн. реф. сб. / Центр. Бюро науч.-техн. информ. Минмонтажспецстроя СССР. – Москва, 1980. – Вып. 7. – С. 13–14.
13. Путляев И. Е. Пути улучшения структуры бетонов на основе жидких силикатных стекол / Путляев И. Е., Отрепьев В. А. // Бетон и железобетон. – 1978. – № 4. – С. 43–44.
14. Технология изделий из электропроводного бетона // Бетон. – Режим доступа: <http://betony.ru/betel/tehnologiya-izdeliy.php>.
15. Электропроводимый бетон // Бетон. – Режим доступа: <http://betony.ru/betel/>.

16. Электрические свойства бетэла // Бетон. – Режим доступа: <http://betony.ru/betel/elektricheskie-svoystva-betela.php>.
17. Плагин Ал. А. Электропроводящие покрытия для защиты от электрокоррозии: разработка составов / Ал. А. Плагин // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Хімія, хімічна технологія та екологія : зб. наук. пр. – Харків, 2013. – Вип. 64(1037). – С. 120–128.
18. Супрун О. Ю. Жидкостекольные композиции для защиты строительных конструкций от коррозионных воздействий / О. Ю. Супрун // Коммунальное хозяйство городов. Серия : Технические науки и архитектура : науч.-техн. сб. // Харьков. нац. акад. гор. хоз-ва ; отв. ред. Л. Н. Шутенко. – Киев, 2005. – Вып. 63. – С. 108–116. – Режим доступа: <http://eprints.kname.edu.ua/2143/1/%D0%9E.%D0%AE.%D0%A1%D0%A3%D0%9F%D0%A0%D0%A3%D0%9D.pdf>.

## REFERENCES

1. Antoshin V.V., Antonov S.S., Demidov B.F., Dronov S.G., Klonitskij M.L., Kurnosova N.D., Frolov D.L., Shishkanov N.N. and Yakobson S.S. *Pravila ustrojstva i ekspluatatsii lokalizuyushchikh sistem bezopasnosti atomnykh stantsij: PNAE G-10-021-90* [Rules for arrangement and operation of nuclear power plants localizing safety systems: Rules and regulations in the nuclear industry G-10-021-90]. Moskva: Gospromatomnadzor SSSR, 1991. Available at: <http://document.ua/pravila-ustroistva-i-yekspluatatsii-lokalizuyushih-sistem-bez-nor5286.html>. (in Russian).
2. Pergamenshchik B.K., Telichenko V. I., Temishev R.R. and Telichenko V.I. *Vozvedenie spetsial'nykh zashchitnykh konstruksij AES* [Construction of special protective structures of the nuclear power plant]. Moskva: Izd. dom MEI, 2011, 240 p. (in Russian).
3. *Nuclear containments: state-of-art report*. Fédération Internationale de la Précontrainte, Fédération internationale du béton. Nuclear containments. Stuttgart, 2001, no. 13, 130 p.
4. Nelson R. *Manufactured Meltdown*. Popular Science. 1988, vol. 232, no. 1, pp. 66–67.
5. Korobov L.A., Nazarev O.K. and Pavilajnen V.Ya. *Zhelezobetonnye prostranstvennyye konstruksii atomnykh i teplovykh elektrostantsij* [Concrete spatial design of nuclear and thermal power stations]. Moskva: Energoizdat, 1981, 328 p. (in Russian).
6. Demidov A.P. and Savchenko V.A. *Zashchitnye obolochki reaktornykh otdelenij zarubezhnykh AES* [Reactor compartments protective shells of foreign NPP]. *Energeticheskoe stroitel'stvo za rubezhom* [Energy construction abroad]. 1989, no. 5, pp. 2–7. (in Russian).
7. Dubrovskij V.B., Kirillov A.P., Konviz V.S., Lavdanskij P.A., Neshumov F.S., Ponomarev Yu.V. and Puhovskij A.B. *Stroitel'stvo atomnykh elektrostantsij* [Construction of the atom nuclear plants]. Moskva: Energoatomizdat, 1987, 248 p. (in Russian).
8. *Bezopasnost' rossijskikh AES* [Safety of Russian NPP]. *Rosatom* [Russian atom]. Available at: [http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/nuclearindustry/npp\\_safety](http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/nuclearindustry/npp_safety). (in Russian).
9. *Ispol'zovanie betona v kachestve elektroprovodnogo materiala* [The concrete use as a conductive material]. *Beton* [Concrete]. Available at: <http://betony.ru/betel/ispolzovanie-betona-v-kachestve-elektroprovodnogo-materiala.php> (in Russian).
10. Korneev V.I. and Danilov V.V. *Rastvorimoe i zhidkoe steklo* [Soluble and water glass]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Engineering]. Sankt-Peterburg: Strojizdat, 1996, 216 p. Available at: <http://chem21.info/page/169042004212115240017068169076168051171155043145/> (in Russian).
11. Subbotkin M.I., Kuritsyna Yu.S. and Matveev M.A. *Kislotoupornye betony i rastvory na osnove zhidkogo stekla* [The acid-resistant concrete and solutions on the basis of liquid glass]. Moskva: Strojizdat, 1967, 135 p. (in Russian).
12. Bichevoj P.P. and Chukhnilovskij N.A. *Vlijanie prirody zhidkogo stekla na svojstva silikatnykh mastik* [Influence of the liquid glass nature on the properties of silicate cements]. *Montazhnye i spetsial'nye stroitel'nye raboty. Ser. 4: Protivokorroziionnye raboty v stroitel'stve* [Installation and special construction works. Series 4: Anticorrosive works in construction]. *Centr. Byuro nauch.-tekhn. inform. Minmontazhspetsstroya SSSR* [Centre. Bureau of the scientific and engineering information of Minmontazhspetsstroya USSR]. Moskva, 1980, iss. 7, pp. 13–14. (in Russian).
13. Putlyayev I.E. and Otrepev V.A. *Puti uluchsheniya struktury betonov na osnove zhidkikh silikatnykh stekol* [Ways to improve concrete structures based on liquid silicate glasses]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1978, no. 4, pp. 43–44. (in Russian).
14. *Tekhnologiya izdelij iz elektroprovodnogo betona* [The product technology of electrically conductive concrete]. *Beton* [Concrete]. Available at: <http://betony.ru/betel/tehnologiya-izdeliy.php>.
15. *Elektroprovodimyj beton* [Energy conductive concrete]. *Beton* [Concrete]. Available at:– Rezhim dostupa: <http://betony.ru/betel/>. (in Russian).
16. *Elektricheskie svojstva betela* [Electrical properties of betel]. *Beton* [Concrete]. Available at: <http://betony.ru/betel/elektricheskie-svoystva-betela.php> (in Russian).
17. Плагин Ал. А. *Электропроводящие покрытия для защиты от электрокоррозии: разработка составов* [The

electrically conductive coating for protection against galvanic corrosion: development of formulations]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universitetu "KhPI". Seriya : Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekologiia* [Bulletin of the State Technical University "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and ecology]. Kharkiv, 2013, iss. 64(1037), pp. 120–128. (in Russian).

18. Suprun O.Yu. and Shutenko L.N. *Zhidkostekol'nye kompozitsii dlya zashchity stroitel'nykh konstruksij ot korrozionnykh vozejstvij* [Liquid glassed compositions for building structures protection against the corrosive effects]. *Kommunal'noe khoz'yajstvo gorodov. Seriya: Tekhnicheskie nauki i arhitektura* [Cities utilities. Series: Engineering and Architecture]. *Khar'kov. nats. akad. gor. khoz-va* [Kharkov State Academy of Urban Economy]. Kiev, 2005, iss. 63, pp. 108–116. Available at: <http://eprints.kname.edu.ua/2143/1/%D0%9E.%D0%AE.%D0%A1%D0%A3%D0%9F%D0%A0%D0%A3%D0%9D.pdf> (in Russian).

*Рецензент: д-р. т. н., проф. Сєдін В. Л.*

Надійшла до редколегії: 10.02.2016 р. Прийнята до друку: 24.02.2016 р.