

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 620.179.1

**ЭФФЕКТИВНОЕ ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ АЭС  
ЗА СЧЕТ ВВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО МОНИТОРИНГА  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭНЕРГОБЛОКА**

© 2020 А.А. Землянский\*, В.П. Григоренко\*\*, К.А. Землянский\*\*, С.А. Дубнов\*

\* Балаковский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Балаково, Саратовская обл., Россия

\*\* Балаковская АЭС, Балаково, Саратовская обл., Россия

Все объекты атомной энергетики относятся к уникальным сооружениям и одновременно идентифицируются согласно СТО 1.1.1.02.009.0873-2017 «Обеспечение безопасности при эксплуатации зданий и сооружений атомных станций», как опасные производственные объекты с повышенным уровнем ответственности. В связи с этим, по мнению авторов, а также международных и отечественных экспертов в систему безопасности АЭС следует ввести дополнительный элемент в виде системы активного мониторинга напряженно-деформированного состояния незаменимых несущих и ограждающих конструкций реакторного и турбинного отделения. В работе обосновывается факт того, что существующие на сегодняшний день системы мониторинга не позволяют надежно и эффективно оценивать уровень НДС конструкций, а также не позволяют оценивать уровень «остаточных» напряжений, наличие которых на практике может также приводит к предаварийным и аварийным ситуациям. Для решения указанной проблемы авторами настоящей статьи разработана инновационная система мониторинга НДС как металлических, так и железобетонных несущих строительных конструкций, которая полностью лишена недостатков традиционных систем мониторинга, и характеризуется рядом неоспоримых преимуществ. Предлагаемая система мониторинга разработана на основе использования эффекта Форстера, в основу которого положена зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнитных сред от уровня действующих в материале напряжений. На разработанную систему мониторинга авторами получен патент № 2295118, который свидетельствует об уровне эффективности инновационного решения данной проблемы. В целом, использование предлагаемой системы в качестве дополнительного барьера защиты позволит на практике предупредить и не допустить любую внештатную, предаварийную, либо аварийную ситуацию на АЭС с одновременным повышением уровня безопасности и надежности эксплуатации АЭС после продления срока ее эксплуатации.

*Ключевые слова:* защитные барьеры, надежность, магнитометрические датчики, мониторинг строительных конструкций, остаточные напряжения.

Поступила в редакцию 05.11.2019

После доработки 18.12.2019

Принята к публикации 27.12.2019

Во всем мире безопасность атомных станций независимо от технологических особенностей АЭС базируется на концепции глубоко эшелонированной защиты. Такая концепция предусматривает создание ряда последовательных физических защитных барьеров [1]; на пути распространения радиоактивных веществ в окружающую среду в результате возникновения на АЭС какой-либо внештатной аварийной ситуации на первом или втором контуре действующей АЭС.

При этом в настоящее время на всех АЭС Российской Федерации имеется **пять** классических защитных барьеров. В частности, в **первый защитный барьер** входит топливная матрица в виде топливных таблеток из диоксида урана, которая удерживает более 98% радиоактивности даже при некотором нарушении температурного режима технологического процесса в реакторе.

**Вторым защитным барьером** в современных АЭС является оболочка ТВЭла, так как в качестве материала для изготовления защитных трубок ТВЭлов в настоящее время используется рекристаллизованный и самый современный сплав циркония марки Э-635, который обладает более высокими механическими характеристиками и меньшей радиационной ползучестью и коррозией при высоких рабочих температурах.

**Третьим защитным барьером** на действующих АЭС является граница рабочего контура теплоносителя реактора. В целом полный объем первого контура реактора ВВЭР-1000 с РУ В-320 составляет 370 м<sup>3</sup>.

**Четвертым защитным барьером** в типовых отечественных АЭС является герметичное ограждение оборудования первого контура реакторной установки, в виде защитной железобетонной оболочки, обеспечивающей необходимую дополнительную безопасность для окружающей среды и которая может выдержать даже несанкционированный удар самолета.

**Пятым защитными барьером** в современных АЭС является биологическая защита в виде различных экранов биологической защиты.

Однако учитывая тот факт, что все объекты атомной энергетики относятся к уникальным сооружениям и одновременно идентифицируются согласно СТО 1.1.1.02.009.0873-2012 «Обеспечение безопасности при эксплуатации зданий и сооружений атомных станций» [2] как – опасные производственные объекты с повышенным уровнем ответственности, соответственно по следующим признакам:

- использование на АЭС рабочих сред с высокими технологическими параметрами ( $T = 320/274^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 160/60$  кгс/см<sup>2</sup>);
- наличие в рабочей зоне первого и второго контура главных циркуляционных насосов, мощных турбоагрегатов высокого и низкого давления, насосного оборудования, мощных мостовых и полярных кранов, высокой гидродинамической нагрузки в бассейне выдержки и перегрузки, формирующие дополнительные статические и динамические нагрузки на несущие и ограждающие конструкции, относящиеся по существующей нормативной литературе к незаменимым элементам и интенсивно снижающие уровень их остаточного ресурса.

В связи с этим, по мнению авторов данной работы и мнению многих международных и отечественных экспертов, в существующую систему безопасности АЭС следует ввести дополнительную систему активного мониторинга напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) незаменимых несущих и ограждающих конструкций РО и МО, которая будет контролировать НДС наиболее ответственных элементов АЭС, активно влияющих на общий уровень безопасности рассматриваемого объекта.

В частности к таким важным и критически опасным элементам относятся, прежде всего:

- бассейн выдержки и перегрузки, уровень эксплуатационной надежности и изменение НДС которого необходимо контролировать в режиме онлайн;
- железобетонная фундаментная плита реакторного отделения, уровень напряженно-деформированного состояния, которой необходимо контролировать в течение всего срока эксплуатации АЭС;
- железобетонная защитная оболочка реакторного отделения, уровень преднапряжения и НДС которой необходимо контролировать в текущем режиме;

- хранилище твердых и радиоактивных отходов, в котором необходимо контролировать НДС железобетонных боксов для хранения отходов;
- фундамент турбоагрегата с обязательной оценкой статических и динамических напряжений в его несущих конструкциях во время пуска остановки и текущей работы турбоагрегата с определением в режиме онлайн – частоты собственных и вынужденных колебаний объекта, а также логарифмических декрементов колебаний основного тона объекта, как в продольном, так и в поперечном направлениях;
- каркас машинного отделения, электроэтажерки и деаэрационного отделения АЭС с регистрацией НДС каркаса во всех режимах эксплуатации;
- подкрановые балки и рабочий мост полярного крана в РО, а также тяжелых мостовых кранов машинного зала АЭС с оценкой уровня их НДС при ремонтных работах и внештатных ситуациях;
- фундаменты, под силовое теплотехническое оборудование, включая парогенераторы и главные циркуляционные насосы АЭС с включением в систему мониторинга и оценку напряженно-деформированного состояния анкерных болтов крепления трубопроводов первого и второго контуров и специализированного оборудования, а также специальных демпферных систем.

Наличие на АЭС работающей системы мониторинга НДС позволит на практике предотвратить и не допустить возникновения на действующей АЭС, какой либо предаварийной, либо аварийной ситуации, связанной с переходом в критическую зону работы любого из вышеперечисленных силовых и конструктивных незаменимых элементов. Особенно этот факт важен в связи с продлением срока службы действующих энергоблоков согласно требованиям Федеральной программы «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» [3], в которой заложены главные принципы повышения энергоэффективности и безопасности атомной энергетики России в новом веке, за счет:

- повышения установленной мощности действующих энергоблоков;
- повышения уровня безопасности и надежности эксплуатации модернизированных блоков;
- и продления срока безопасной эксплуатации действующих энергоблоков.

Введение дополнительной инновационной системы активного мониторинга НДС несущих и специальных строительных конструкций энергоблоков АЭС косвенно диктуется, по нашему мнению, еще и тем, что с целью стабилизации уровня эксплуатационной надежности действующих АЭС на проектном уровне в ходе повышения мощности действующих энергоблоков и продления срока их эксплуатации Правительством Российской Федерации и ОАО «Концерн Росэнергоатом» были разработаны и введены в действие ряд новых нормативных документов, регламентирующих необходимость организации активного мониторинга НДС для особо ответственных и критически важных несущих и ограждающих конструкций, и незаменимых элементов АЭС в частности:

- Федеральный закон №384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [4];
- ГОСТ 31997-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [5];
- РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011 «Мониторинг строительных конструкций атомных станций» [6].

Все отмеченное свидетельствует о высокой актуальности и необходимости создания инновационной системы активного мониторинга НДС нового поколения, способной работать в жестких условиях действующих энергоблоков АЭС как на несущих элементах из металла, так и из тяжелого бетона и железобетона. Так

предотвращение любой потенциально возможной аварийной ситуации на вышеуказанных незаменимых несущих и ограждающих конструкциях АЭС с помощью предлагаемой авторами инновационной системы мониторинга позволит на практике эффективно решить задачу повышения безопасности действующих АЭС в ходе продления их срока службы.

В настоящее время известно 5 классических методов организации мониторинга НДС технологического оборудования и несущих конструкций уникальных, высотных, экологически опасных и энергогенерирующих объектов, основанных на использовании:

- 1) тензометрических датчиков;
- 2) струнных датчиков;
- 3) волоконно-оптические датчики;
- 4) акустоэмиссионных систем;
- 5) динамических методов испытания объектов с применением специального очень дорогостоящего вибродиагностического оборудования.

Все вышеперечисленные системы мониторинга имеют ряд очень серьезных недостатков, обусловленных:

- высокой стоимостью вышеуказанных измерительных систем при длительном и многолетнем использовании в жестких условиях эксплуатации на действующих АЭС;
- относительно низкой чувствительности и разрешающей способности используемого оборудования;
- низкой надежностью отдельных элементов системы;
- наличие «дрейфа нуля» (самопроизвольное изменение показаний);
- релаксацией и ползучестью рабочего слоя клея в тензометрических датчиках и в материале струны струнных датчиков во времени;
- невозможностью использования струнных и акустоэмиссионных методов при динамических режимах испытания и эксплуатации исследуемых объектов;
- невозможностью оценки так называемых «остаточных» напряжений и накопленных усталостных явлений в материале эксплуатируемой конструкции в результате воздействия жесткой радиации или других технологических воздействий.

Следует также отметить, что в отличие от предлагаемой системы, ни одна из вышеперечисленных систем не позволяет измерить или хотя бы оценить уровень так называемых «остаточных» напряжений в конструкционном материале, которые в ряде случаев могут достигнуть критических пределов, что зачастую приводит на практике к необратимым и лавинообразным разрушениям объекта. При этом теоретически возможен случай, когда сложное и высокоответственное инженерное сооружение может стать просто непригодным к дальнейшей эксплуатации даже при самых минимальных внешних нагрузках либо из-за наличия в материале высоких «остаточных» напряжений, либо из-за выгорания в облицовке, несущих металлических конструкциях и в рабочей арматуре ЖБК, легирующих элементов с одновременным накоплением повреждений в указанном материале на атомарном уровне из-за жесткого облучения последнего.

Кроме того следует отметить, что в настоящее время не существует каких-либо надежных измерительных систем и датчиков способных измерять НДС арматуры в ЖБК, (так в СП 63.13330.2018 [7], РД ЭО 1.1.2.99.0867-2012 [8] рекомендовано определять уровень напряжения в продольной арматуре ЖБК только расчетным путем с использованием ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами).

С целью решения указанной проблемы авторы настоящей статьи разработали инновационную систему мониторинга НДС как для ферромагнитных материалов

используемых в облицовке или в несущих металлических конструкциях АЭС (рис. 1), так и для оценки НДС рабочей арматуры в железобетонных конструкциях, что сделано впервые.



Рисунок 1 – Общий вид системы мониторинга ферромагнитных материалов [General view of the monitoring system of ferromagnetic materials]

Структурная схема системы активного мониторинга представлена на рисунке 2.

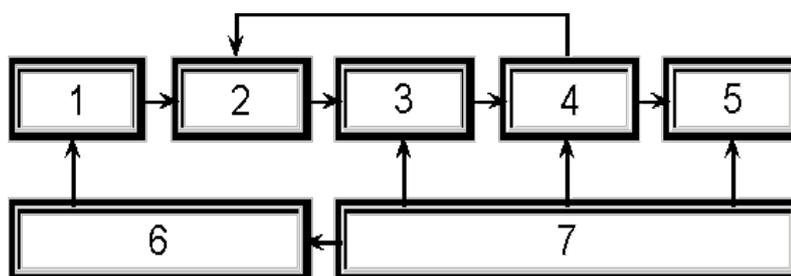


Рисунок 2 – Структурная схема системы активного мониторинга НДС:

- 1 – дифференциальный ферромагнитный датчик; 2 – преобразователь сигнала на базе мостов Уитстона; 3 – усилитель постоянного тока; 4 – процессор целевого назначения с аналого-цифровым преобразователем; 5 – цифровой регистратор выходного сигнала;  
6 – низкочастотный стабилизированный блок питания; 7 – рабочий блок питания  
[Structural scheme of active monitoring system of stress-strain states  
1 – differential ferromagnetic sensor; 2 – signal converter based on Whitston bridges; 3 – DC amplifier;  
4 – target function processor with analog-to-digital converter; 5 – digital output signal recorder;  
6 – low-frequency stabilized power supply; 7 – operating power supply unit]

Предлагаемая система мониторинга разработана на основе использования эффекта Форстера [9], в основу которого положена зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнитных сред от уровня действующих в материале напряжения.

При этом на магнитоупругий датчик и систему активного мониторинга НДС ферромагнитных материалов авторами получен патент № 2295118 [10] и подготовлена заявка на изобретение на метод измерения НДС в рабочей арматуре ответственных железобетонных конструкций АЭС с использованием того же эффекта Форстера. Сравнительные характеристики существующих систем мониторинга и разработанной системы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики существующих и разработанной системы мониторинга НДС незаменимых несущих конструкций [Technical specifications of the existing and developed system of VAT monitoring of irreplaceable load-bearing structures]

№ п/п	Наименование технических характеристик	Система мониторинга НДС на основе использования			
		Тензометрических датчиков	Струнных датчиков	Оптоволоконных датчиков	Магнитоупругих датчиков
1	Диапазон измерения (МПа)	+/-300	+/-350	+/-380	+/-450
2	Чувствительность (МПа)	0.2	0.1	0.2	0.05
3	Погрешность (%)	5	2	1	0.5
4	Частотный диапазон (Гц)	0-1000	-	0-4000	0-8000
5	Ползучесть, дрейф нуля (%)	0,1	0,05	0,05	отсутствует
6	Температурный диапазон работы (°С)	-20 +40	-30 +60	-30 +50	-40 +70
7	Возможность измерения «остаточных» напряжений	отсутствует	отсутствует	отсутствует	имеется

Детальное сравнение технических характеристик традиционных систем и предложенной автором системы активного мониторинга НДС ферро-магнитных материалов и арматуры в ЖБК на основе использования новых магнитометрических датчиков позволило установить, что:

- все традиционные системы мониторинга измеряют уровень напряженного состояния материала конструкций косвенным путем измерения фибровых деформаций материала, которые на практике могут возникать не в результате изменения напряженного состояния конструкции, а в результате совсем других причин, например в результате ползучести клея между датчиком и материалом конструкции, либо в результате изменения температурного или влажностного режима объекта и т.д.;
- в предлагаемой системе мониторинга на основе магнитометрических датчиков измерение напряженного состояния материала конструкций выполняется на атомарном уровне за счет косвенной оценки изменений в атомарной решетки материала возникших только в результате фактического изменения напряженного состояния материала, что очень важно;
- ни одна из традиционных систем мониторинга не позволяет оценить уровень «остаточных» напряжений в материале несущих конструкций АЭС, а предлагаемая система мониторинга на основе магнитоупругих датчиков позволяет оценить уровень «остаточных» и действующих напряжений в материале обследуемой конструкции, что повышает степень достоверности получаемых результатов;
- кроме того тензометрические, струнные и оптоволоконные датчики не позволяют организовать длительные измерения НДС конструкций в связи с ползучестью клеевых соединений и материала преднапряженных струнных и оптоволоконных датчиков, а предлагаемые магнитоупругие датчики не имеют указанных недостатков и могут использоваться на рабочих объектах АЭС неограниченно длительное время, что позволяет использовать предлагаемые системы в течение всего срока эксплуатации атомной станции;
- уровень чувствительности и надежности, предлагаемых магнитоупругих датчиков, значительно выше, чем у традиционных систем мониторинга при меньшей стоимости;

- кроме отмеченного разработанная система мониторинга позволяет измерять уровень напряженно-деформированного состояния материала несущих конструкций АЭС не только в статическом режиме, но и в динамическом режиме, без использования дополнительного электронного оборудования и в полном соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения [5]. «Правила обследования и мониторинга технического состояния»;
- в частности, разработанная система мониторинга позволяет также измерять, например, у фундамента турбоагрегата и других высокоответственных элементов АЭС – частоту собственных колебаний, логарифмический декремент основного тона собственных колебаний в различных направлениях, скорость и ускорение колебаний отдельных несущих конструкций обследуемого объекта, что позволяет на практике по динамике изменения частоты свободных колебаний и логарифмического декремента колебаний объекта объективно оценивать направление изменения уровня его эксплуатационной надежности и на практике эффективно предупредить любую внештатную предаварийную, либо аварийную ситуацию контролируемого объекта с одновременным повышением уровня его безопасности и надежности в ходе эксплуатации.

Созданный авторами, действующий пилотный вариант системы активного мониторинга НДС строительного объекта был успешно использован на практике при оценке напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных резервуаров для хранения бензина на Балаковской нефтебазе в 2005 г., а также при оценке НДС несущих металлических двутавров одного из главных пролетов шлюзового моста в г. Балаково [11]. Полученные результаты показали очень высокую чувствительность и разрешающую способность предложенной системы мониторинга, а также способность системы надежно работать в режиме онлайн с использованием выделенного радиоканала связи [12].

Кроме отмеченного разработанная система активного мониторинга НДС ферромагнитных материалов успешно используется в Балаковском институте техники и технологии (филиал) НИЯУ МИФИ г. Москва на кафедре «Промышленное и гражданское строительство» при проведении лабораторных работ по курсу «Мониторинг технического состояния зданий и сооружений». При этом ошибка при оценке сходимости расчетных и экспериментальных результатов не превышает на практике 1% [13].

Детальный анализ всего выше представленного материала позволило авторам сформулировать следующие выводы:

1. Предложенная система активного мониторинга НДС является практически чистым патентным направлением не имеющим базовых недостатков присущих тензометрическим, струнным, оптоволоконным и акустоэмиссионным системам измерения НДС строительных конструкций;
2. Практическое использование рассматриваемой системы активного мониторинга НДС возможно на ядерных, экологически опасных и уникальных объектах, разрушение которых может принести огромный и несопоставимый даже с первоначальной стоимостью указанных объектов ущерб;
3. Использование на практике предложенной системы активного мониторинга НДС позволило установить очень высокую чувствительность, разрешающую способность и надежность по сравнению с существующими аналогами;
4. Практическое использование разработанной системы активного мониторинга НДС на объектах ядерной энергетики позволит повысить общий уровень эксплуатационной надежности энергоблоков и предотвратить возможность возникновения любой внештатной, предаварийной, либо аварийной ситуации при эксплуатации указанных ядерных объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НП-001-15 «Общие положения обеспечивающие безопасность атомных станций» Приказ № 522 от 17 декабря 2015 г. Об утверждении Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии. – 57 с. – URL : <https://www.seogan.ru/np-001-15-obshnie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciiy.html>.
2. СТО 1.1.1.02.009.0873-2017 «Обеспечение безопасности при эксплуатации зданий и сооружений атомных станций». – Москва : ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2017. – 30 с.
3. Федеральная программа «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» Постановление Правительства РФ №1715 от 13.11.2009 г. – 144 с. – URL : <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
4. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений ФЗ №384-ФЗ от 30.12.2009 г. – URL : [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_95720/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/).
5. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Москва : МИТКС, 2012. – 68 с.
6. РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011 Мониторинг строительных конструкций атомных станций. – Москва : ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. – 68 с.
7. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018. 152 с. URL : <https://ulgosexp.ru/files/documents/Prikaz-Ministerstva-stroitelstva-i-zhilishhno-kommunalnogo-hozyajstva-RF-ot-19.12.2018-goda-832-pr-1.pdf>
8. РД ЭО 1.1.2.99.0867-2012 Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций атомных станций. – Москва : ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. – 30 с.
9. *Forster, F.Z.* fur Metallkunde. № 43. 1952, 89 p. URL : <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A12947424X/Zeitschrift-f%C3%BCr-Metallkunde-international-journal/>
10. Патент 2295118 Российская федерация, МПК G01B 7/24. Магнитоупругий датчик С1 БИ №1: заявитель и патентообладатель Саратовский государственный технический университет Москва, 2007, Землянский К. А., Землянский А. А.
11. *Землянский, А. А.* Мониторинг и управление надежностью зданий и сооружений различного назначения / А. А. Землянский // Промышленное и гражданское строительство. – Москва, 2004. – № 9. – С. 39.
12. *Землянский, К. А.* Инновационная система активного мониторинга НДС несущих и ограждающих конструкций энергогенерирующих объектов / К. А. Землянский, А. А. Землянский // Труды X Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Волгоград, 2014. – С. 41-45.
13. *Землянский, К. А.* Инновационная система НДС несущих конструкций и силового оборудования гидротехнических сооружений / К. А. Землянский, А. А. Землянский // Сборник статей II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий», БИТИ НИЯУ МИФИ. – Балаково, 2016. – С. 81-90.

## REFERENCES

- [1] NP-001-15 1 Obshhie polozhenie obespechivayushhie bezopasnost' atomny'x stancij. Prikaz № 522 ot 17 dekabrya 2015 g. Ob utverzhdenii Federal'ny'x norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoj e'nergii [General Provisions of Nuclear Power Plants Ensuring Safety. Order No. 522 dated December 17, 2015. Approval of Federal Norms and Rules in the Field of Nuclear Energy Use]. URL: <https://www.seogan.ru/np-001-15-obshnie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciiy.html>
- [2] STO 1.1.1.02.009.0873-2017. Obespechenie bezopasnosti pri ekspluatatsii zdaniy i sooruzhenij atomnyh stancij [Safety during Operation of Buildings and Structures of Nuclear Power Plants]. Moscow: Rosenergoatom Concern OJSC 2017. 30 p. (in Russian).
- [3] Federal'naya programma «Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda» Postanovlenie Pravitel'stva RF №1715 ot 13.11.2009 g. [Federal Program «Energy Strategy of Russia until 2030» Resolution of the Government of the Russian Federation dated 13.11.2009]. Oficial'nyj sayt ministerstva energetiki RF [Official website of the Ministry of Energy of the Russian Federation]. 2009. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (in Russian).
- [4] Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij FZ №384-FZ ot 30.12.2009 g. [Technical Regulations on Safety of Buildings and Structures of Federal Law No. 384-FZ of 30.12.2009]. Oficial'nyj sayt kompanii «Konsul'tantPlyus» [«ConsultantPlus» Official Site]. 2009. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_95720/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/) (in Russian).

- [5] GOST 31937-2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya [Buildings and Constructions. Rules for Inspection and Monitoring of Technical Condition] Moscow: MITKS, 2012. P. 68. (in Russian).
- [6] RD EO 1.1.2.99.0624-2011 Monitoring stroitel'nyh konstrukcij atomnyh stancij [Monitoring of Construction Structures of Nuclear Power Plants]. Moscow: Rosenergoatom Concern OJSC 2012. 68 p. (in Russian).
- [7] SP 63.13330.2018 Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya. SNiP 52-01-2003 [Concrete and Reinforced Concrete Construction. Main Provisions. SNiP 52-01-2003]. Ministerstvo stroitel'stva i zhilishhno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federacii [Ministry of Construction Industry, Housing and Utilities Sector]. 2018 (in Russian).
- [8] RD EO 1.1.2.99.0867-2012 Metodika ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa stroitel'nyh konstrukcij atomnyh stancij [Methodology of Assessment of Technical Condition and Residual Life of Building Structures of Nuclear Power Plants]. Moscow. Rosenergoatom Concern OJSC 2012. 30 p. (in Russian).
- [9] Forster F.Z. für Metallkunde. #43. 1952 89 p., URL : <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A12947424X/Zeitschrift-f%C3%BCr-Metallkunde-international-journal/> (in German).
- [10] Patent № 2295118 Rossijskaya federaciya, MPK G01B 7/24 Magnitoprugij datchik S1 BI №1, Moskva, 2007 [Patent No. 2295118 Russian Federation, MPK G01B 7/24 Magnetoelastic Sensor C1 BI No.1, Moscow, 2007]. Zemlyanskij A.A., Zemlyanskij K.A. (in Russian).
- [11] Zemlyanskij A.A. Monitoring i upravlenie nadezhnost'yu zdaniy i sooruzhenij razlichnogo naznacheniya [Monitoring and Management of the Reliability of Buildings and Structures for Various Purposes]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. Moscow. 2004. №9. P. 39 (in Russian).
- [12] Zemlyanskij K.A., Zemlyanskij A.A. Innovacionnaya sistema aktivnogo monitoringa NDS nesushchih i ograzhdayushchih konstrukcij energogeneriruyushchih ob'ektov [Innovative system of Active VAT Monitoring of Load-Bearing and Enclosing Structures of Power Generating Facilities]. Trudy` X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnost` yadernoj e`nergetiki», VITI NIYaU MIFI [Works of the X International Conference «Safety in the Nuclear Power Industry». Volgodonsk, VITI (branch) NRNU MEPhI]. 2014. P. 41-45 (in Russian).
- [13] Zemlyanskij K.A., Zemlyanskij A.A. Innovacionnaya sistema NDS nesushchih konstrukcij i silovogo oborudovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Innovative VAT System of Supporting Structures and Power Equipment of Hydraulic Structures]. Sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'ny'e problemy` i puti razvitiya e`nergetiki, tekhniki i texnologij». BITI NIYaU MIFI. Balakovo [Works of the II International Conference «Actual Problems and Ways of Development of Energy, Machinery and Technologies. Balakovo. BITI (branch) NRNU MEPhI]. 2016. P. 81-90 (in Russian).

## Effective Increasing of NPP Reliability Introducing the Active Monitoring System of Block Construction Stress-Strain State

A.A. Zemlyanskij<sup>\*1</sup>, V.P. Grigorenko<sup>\*\*2</sup>, K.A. Zemlyanskij<sup>\*\*3</sup>, S.A. Dubnov<sup>\*4</sup>

*\*Balakovo Institute of Engineering and Technology, the branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Chapajeva street, 140, Balakovo, Saratovskaja oblast', Russia 413853*

*\*\*Balakovo Nuclear Power Plant, Balakovo, Saratovskaja oblast', Russia 413801*

*<sup>1</sup>ORCID iD: 0000-0002-6379-0770*

*WOS Researcher ID: AAC-1036-2019*

*e-mail: zeml\_aa@mail.ru*

*<sup>2</sup>ORCID iD: 0000-0002-9581-1193*

*WOS Researcher ID: AAC-5036-2019*

*<sup>3</sup>ORCID iD: 0000-0001-6299-7879*

*WOS Researcher ID: AAC-1039-2019*

*e-mail: zeko.macos@gmail.com*

*<sup>4</sup>ORCID iD: 0000-0002-2871-1029*

*WOS Researcher ID: AAC-1034-2019*

*e-mail: dubnov\_semyon@mail.ru*

**Abstract** – All nuclear power facilities are unique facilities and are simultaneously identified according to STO 1.1.1.02.009.0873-2017 "Ensuring Safety in the Operation of Buildings and Structures of Nuclear Power Plants" as hazardous production facilities with an increased level of

responsibility. In this connection, according to the authors, as well as international and domestic experts, the sixth protective barrier should be promptly introduced into the NPP safety system in the form of a system of active monitoring of irreplaceable load-bearing and enclosing structures of the reactor and turbine compartment. The paper substantiates the fact that the current monitoring systems do not allow reliable and effective assessment of the level of VAT of structures, as well as do not allow to assess the level of "residual" stresses, the presence of which in practice may also lead to pre-emergency and emergency situations. To solve this problem the article develops an innovative system of VAT monitoring of both metal and reinforced concrete bearing structures, which is completely devoid of shortcomings of traditional monitoring systems, and which also has a number of undeniable advantages. The proposed monitoring system is developed on the basis of the Forster effect, which is based on the dependence of the relative magnetic permeability of ferromagnetic media on the level of operating stresses in the material. The authors obtained patent No. 2295118 for the developed monitoring system, which testifies to the level of efficiency of innovative solution of this problem. In general, the use of the proposed system as the sixth barrier of protection will in practice prevent any external, pre-accident or emergency situation at the NPP with simultaneous increase of safety and reliability of operation of the NPP after the extension of its operation life.

*Keywords:* protective barriers, reliability, magnetometric sensors, monitoring of building structures, residual stresses.