

МРНТИ 29.19.21; 67.09.33

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v80.i1.06>

Д.С. Дюсамбаев<sup>1\*</sup>, М.Т. Айткулов<sup>1</sup>, А.Н. Мадиянова<sup>2</sup>,  
А.Б. Касымов<sup>2</sup>, Ж.Т. Бугыбай<sup>1</sup>, К.С. Киселев<sup>1</sup>, А.М. Аханов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Университет имени Шакарима города Семей, Казахстан, г. Семей

\*e-mail: dyussambayev@inp.kz

## НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ БЕТОНА РАЗНЫХ МАРОК

Бетон – один из самых распространённых строительных материалов, который используется во многих сферах человеческой деятельности, начиная от строительства жилых домов и заканчивая промышленными строениями и не только. В атомной энергетике бетон используется не только как конструкционный материал, но и как материал биологической защиты. Обычно бетонная смесь состоит из цемента, крупного и мелкого заполнителя, воды и различных добавок. Исходя, из области применения бетона подбирается правильное соотношение его составляющих.

В данной работе приведены результаты исследования влияния состава бетона на его внутреннюю структуру. Исследования проведены неразрушающим методом нейтронной радиографии и томографии на установке, которая расположена на одном из горизонтальных каналов реактора ВВР-К. В результате проведенных исследований неразрушающим методом нейтронной радиографии и томографии были изучены образцы бетона трёх разных видов марок. Показано распределение пор и трещин в каждом образце. Приведены коэффициенты ослабления нейтронного излучения для исследуемых марок бетона. Оценена скорость миграции воды в бетоне разных марок. Продемонстрирована применимость установки нейтронной радиографии и томографии для данного типа исследований внутренней структуры бетона.

**Ключевые слова:** бетон, нейтронная радиография и томография, ВВР-К.

D.S. Dyussambayev<sup>1\*</sup>, M.T. Aitkulov<sup>1</sup>, A.N. Madiyanova<sup>2</sup>,  
A.B. Kasymov<sup>2</sup>, Zh.T. Buggybay<sup>1</sup>, K.S. Kiselev<sup>1</sup>, A.M. Akhanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>Shakarim State University of Semey, Kazakhstan, Semey

\*e-mail: dyussambayev@inp.kz

### Non-destructive studies of the internal structure of concrete of different grades

Concrete is one of the most common building materials that is used in many areas of human activity, from the construction of residential buildings to industrial buildings and more. In the nuclear power industry, concrete is used not only as a structural material, but also as a material for biological protection. Usually concrete mix consists of cement, coarse and fine aggregates, water and various additives. Based on the field of application of concrete, the correct ratio of its components is selected.

This paper presents the results of a study of the effect of the composition of concrete on its internal structure. The studies were carried out by the non-destructive method of neutron radiography and tomography at the facility, which is located on one of the horizontal channels of the WWR-K reactor. As a result of the studies carried out by the non-destructive method of neutron radiography and tomography, concrete samples of three different types of brands were studied. The distribution of pores and cracks in each sample is shown. The attenuation coefficients of neutron radiation for the studied concrete grades are given. The rate of water migration in concrete of different grades is estimated. The applicability of the neutron radiography and tomography installation for this type of investigation of the internal structure of concrete was demonstrated.

**Key words:** concrete, neutron radiography and tomography, WWR-K.

Д.С. Дюсамбаев<sup>1\*</sup>, М.Т. Айтқұлов<sup>1</sup>, Ә.Н. Мадиянова<sup>2</sup>,  
А.Б. Қасымов<sup>2</sup>, Ж.Т. Бұғыбай<sup>1</sup>, К.С. Киселев<sup>1</sup>, А.М. Аханов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>Семей қаласындағы Шәкәрім атындағы университет, Қазақстан, Семей қ.

\*e-mail: dyussambayev@inp.kz

### Әр түрлі маркалы бетонның ішкі құрылымын бұзбай зерттеу

Бетон – тұрғын үй құрылысынан бастап өнеркәсіптік құрылыстарға дейін және одан тыс жерлерде адам қызмет ететін көптеген салаларда қолданылатын ең көп таралған әрі ең сенімді құрылыс материалдарының бірі болып табылады. Атом энергетикасында бетон құрылымдық материал ретінде ғана емес, сонымен қатар биологиялық қорғаныс материалы ретінде де қолданылады. Әдетте бетон қоспасы цементтен, ірі және ұсақ тастардан және толтырғыштардан, судан және әртүрлі қоспалардан тұрады. Бетонды қолдану саласына сүйене отырып, оның компоненттерінің дұрыс қатынасы таңдалады.

Бұл жұмыста бетон құрамының оның ішкі құрылымына әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеулер ССР-Қ реакторының көлденең арналарының бірінде орналасқан қондырғыда нейтрондық радиография және томографияның бұзбай зерттеу әдісімен жүргізілді. Нейтрондық радиография мен томографияның бұзылмайтын әдісімен жүргізілген зерттеулер нәтижесінде үш түрлі маркалы бірнеше бетон үлгілері зерттелді. Әр үлгіде кеуектер мен жарықтардың таралуы көрсетілген. Бетонның зерттелетін маркалары үшін нейтрондық сәулеленудің әлсіреу коэффициенттері келтірілген. Әр түрлі маркалы бетондағы судың жылжу жылдамдығы бағаланды. Бетонның ішкі құрылымын бұзбай типті зерттеу үшін нейтрондық радиография мен томография қондырғысының қолданылуы көрсетілген.

**Түйін сөздер:** бетон, нейтрондық радиография және томография, ССР-Қ.

#### Введение

Бетон – это строительный материал, состоящий из цемента и воды, которые в сочетании с некоторыми заполнителями, такими как песок и щебень, затвердевают в результате химической реакции, превращая его после высыхания в прочную каменную массу [1]. В процессе данной реакции могут образовываться небольшие трещины, которые под действием механического давления могут распространяться в бетоне, вызывая макроскопические разрушения конструкций.

В атомной энергетике, бетон используется не только как конструкционный материал, но и как материал биологической защиты ядерных реакторов, хранилищ радиоактивных отходов, «горячих» камер и т.д. Для каждого применения предъявляются свои требования по свойствам и срокам эксплуатации. Например, хранилища радиоактивных отходов должны обеспечить длительное безопасное хранение отходов, поэтому бетон должен сохранить свои свойства в течение всего времени эксплуатации [2]. Так как основными целями захоронения являются защитить человека и окружающую среду от вредного воздействия радиоактивных отходов и свести к минимуму негативные последствия захоронения

для будущих поколений [3]. Учитывая вышесказанное, во всем мире ведутся активные разработки и исследования бетона и материалов на его основе. Существуют несколько методов для изучения внутренней структуры и дефектов в бетоне [4, 5]. В работе [6] продемонстрирована эффективность метода нейтронной радиографии (НР) для этой цели. Метод НР может быть применен для исследования пористости, микроструктуры и распределения размеров пор в бетоне [7, 8], а также для оценки миграции воды в бетоне разных марок [9, 10, 11].

В настоящей работе приведены результаты исследований бетона разных марок методом нейтронной радиографии и томографии.

#### Объект исследования

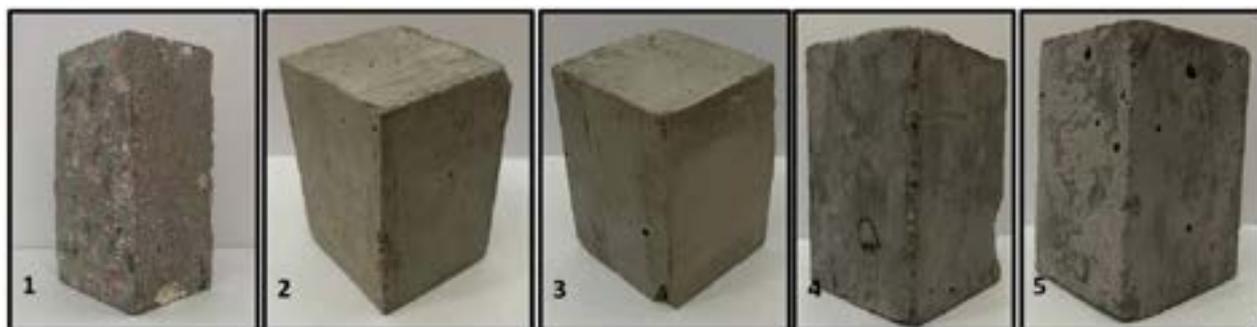
Для неразрушающих исследований были выбраны пять образцов бетона трех разных видов марок. Образцы бетона соответствовали требованиям ГОСТ [12, 13].

Образец №1 изготовлен из бетона марки М500 с максимальной фракцией заполнителя 28 мм (см.рис.1(1)). Образцы №2 и №3 изготовлены из бетона марки М400 с максимальной фракцией заполнителя 18 мм (см. рис.1(2 и 3)). Образцы №4 и №5 изготовлены из бетона марки М350 с

максимальной фракцией заполнителя 18 мм (см. рис.1 (4 и 5)).

Образец №1 был вырезан из имевшегося в наличии бетонного блока. Данный блок был

изготовлен в 2018 году и поэтому имеет естественное старение. Остальные образцы были изготовлены в 2021 году специально для этих исследований.



**Рисунок 1** – Внешний вид образцов для исследования  
Внешний вид образцов показан на рисунке 1, их габариты приведены в таблице 1

**Таблица 1** – Габариты исследуемых образцов

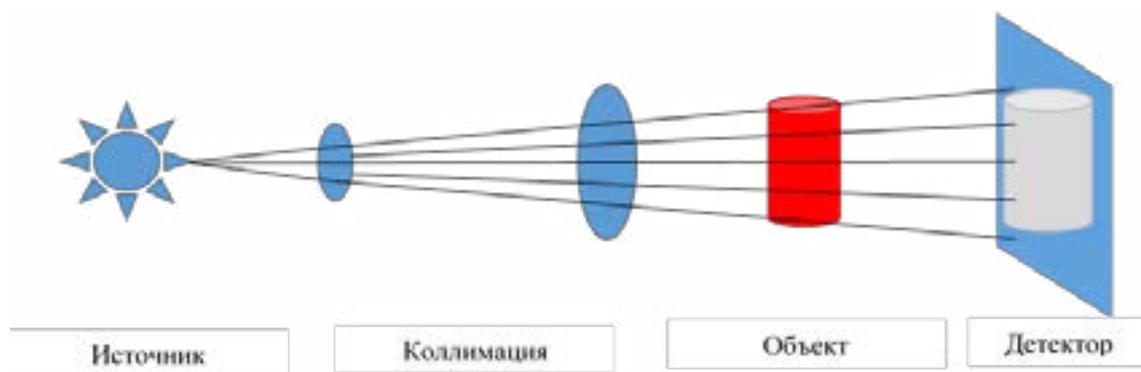
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
Длина, мм	48±2	53±2	53±2	53±2	53±2
Ширина, мм	44±2	51±2	52±2	50±2	51±2
Высота, мм	98±2	80±2	78±2	81±2	76±2

### Метод исследования

В качестве метода неразрушающих исследований бетона был выбран метод нейтронной радиографии и томографии.

Суть метода нейтронной радиографии заключается в том, что исследуемый объект

облучается коллимированным потоком нейтронов, где различие в нейтронных сечениях поглощения для разных элементов объекта дает информацию о внутреннем распределении неоднородностей исследуемых материалов (см. рис. 2). Детектор регистрирует распределение потока нейтронов за объектом [14].



**Рисунок 2** – Схема метода нейтронной радиографии

Нейтронное излучение проходя через материал будет ослабевать и описывается формулой (1) – Законом Ламберта-Бера [15].

$$I = I_0 e^{-\int_0^t N(x)\sigma(x)dx} \quad (1)$$

Степень ослабления излучения будет зависеть от двух процессов – это рассеяние и поглощение. Для количественного измерения этой величины вводится коэффициент ослабления излучения ( $\mu$ ). Подставляя этот коэффициент в формулу (1), закон Ламберта-Бера трансформируется в (2). Эта величина характеризует степень проникновения излучения в материал.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

В экспериментальной физике применяется массовый коэффициент ослабления, который равняется отношению коэффициента ослабления на плотность материала и измеряется в  $\text{см}^2/\text{г}$ .

Нейтронная томография (НТ) – это развитие метода НР, где используются математические методы и алгоритмы обработки данных для восстановления трехмерного изображения исследуемого объекта.

Данные исследования проведены на установке нейтронной радиографии и томографии (УНРиТ) [16-18], которая расположена на одном из горизонтальных каналов реактора ВВР-К [19, 20]. Параметры установки во время экспериментов приведены в таблице 2. Образцы были исследованы как радиографическим, так и томографическим методами. Время экспозиции составило 20 секунд. Вращение образца для томографии обеспечивалась работой гониометра. При этом было сделано 180 снимков с шагом в  $1^\circ$ . Далее образцы №1 и №4 были помещены в резервуар с водой высотой ~6 мм и производились их снимки в течение разного времени выдержки. На основе полученных снимков была изучена скорость распространения воды по высоте образца.

Таблица 2 – Параметры установки УНРиТ

Энергетический спектр нейтронов	Спектр Максвелла (тепловые нейтроны)
Расстояние от замедлителя до диафрагмы	3.5 м
Расстояние от диафрагмы до образца L	7 м
Диаметр отверстия D	20 мм
L/D	350
Поле обзора	9*9 $\text{см}^2$
Сцинтилляционный экран	$^6\text{LiF/ZnS: Ag}$ –толщина 0.1 мм
ПЗС-матрица камеры	НАМАМАТСU-S12101 2048*2048 пикселей с размером 12*12 $\mu\text{м}$ Полный размер 24x24 мм
Поток тепловых нейтронов на образец	$1.2 \cdot 10^7$ н/см $^2$ /сек at L/D=350 [2]
Нейтронный фильтр	Сапфир (толщина – 106 мм)
Стандартное время экспозиции	20-40 сек

Полученные изображения были обработаны и проанализированы с помощью программы ImageJ [21]. Этот процесс включает в себя коррекцию фона и расчет интенсивности в интересующей области. Необработанные изображения были нормализованы по отношению к изображениям открытого и закрытого пучка, чтобы вычесть фоновые шумы на основе уравнения (3) [22, 23]. Медианный фильтр использовался для

объединения трех изображений образца для устранения артефактов из-за гамма-лучей [24]. Это усреднение также уменьшает разброс измеренных интенсивностей [25]. Среднее значение первых трех изображений использовалось в качестве эталонного изображения. После коррекции фона был рассчитан профиль средней интенсивности по глубине образца для эталонных и зависимых от времени изображений.

$$I_{\text{скорректированное изображение}} = \frac{I_{\text{необработанное изображение}} - I_{\text{закрытый пучок}}}{I_{\text{открытый пучок}} - I_{\text{закрытый пучок}}} \quad (3)$$

### Результаты и обсуждение

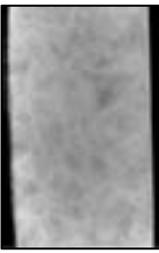
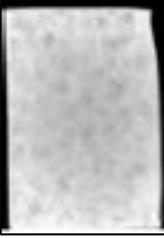
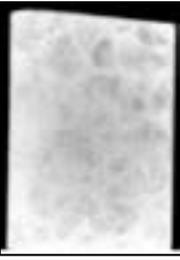
Полученные нейтронографические снимки для всех образцов показаны в таблице 3. На полученных снимках отчетливо видна внутренняя структура образцов. Во всех образцах отсутствуют трещины и пустоты диаметром более 1 мм.

Определены средние линейные коэффициенты ослабления нейтронного излучения для всех образцов, которые составили:

Образец №1 -  $\mu_{\text{ср}} = (0,300 \pm 0,030) \text{ см}^{-1}$ ;  
 Образец №2 -  $\mu_{\text{ср}} = (0,314 \pm 0,033) \text{ см}^{-1}$ ;  
 Образец №3 -  $\mu_{\text{ср}} = (0,318 \pm 0,030) \text{ см}^{-1}$ ;  
 Образец №4 -  $\mu_{\text{ср}} = (0,318 \pm 0,030) \text{ см}^{-1}$ ;  
 Образец №5 -  $\mu_{\text{ср}} = (0,328 \pm 0,031) \text{ см}^{-1}$ .

Образец №1 имеет наименьший линейный коэффициент ослабления нейтронного излучения, что соответствует его внутренней структуре, так как у данного образца в средней части имеется большое количество наполнителя с относительно большой фракцией.

Таблица 3 – Нейтронные снимки образцов

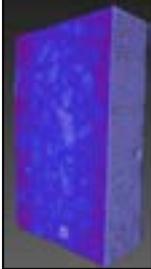
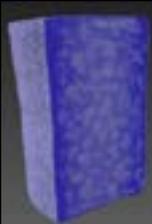
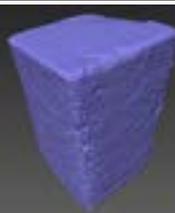
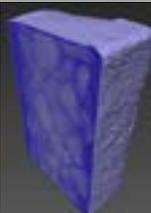
№	Фотография (вид спереди)	Нейтронный снимок (вид спереди)	Фотография (вид сбоку)	Нейтронный снимок (вид сбоку)
Образец №1				
Образец №2				
Образец №3				
Образец №4				
Образец №5				

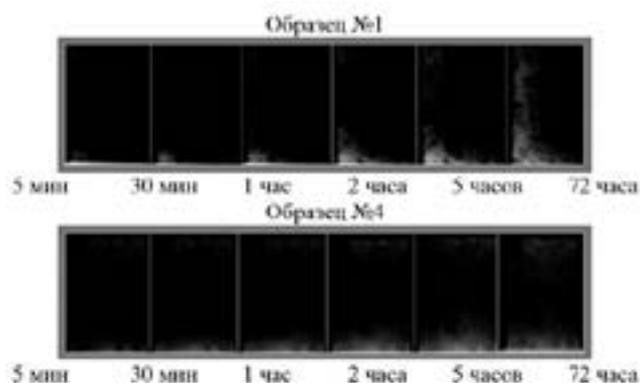
Восстановленные томографические снимки представлены в таблице 4. Следует отметить, что томография проведена только для трех образцов.

Результаты экспериментов с изучением проникновения воды сквозь образец показаны на

рисунке 3. Образец №1 и №4 были помещены в резервуар с водой глубиной ~6 мм после чего периодически снимались нейтронные изображения. На основе полученных снимков была получена визуализация скорости распространения воды по высоте образца.

**Таблица 4** – Восстановленные томографические изображения образцов и их линейные коэффициенты ослабления нейтронного излучения

№	Восстановленное томографическое изображение	Разрез изображения с одной стороны	Разрез изображения со второй стороны	Уточненное значение линейного коэффициента ослабления для бетона, см <sup>-1</sup>	Значение линейного коэффициента ослабления для цементного камня, см <sup>-1</sup>	Значение линейного коэффициента ослабления для заполнителя, см <sup>-1</sup>
Образец №1				0,296±0,068	0,478±0,068	0,250±0,046
Образец №2				0,319±0,068	0,432±0,046	0,250±0,046
Образец №4				0,341±0,068	0,432±0,046	0,250±0,046



**Рисунок 3** – Визуализация скорости распространения воды

## Выводы

В результате проведенных исследований неразрушающим методом нейтронной радиографии и томографии были изучены образцы бетона трёх разных видов марок.

Исследования показали, что разница линейных коэффициентов ослабления нейтронного излучения для рассмотренных образцов не превышает 10%. По всей видимости, это отличие связано с разным водоцементным соотношением и размерами фракции наполнителя в образцах.

Внутренняя структура образца №1 не равномерна по объему. По краям образца превалирует водоцементная фракция, а в центре –

наполнитель в виде каменной фракции. У остальных образцов распределение составляющих бетона более равномерно.

Также можно отметить, что образец №1 имеет большую скорость проникновения воды по высоте бетона, что говорит о его большей пористости. Скорость миграции воды по высоте образца составила 1.4 мм/ч.

## Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность экспериментальной группе, участвовавшей в проведении данных работ, а также персоналу реактора ВВР-К за помощь в проведении экспериментов.

## Литература

- 1 Taylor H.F.W. Cement chemistry, 2nd edition. – London: Thomas Telford, 1997.
- 2 Kichanov S.E., Nazarov K.M., Kozlenko D.P., Balasoiu M., Nicu M., Ionascu L., Dragolici A.C., Dragolici F. and Savenko B.N. Neutron tomography studies of cement-based materials used for radioactive waste conditioning // Romanian Journal of Physics - 2019. - Vol.64. - P.1-2.
- 3 Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами. IAEA-TCS-27, ISSN 1018–5518. – Вена: МАГАТЭ, 2005.
- 4 Zhang P., Wittmann F.H., Lura P., Müller H.S., Han S. and Zhao T. Application of neutron imaging to investigate fundamental aspects of durability of cement-based materials: A review // Cement and Concrete Research - 2018. - Vol.108. - P.152-166.
- 5 Szilágyi V., Gméling K., Kis Z., Harsányi I. and Szentmiklósi L. Neutron-based methods for the development of concrete // Brittle Matrix Composites 12 - Proceedings of the 12th International Symposium on Brittle Matrix Composites - 2019. - Vol.. - P.183-193.
- 6 Kim H., Razakamandimby R., D.F.T., Szilágyi V., Kis Z., Szentmiklósi L., Glinicki M.A. and Park, K. Reconstruction of concrete microstructure using complementarity of X-ray and neutron tomography // Cement and Concrete Research - 2021. - Vol.148.
- 7 Salák M., Khmurovska Y. & Štemberk P. Application of imaging techniques and image analysis to concrete samples // AIP Conference Proc. 2322, 020033 - 2021.
- 8 Seki Y., Taketani A., Hashiguchi T., Wang S., Mizuta M., Wakabayashi Y., Otake Y., Yamagata Y., Baba H., Kino K., Hirota K. and Tanaka, S. Fast neutron transmission imaging of the interior of large-scale concrete structures using a newly developed pixel-type detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment - 2017. - Vol.870. - P.148-155.
- 9 Cheikh Sleiman H., Tengattini A., Briffaut M., Huet B. and Dal Pont S. Simultaneous x-ray and neutron 4D tomographic study of drying-driven hydro-mechanical behavior of cement-based materials at moderate temperatures // Cement and Concrete Research - 2021. - Vol.147.
- 10 Ikeda Y., Otake Y. and Mizuta M. Nondestructive measurement for water and voids in concrete with compact neutron source // Plasma and Fusion Research, - 2018. - Vol.13.
- 11 Tremsin A.S., Shinohara T., Oikawa K., Li J. and Monteiro, P.J.M. Non-destructive mapping of water distribution through white-beam and energy-resolved neutron imaging // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment - 2019. - Vol.927. - P.174-183.
- 12 ГОСТ 7473-94: "Смеси бетонные. Технические условия".
- 13 ГОСТ 27006-86: "Бетоны. Правила подбора состава".
- 14 Kardjilov N., Manke I., Hilger A., Strobl M. and Banhart J. Neutron imaging in materials science // Materials science. - 2011. - Vol.14. - P.248-256.
- 15 Raventosa M., Hartia R.P, Lehmann E. and Grünzwei C. A method for neutron scattering quantification and correction applied to neutron imaging // Physics Procedia - 2017. - Vol.88. - P.275 – 281.
- 16 Nazarov K.M., Mukhametuly B., Kichanov S.E., Zholdybayev T.K., Shaimerdenov A., Karakozov K.B., Dyussambayev D.S., Aitkulov M.T., Yerdauletov M., Napol'skiy P., Kenessarin M., Kalymkhan E.K., Imamverdiyev N.A. and Jabarov, S.H. Non-destructive analysis of materials by neutron imaging at the TITAN facility // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials - 2021. - Vol.5. - P.6-14.
- 17 Nazarov K.M., Muhametuly B., Kenzhin E.A., Kichano, S.E., Kozlenko D.P., Lukin E.V. & Shaimerdenov A.A. New neutron radiography and tomography facility TITAN at the WWR-K reactor // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment - 2020. - Vol.982.

- 18 Muhametuly B., Kichanov S.E., Kenzhin E.A., Kozlenko D.P., Nazarov K.M., Shaimerdenov A.A., Bazarbaev E. & Lukin E.V. Concept of a Facility of Neutron Radiography and Tomography at the Research Reactor WWR-K in Almaty, Kazakhstan // *Journal of Surface Investigation* - 2019. - Vol.13. - P.877-879.
- 19 Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin S.K., Chakrov P.V. & Kenzhin Y.A. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // *Physics of Atomic Nuclei* - 2018. - Vol.81. - P.1408-1411.
- 20 Bauyrzhan A.B., Koltchnik S.N., Aitkulov M.T., Dyussambayev D.S., Shaimerdenov A.A., Mukhametuly B. & Burtebaev N.T. Neutron-physical parameters at the outlet of the WWR-K reactor beam tube // *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials* - 2019. - Vol.3(10). - P.219-225.
- 21 Schneider C.A., Rasband W.S. & Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // *Nature Methods* - 2012. - Vol.9. - P.671-675.
- 22 Moradillo M.K., Qiao C., Isgor B., Reese S. & Weiss W.J. Relating formation factor of concrete to water absorption // *ACI Materials Journal* - 2018. - Vol.115. - P.887-898.
- 23 Kang M., Bilheux H.Z., Voisin S., Cheng C.L., Perfect E., Horita J. & Warren J.M. Water calibration measurements for neutron radiography: Application to water content quantification in porous media // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* - 2013. - Vol.708. - P.24-31.
- 24 Hussey D. S., Spornjak D., Weber A. Z., Mukundan R., Fairweather J., Brosha E. L., Borup R.L. Accurate measurement of the through-plane water content of proton-exchange membranes using neutron radiography // *Journal of Applied Physics* - 2012. - Vol.112.
- 25 Weiss J., Geiker M.R. & Hansen K.K. Using X-ray transmission/attenuation to quantify fluid absorption in cracked concrete // *International Journal of Materials and Structural Integrity* - 2015. - Vol.9(10). - P.3-20.

### References

- 1 H.F.W. Taylor *Cement chemistry*, 2nd edition (London: Thomas Telford, 1997).
- 2 S.E. Kichanov, K.M. Nazarov, D.P. Kozlenko, M. Balasoiu, M. Nicu, L. Ionascu, A.C. Dragolici, F. Dragolici and B. N. Savenko, *Romanian Journal of Physics* 64, 1-2 (2019).
- 3 Tekhnologicheskie i organizacionnye aspekty obrashcheniya s radioaktivnymi otdodami. IAEA-TCS-27, ISSN 1018–5518 (Vienna: IAEA, 2005) (in Russ.).
- 4 P. Zhang, F.H. Wittmann, P. Lura, H.S. Müller S. Han, and T. Zhao, *Cement and Concrete Research* 108, 152-166 (2018).
- 5 V. Szilágyi, K. Gméling, Z. Kis, I. Harsányi, and L. Szentmiklósi, *Proc. of the 12th Int. Symposium on Brittle Matrix Composites* 12, 183-193 (2019).
- 6 H. Kim, D.F.T. Razakamandimby R., V. Szilágyi, Z. Kis, L. Szentmiklósi, M.A. Glinicki and K. Park, *Cement and Concrete Research* 148, (2021).
- 7 M. Salák, Y. Khmurovska and P. Štemberk, *AIP Conf. Proc.* 2322, 020033 (2021).
- 8 Y. Seki, A. Taketani, T. Hashiguchi, S. Wang, M. Mizuta, Y. Wakabayashi, Y. Otake, Y. Yamagata, H. Baba, K. Kino, K. Hirota and S. Tanaka, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 870, 148-155 (2017).
- 9 H. Cheikh Sleiman, A. Tengattini, M. Briffaut, B. Huet & S. Dal Pont, *Cement and Concrete Research*, 147 (2021).
- 10 Y. Ikeda, Y. Otake and M. Mizuta, *Plasma and Fusion Research*, 13 (2018).
- 11 A.S. Tremsin, T. Shinohara, K. Oikawa, J. Li and P.J.M. Monteiro, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 927, 174-183 (2019).
- 12 GOST 7473-94: "Smesi betonnye. Tekhnicheskie usloviya". (in Russ.).
- 13 GOST 27006-86: "Betony. Pravila podbora sostava". (in Russ.).
- 14 N. Kardjilov, I. Manke, A. Hilger, M. Strobl and J. Banhart, *Materials science*. 14, 248-256 (2011).
- 15 M. Raventosa, R.P. Hartia, E. Lehmann and C. Grünzwei, *Physics Procedia* 88, 275 – 281 (2017).
- 16 K.M. Nazarov, B. Mukhametuly, S.E. Kichanov, T.K. Zholdybayev, A. Shaimerdenov, K.B. Karakozov, D.S. Dyussambayev, M.T. Aitkulov, M. Yerdauletov, P. Napolskiy, M. Kenessarin, E.K. Kalymkhan, N.A. Imamverdiyev and S.H. Jabarov, *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials* 5, 6-14 (2021).
- 17 K.M. Nazarov, B. Muhametuly, E.A. Kenzhin, S.E. Kichanov, D.P. Kozlenko, E.V. Lukin and A.A. Shaimerdenov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 982 (2020).
- 18 B. Muhametuly, S.E. Kichanov, E.A. Kenzhin, D.P. Kozlenko, K.M. Nazarov, A.A. Shaimerdenov, E. Bazarbaev and E.V. Lukin, *Journal of Surface Investigation* 13, 877-879 (2019).
- 19 A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, F.M. Arinkin, S.K. Gizatulin, P.V. Chakrov and Y.A. Kenzhin, *Physics of Atomic Nuclei* 81, 1408-1411 (2018).
- 20 A.B. Bauyrzhan, S.N. Koltchnik, M.T. Aitkulov, D.S. Dyussambayev, A.A. Shaimerdenov, B. Mukhametuly and N.T. Burtebaev, *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials* 3(10), 219-225 (2019).
- 21 C.A. Schneider, W.S. Rasband and K.W. Eliceiri, *Nature Methods* 9, 671-675 (2012).
- 22 M.K. Moradillo, C. Qiao, B. Isgor, S. Reese and W.J. Weiss, *ACI Materials Journal* 115, 887-898 (2018).
- 23 M. Kang, H.Z. Bilheux, S. Voisin, C.L. Cheng, E. Perfect, J. Horita and J.M. Warren, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 708, 24-31 (2013).
- 24 D.S. Hussey, D. Spornjak, A.Z. Weber, R. Mukundan, J. Fairweather, E.L. Brosha and R. L. Borup, *Journal of Applied Physics* 112 (2012).
- 25 J. Weiss, M.R. Geiker and K.K. Hansen, *International Journal of Materials and Structural Integrity* 9(10), 3-20 (2015).