

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-4.366>

УДК 614.841.34:666.97.033.17::624.012.35

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕВА ЦЕНТРИФУГИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА ПО СЕЧЕНИЮ

Нехань Д.С., Жамойдик С.М., Полевода И.И.

*Цель.* Определить температурное поле центрифугированной железобетонной колонны, подверженной воздействию стандартного температурного режима пожара по всему наружному периметру.

*Методы.* Компьютерное моделирование, в основе которого лежат результаты экспериментальных и теоретических исследований физических и теплофизических свойств центрифугированного бетона. Инженерные теплотехнические расчеты согласно действующим ТНПА.

*Результаты.* Разработана расчетная компьютерная модель для исследования теплообмена центрифугированной железобетонной колонны с газовой средой пожара. Определено температурное поле центрифугированной железобетонной конструкции кольцевого сечения, подвергшейся всестороннему воздействию стандартного температурного режима пожара, в заданный момент времени. Проведено сравнение результатов моделирования с данными, полученными в ходе расчета с помощью инженерных методов согласно действующим ТНПА.

*Область применения исследований.* Результаты исследования могут быть использованы при определении пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных конструкций. Полученные с помощью теоретических исследований данные планируются в дальнейшем сопоставить с экспериментальными.

*Ключевые слова:* огнестойкость, стандартный температурный режим пожара, центрифугированные железобетонные конструкции, относительная толщина, компьютерное моделирование, температурное поле, анизотропность, теплотехнический расчет, Ansys Workbench.

(Поступила в редакцию 17 сентября 2019 г.)

**Введение.** «Умение оценивать и прогнозировать поведение конструкций и зданий при пожаре, проводить расчеты прочности и устойчивости зданий при огневом воздействии, предлагать эффективные способы повышения устойчивости объектов при пожаре является обязательным для проектировщиков, строителей и специалистов служб эксплуатации. Однако в первую очередь это входит в прямые обязанности специалистов по обеспечению пожарной безопасности различных объектов», – такое высказывание В.М. Ройтмана актуально и по сегодняшний день, когда в строительство внедряются современные конструкции, изготовленные по новейшим и прогрессивным технологиям. Получивший широкое применение метод центрифугирования при производстве строительных конструкций не является исключением.

Изготовленные данным методом конструкции в строительстве зачастую используются в качестве сжато-изгибаемых элементов. Центрифугированные железобетонные колонны внедрены на объектах различного класса по функциональной и пожарной опасности как в нашей стране (производственное здание объединения «Горизонт», здание специального конструкторского бюро НПО «Гранат» (сейчас бизнес-центр Sky Towers), гараж-стоянка скорой медицинской помощи на 500 автомобилей (сейчас паркинг многофункционального комплекса «Колизей»), производственный корпус фабрики цветной печати в г. Минске и др.) [1], так в ближнем и дальнем зарубежье (Allianz Arena, Theater Erfurt,

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Большая мечеть в Алжире, Рейхстаг, Воронежский инженерно-лабораторный комплекс, Neue Messe в Лейпциге)<sup>1,2,3</sup>.

Одним из этапов оценки огнестойкости является проведение теплотехнического расчета, а равно решение задачи нестационарной теплопроводности. Данная задача сводится к определению температурного поля конструкции вследствие огневого воздействия в заданный момент времени. При оценке огнестойкости строительных конструкций по действующим ТНПА<sup>4,5,6,7</sup> предполагается воздействие на них огневого воздействия, в частности стандартного температурного режима пожара, характеризуемого следующей зависимостью:

$$\theta_f = \theta_{f0} + 345 \cdot \lg(8\tau + 1), \quad (1)$$

где  $\theta_{f0}$  – температура среды в начальный момент времени, °С;  $\tau$  – время развития пожара, мин; 8 – коэффициент, мин<sup>-1</sup>.

Пределы огнестойкости строительных конструкций задаются согласно признанным проектным решениям (по табличным данным или результатам испытаний) или на основании проведенных расчетов.

Согласно ТКП EN 1991-1-2-2009 и ТКП 45-2.02-110-2008 выделяются упрощенный и общий методы расчета. В основе первого метода лежит решение дифференциального уравнения теплопроводности для изотропных тел. Конструкциям, изготовленным методом центрифугирования, присуща анизотропность структуры, выражающаяся в изменчивости по сечению физико-механических и теплофизических характеристик в начальных условиях [2–5] и при повышении температуры [5, 6]. Поэтому использование данного метода для определения предела огнестойкости рассматриваемых конструкций некорректно.

Определение температурного поля для анизотропных тел в заданный момент времени возможно с использованием общего метода расчета, основывающегося на признанных принципах и допущениях теории теплообмена<sup>8</sup>. В основе метода лежит решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье при нелинейных граничных условиях и сложном процессе тепло- и массопереноса. При этом учитываются изменение по сечению теплотехнических свойств материалов, в том числе при их нагреве<sup>9</sup>, тепловые потоки конвекцией и излучением<sup>10</sup>.

<sup>1</sup> Пастушков, Г.П. Многоэтажные каркасные здания с несущими железобетонными центрифугированными элементами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01; 05.23.05 / Г.П. Пастушков. – Минск, 2004. – 487 л.

<sup>2</sup> SPUN CONCRETE. Benefits BUILDINGS & SECURITY [Электронный ресурс] / Euro poles – Mehr als 120 Jahre Erfahrung im Mastbau. – Режим доступа: [https://www.europoles.com/fileadmin/user\\_upload/09-downloads/product-information-europoles-columns-benefits-spun-concrete.pdf](https://www.europoles.com/fileadmin/user_upload/09-downloads/product-information-europoles-columns-benefits-spun-concrete.pdf) – Дата доступа: 22.08.2019.

<sup>3</sup> Shleuderbeton.de – Information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://schleuderbeton.de/beispiele.htm>. – Дата доступа: 22.08.2019.

<sup>4</sup> Воздействия на конструкции. Ч. 1–2. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250). Еврокод 1. – Введ. 01.01.10. – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 42 с.

<sup>5</sup> Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Введ. 01.01.09 (с отменой на территории РБ П1-02 к СНБ 2.02.01-98). – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 135 с.

<sup>6</sup> Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-78. – Взамен СТ СЭВ 1000-78; введ. 01.01.1996. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 11 с.

<sup>7</sup> Здания и фрагменты зданий. Метод натуральных огневых испытаний. Общие требования: ГОСТ Р 53309-2009. – Введ. впервые; введ. 01.01.2010. – М.: Стандартинформ, 2009. – 10 с.

<sup>8</sup> См. сн. 4.

<sup>9</sup> См. сн. 5.

<sup>10</sup> Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1–2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250). Еврокод 2. – Введ. 01.01.10. – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 96 с

Наиболее точно прогрев железобетонных конструкций определяется конечно-разностным или конечно-элементным расчетом с использованием ЭВМ. Одной из платформ для решения указанных задач является Ansys Workbench. Опыт ее применения [7, 8] показывает, что она успешно справляется с данного рода задачами при помощи модуля Transient Thermal, снижая трудоемкость и повышая эффективность прогнозирования и оценки состояния бетонных и железобетонных конструкций. Поэтому для решения поставленной задачи была использована именно эта платформа.

**Основная часть.** На сегодняшний день в Республике Беларусь производство центрифугированных железобетонных элементов осуществляется на ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций». Имеющиеся на заводе технологии позволяют изготавливать методом центрифугирования железобетонные элементы кольцевого сечения длиной до 22,2 м, наружным диаметром 560 мм, толщиной 55 мм, имеющие 7 равномерно распределенных по окружности арматурных стержней диаметром 12 мм с толщиной защитного слоя 20 мм (рис. 1). Плотность бетона конструкции в целом составляет  $2500 \text{ кг/м}^3$  при весовой влажности 2,2 %. В настоящей работе рассматривается прогрев такого изделия.

С целью учета неоднородности поперечное сечение конструкции в первом приближении было представлено как пять примыкающих друг к другу колец одинаковой толщины (11 мм) (рис. 2), каждое из которых имеет свои теплофизические характеристики.



Рисунок 1. – Моделируемая центрифугированная железобетонная колонна

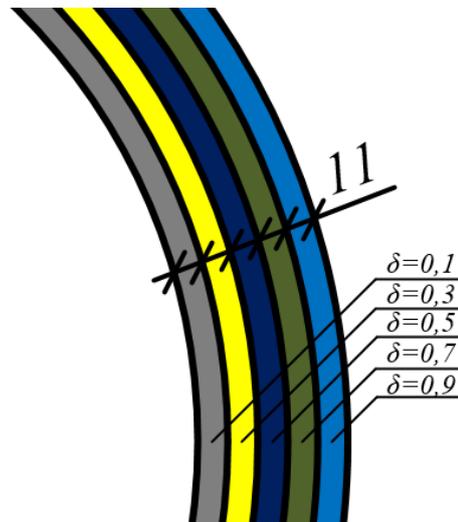


Рисунок 2. – Фрагмент сечения моделируемой колонны (части колец с соответствующими относительными толщинами конструкции  $\delta$  0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9)

Плотность, коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости каждого кольца определяли исходя из результатов работы [5]. При этом приняли, что скорость изменения коэффициентов теплопроводности с ростом температуры совпадала со скоростью изменения средней величины между нижним и верхним предельными значениями коэффициента теплопроводности согласно ТКП EN 1992-1-2-2009<sup>11</sup> [5]:

$$\lambda(\theta, \delta) = \lambda_0(\delta) - (1,91 \cdot 10^{-3} \theta - 8,10 \cdot 10^{-7} \theta^2), \quad (2)$$

где  $\lambda_0(\delta)$  – теплопроводность бетона заданного слоя в начальных условиях (по формуле В.П. Некрасова), Вт/м·°С.

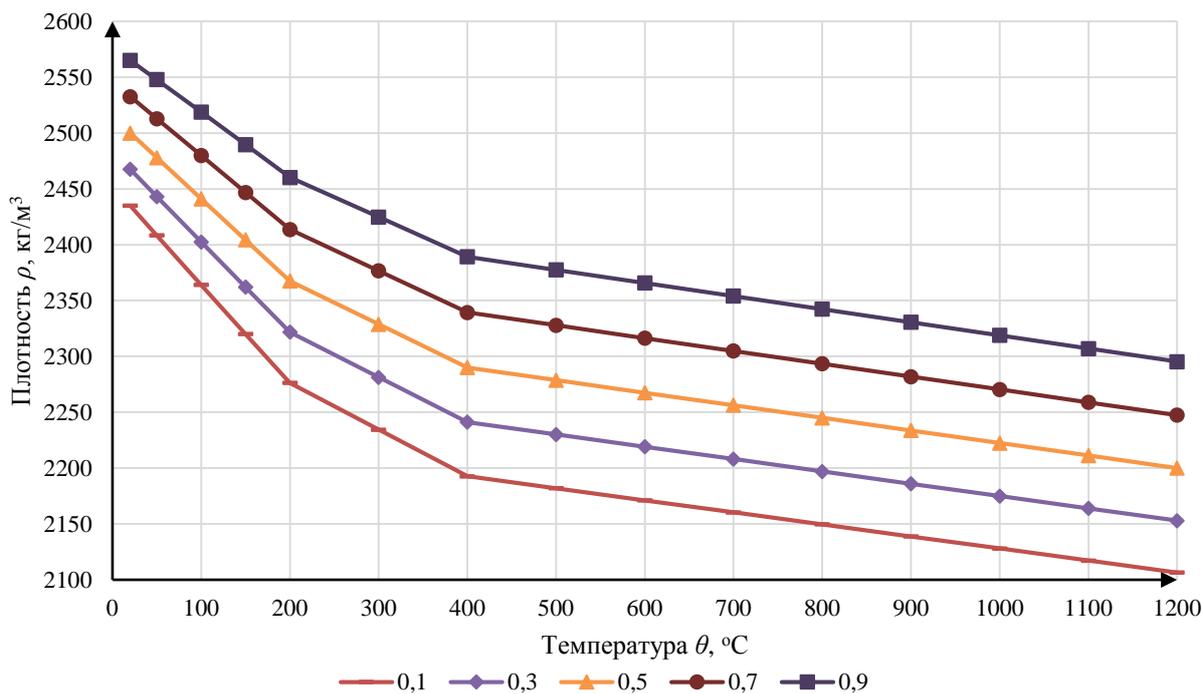
Полученные значения данных характеристик приведены в таблице 1 (рис. 3–5).

<sup>11</sup> Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250). Еврокод 2. – Введ. 01.01.10. – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 96 с.

**Таблица 1. – Теплофизические характеристики колец, составляющих моделируемую конструкцию**

№ кольца	Относительная толщина $\delta$	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> / коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·°C / коэффициент удельной теплоемкости $c_p$ , Дж/кг·°C, при температуре										
		20 °C	100 °C	100,01 °C*	115 °C	200 °C	300 °C	400 °C	600 °C	800 °C	1000 °C	1200 °C
1	0,1	2435	2364	2364	2351	2276	2234	2193	2171	2150	2128	2107
		1,175	1,027	1,027	1,001	0,857	0,703	0,566	0,339	0,178	0,081	0,049
		900	900	2029	2029	1000	1050	1100	1100	1100	1100	1100
2	0,3	2468	2402	2402	2390	2322	2281	2241	2219	2197	2175	2153
		1,192	1,045	1,045	1,018	0,875	0,721	0,583	0,357	0,195	0,098	0,066
		900	900	1927	1927	1000	1050	1100	1100	1100	1100	1100
3	0,5	2500	2441	2441	2430	2368	2329	2290	2268	2245	2223	2200
		1,210	1,062	1,062	1,036	0,892	0,739	0,601	0,375	0,213	0,116	0,084
		900	900	1803	1803	1000	1050	1100	1100	1100	1100	1100
4	0,7	2533	2480	2480	2470	2414	2377	2339	2316	2293	2270	2247
		1,227	1,080	1,080	1,053	0,910	0,756	0,619	0,392	0,230	0,134	0,101
		900	900	1693	1693	1000	1050	1100	1100	1100	1100	1100
5	0,9	2565	2519	2519	2510	2460	2425	2389	2366	2342	2319	2295
		1,245	1,097	1,097	1,071	0,927	0,774	0,636	0,410	0,248	0,151	0,119
		900	900	1598	1598	1000	1050	1100	1100	1100	1100	1100

Примечание. \* – значение принято с целью возможности учесть в исходных данных для моделирования в среде Ansys Workbench скачок удельной теплоемкости при фазовом переходе воды.



**Рисунок 3. – Зависимость плотности центрифугированного бетона от температуры для относительных толщин конструкции 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9**

Сравнивая рисунки 3–5 с рисунками 5, 6, 8 из работы [5], можно сделать вывод, что при увеличении толщины формируемого на центрифуге изделия наблюдается более высокий разброс теплофизических характеристик по сечению не только в начальных условиях [2, 4], но и при повышении температуры, что вполне объяснимо снижением однородности по сечению и формированием соответствующей ярко выраженной раздельной структуры [2, 6].

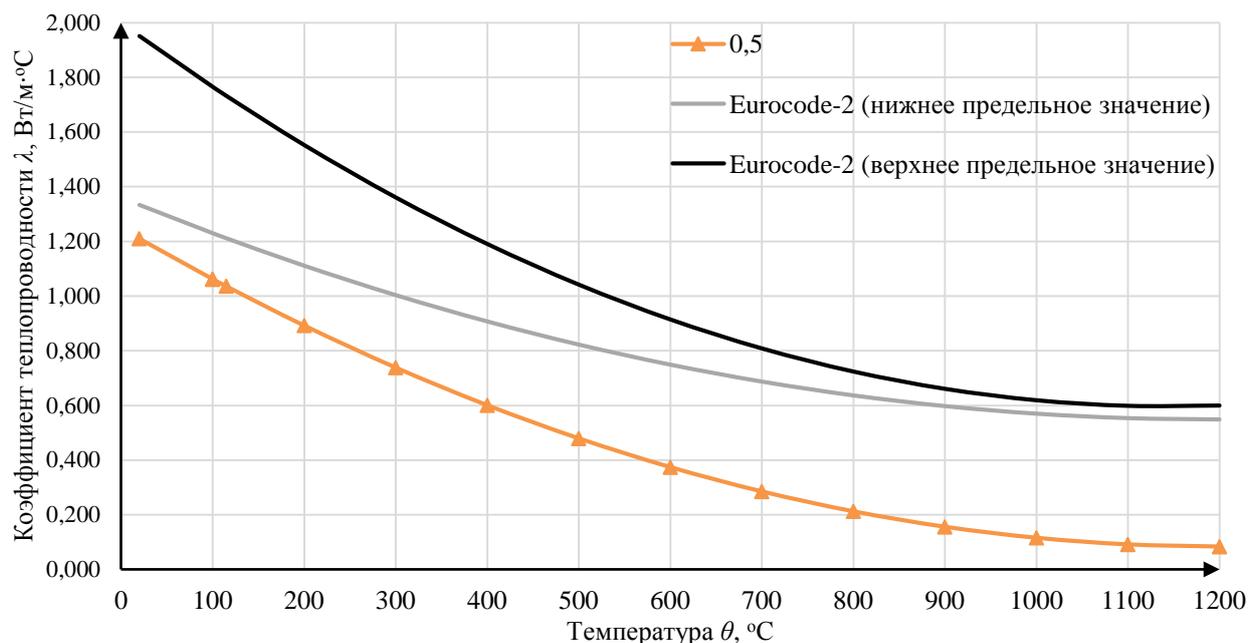


Рисунок 4. – Зависимость коэффициента теплопроводности центрифугированного бетона от температуры для относительной толщины конструкции 0,5

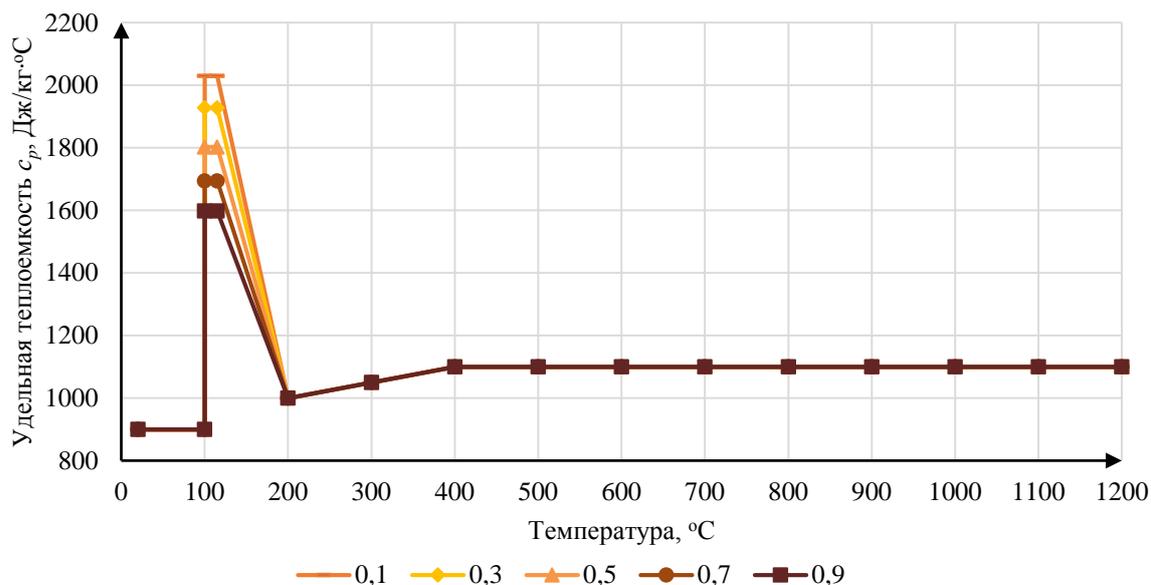


Рисунок 5. – Зависимость коэффициента удельной теплоемкости центрифугированного бетона от температуры для относительных толщин конструкции 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9

**Моделирование прогрева колонны.** Задача моделирования на данном этапе состояла в получении температурного поля в заданный момент времени с учетом принятых теплотехнических свойств центрифугированного бетона. Теплофизические характеристики для стали заданы из ТКП EN 1993-1-2-2009<sup>12</sup>.

Для определения прогрева конструкции были заданы следующие начальные и граничные условия.

**Начальные условия.** Температура окружающего воздуха и конструкции в начальный момент времени одинаковы:

<sup>12</sup> Проектирование стальных конструкций. Ч. 1–2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1993-1-2-2009 (02250). Еврокод 3. – Введ. 01.01.10. – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 80 с.

$$\theta_{f0} = \theta_{w0} = \theta_f(x, y, z, 0) = \theta_w(x, y, z, 0) = 20^\circ \text{C}. \quad (3)$$

**Граничные условия:**

1. Температура греющей среды изменяется по формуле (1).
2. Поперечное сечение конструкции подвергается тепловому воздействию равномерно по наружному периметру. Расчетная схема нагрева показана на рисунке 6.

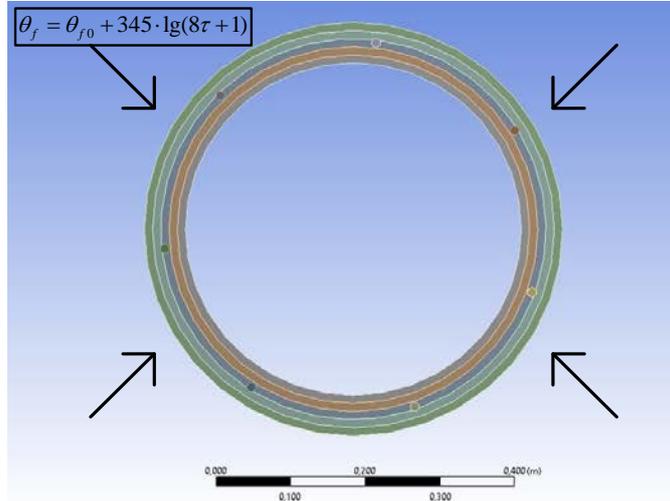


Рисунок 6. – Расчетная схема нагрева центрифугированной железобетонной колонны кольцевого сечения

3. Результирующий тепловой поток  $q_{net}$ , Вт/м<sup>2</sup> на обогреваемую при пожаре конструкцию определялся посредством теплообмена конвекцией и излучением<sup>13</sup>. Способ нагрева наружной поверхности конструкции, а также отвод теплоты от внутренней поверхности к газовой среде полости задавали через граничные условия 3-го рода:

$$q_{net} = \alpha(\theta_f - \theta_w) = (\alpha_c + \alpha_r)(\theta_f - \theta_w) =$$

$$= \left[ \alpha_c + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma (\theta_f^2 + \theta_w^2) (\theta_f + \theta_w) \right] (\theta_f - \theta_w) = -\lambda \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_w, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·°C;

$\theta_f$  – температура газовой среды, К;

$\theta_w$  – температура поверхности конструкции, К;

$\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией (для наружной поверхности принят<sup>14</sup> 25 Вт/м<sup>2</sup>·°C, для внутренней поверхности через критерии подобия при средней разности температур 160 °C с учетом наличия в полости при пожаре водяного пара [9] равен 0,62 Вт/м<sup>2</sup>·°C);

$\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи излучением (для внутренней поверхности не учитывался ввиду равномерного прогрева по периметру);

$\Phi$  – угловой коэффициент облученности, принят<sup>15</sup> равным 1,0;

$\varepsilon_m$  – степень черноты поверхности конструкции, для бетона принята<sup>16</sup> равной 0,7;

$\varepsilon_f$  – степень черноты пламени, принята<sup>17</sup> равной 1,0;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К – постоянная Стефана–Больцмана.

3. Контактные взаимодействия  $i$ -того слоя бетона с  $i+1$  слоем, а также арматуры с бетоном описываются граничными условиями 4-го рода:

<sup>13</sup> См. сн. 4.

<sup>14</sup> Там же.

<sup>15</sup> Там же.

<sup>16</sup> См. сн. 10.

<sup>17</sup> См. сн. 4.

$$\theta_{b_i}(\tau) = [\theta_{b_{i+1}}(\tau)]_{b_i}; \quad \theta_b(\tau) = [\theta_s(\tau)]_b \quad (5)$$

или

$$\lambda_{b_i} \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{b_i} = \lambda_{b_{i+1}} \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{b_{i+1}}; \quad \lambda_b \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_b = \lambda_s \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_s, \quad (6)$$

где индексы  $b$  и  $s$  относятся соответственно к бетону и арматуре.

Внутренние источники теплоты в структуре железобетона учтены скачком значений коэффициента удельной теплоемкости в интервале температур 100–115 °С в зависимости от влажности слоя. В данном интервале происходит уменьшение скорости прогрета за счет поглощения теплоты физической водой, находящейся в порах бетона, и ее интенсивного испарения.

С целью недопущения существенных погрешностей в расчетах размер ячейки бетона и арматуры в первом приближении принят 2,2 мм.

**Результаты моделирования.** В результате проведенного моделирования было получено температурное поле в поперечном сечении колонны в заданный момент времени (рис. 7).

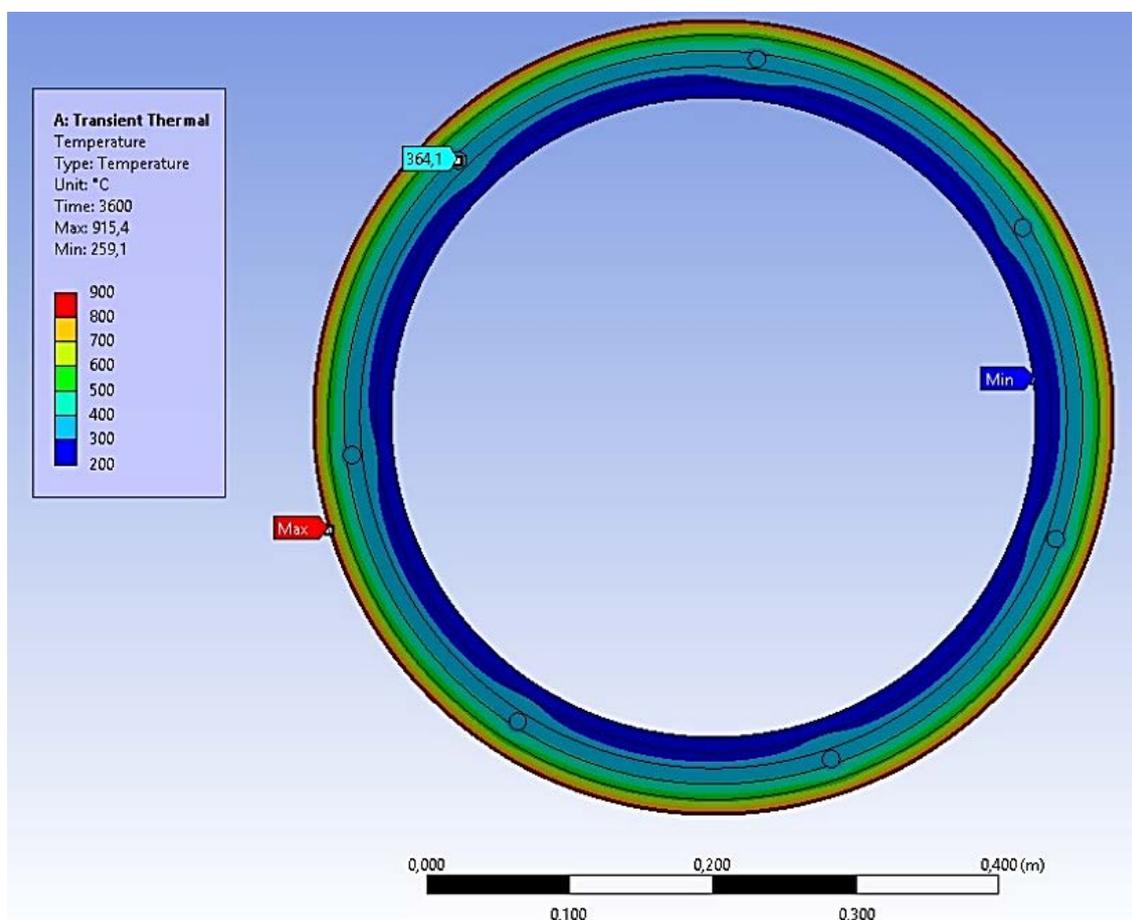


Рисунок 7. – Температурное поле поперечного сечения центрифугированной железобетонной колонны кольцевого сечения толщиной 55 мм в среде Ansys Workbench

На рисунке 8 представлены кривые, показывающие изменение температуры по сечению конструкции при времени нагрева, соответствующему ряду цифровых показателей в обозначении предела огнестойкости<sup>18</sup> (15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240 мин).

<sup>18</sup> См. сн. 6.

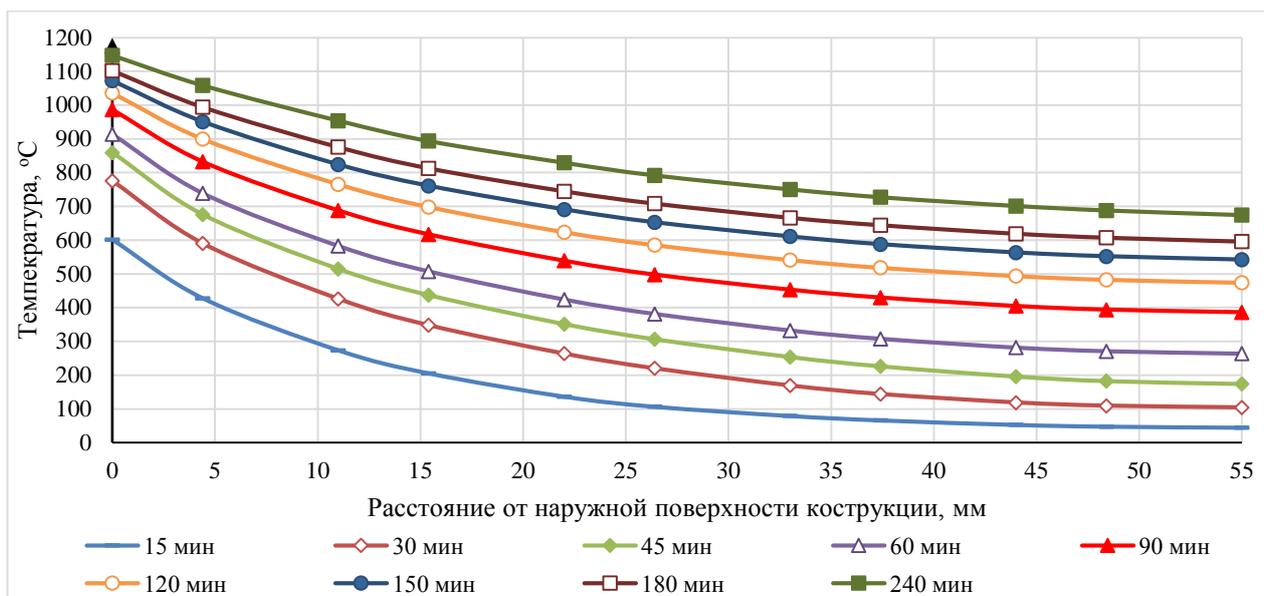


Рисунок 8. – Распределение температуры по сечению центрифугированной железобетонной колонны кольцевого сечения толщиной 55 мм в заданный момент времени стандартного огневого воздействия (моделирование в Ansys Workbench)

Анализ температурных полей конструкции показывает, что уже на начальном этапе наблюдается значительное нарастание градиента температур по сечению. После 15 и 30 мин стандартного огневого воздействия разница в температуре между наружной и внутренней поверхностью достигает 557 и 671 °C соответственно, после чего наблюдается ее экстремум (около 690 °C) и дальнейшее плавное снижение после 45 мин огневого воздействия.

Средняя температура арматурных стержней составила: при 15 мин – 105 °C; при 30 мин – 211 °C; при 45 мин – 298 °C; при 60 мин – 375 °C; при 90 мин – 492 °C; при 120 мин – 577 °C; при 150 мин – 644 °C; при 180 мин – 697 °C; при 240 мин – 770 °C.

Результаты моделирования были сравнены с решением теплотехнической задачи по инженерной методике в соответствии с ТКП 45-2.02-110-2008. Кривые, показывающие изменение температуры в сечении конструкции, приведены на рисунке 9.

Характер изменения градиента температуры схож с результатами моделирования. Вместе с тем пик градиента приходится на интервал 30–45 мин и составляет не более 650 °C, а скорость его снижения после достижения максимума несколько выше (рис. 10).

Температура арматурных стержней составила: при 15 мин – 85 °C; при 30 мин – 280 °C; при 45 мин – 407 °C; при 60 мин – 495 °C; при 90 мин – 611 °C; при 120 мин – 686 °C; при 150 мин – 740 °C; при 180 мин – 781 °C; при 240 мин – 840 °C.

Из сравнения результатов моделирования (рис. 8) и расчетов согласно действующим ТНПА (рис. 9) видно: прогрев рассматриваемой строительной конструкции со свойствами бетона, полученными по результатам лабораторных и теоретических исследований [5], является более жестким, с большим градиентом температур по сечению, чем по результатам расчета в соответствии с ТКП 45-2.02-110-2008. При этом результаты прогрева арматуры имеют противоположный характер.

Следует отметить: часть теплоты, проходя сквозь стенку конструкции, будет нагревать газовую среду внутренней полости колонны, что при моделировании и расчете учитывалось путем введения некоторых допущений. Вместе с тем значение суммарного коэффициента теплоотдачи между внутренней поверхностью и газовой средой полости возможно будет рассчитать, измерив температуру газовой среды полости и внутренней поверхности конструкции при проведении эксперимента.

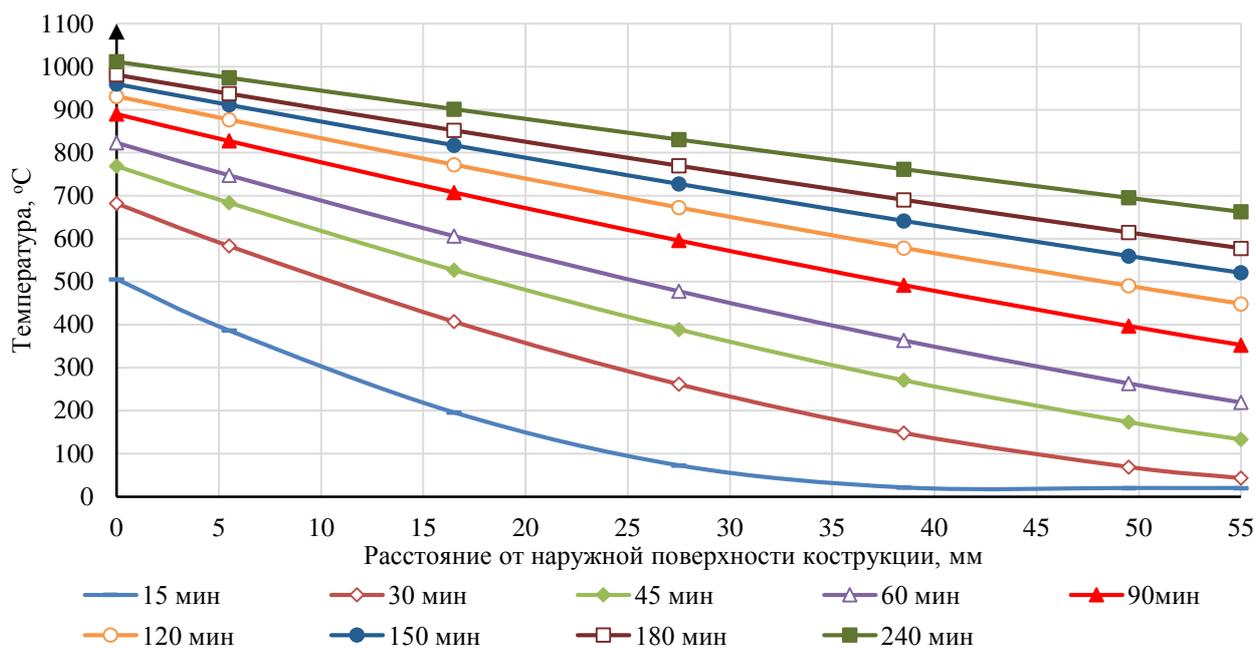


Рисунок 9. – Распределение температуры по сечению железобетонной колонны кольцевого сечения толщиной 55 мм в заданный момент времени стандартного огневого воздействия (расчет по инженерной методике ТКП 45-2.02-110-2008)

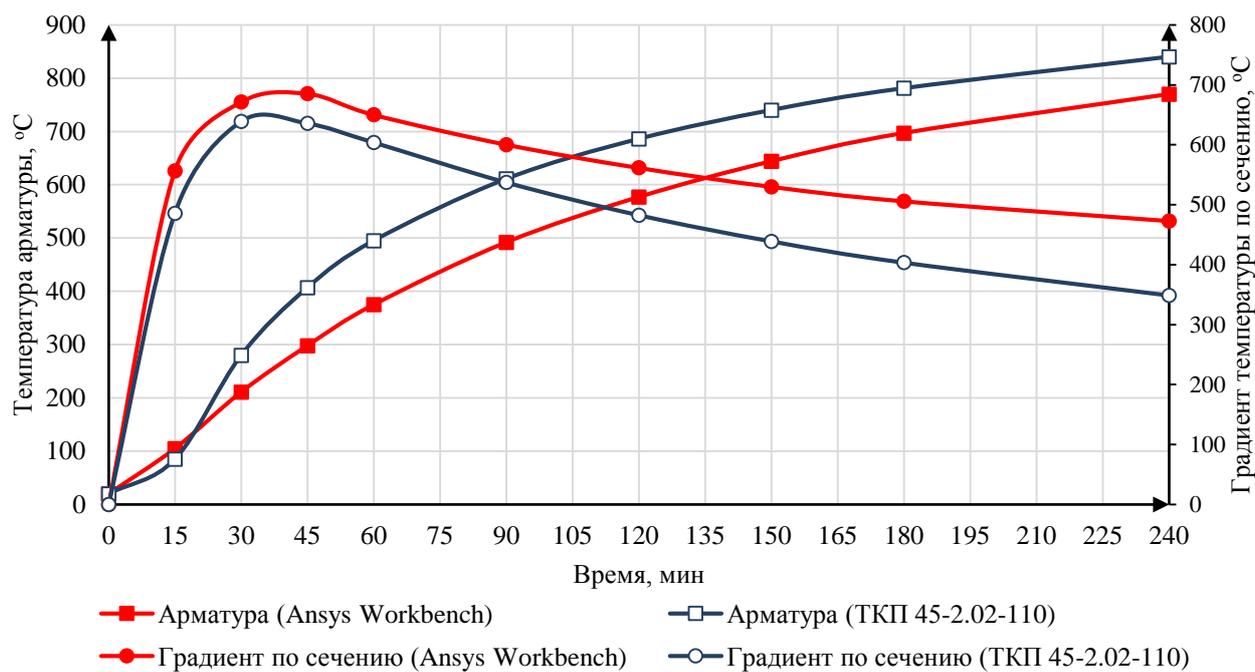


Рисунок 10. – Значения температуры арматуры и градиента по сечению железобетонной колонны кольцевого сечения толщиной 55 мм в заданный момент времени стандартного огневого воздействия

Определение теплофизических свойств центрифугированного бетона имеет в данной статье теоретический характер. Реальные свойства материала и принятые допущения необходимо уточнить путем проведения экспериментальных исследований.

**Заключение.** Проведен комплекс теоретических исследований, а именно:

1. На базе платформы Ansys Workbench разработана расчетная модель стандартного огневого воздействия на центрифугированную железобетонную колонну кольцевого сечения с учетом анизотропности теплофизических характеристик бетона по ее сечению.

2. Определено температурное поле поперечного сечения центрифугированной железобетонной колонны кольцевого сечения в заданный момент времени вследствие стандартного огневого воздействия.

3. Проведен теплотехнический расчет по ТКП 45-2.02-110-2008. Проведено сравнение результатов моделирования и расчета.

Результаты исследования планируется в дальнейшем сопоставить с экспериментальными данными, по результатам которых будут уточнены теплофизические характеристики бетона по сечению, а также определено значение суммарного коэффициента теплоотдачи между внутренней поверхностью конструкции и газовой средой в ее полости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Казачек, В.Г. Шагая в ногу со временем / В.Г. Казачек [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2014. – № 16. – С. 111–113.
2. Полевада, И.И. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона / И.И. Полевада [и др.] // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 319–329.
3. Ахвердов, И.Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы. – М: Стройиздат, 1967. – 163 с.
4. Щуцкий, В.Л. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона [Электронный ресурс] / В.Л. Щуцкий, Д.А. Дедух, М.Ю. Гриценко // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2, Ч. 2. – 13 с. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3000>. – Дата доступа: 10.09.2019.
5. Полевада, И.И. Экспериментальные и теоретические исследования физических и теплофизических характеристик центрифугированного бетона / И.И. Полевада, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 255–267. DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.255.
6. Полевада, И.И. Поведение центрифугированного бетона при пожаре / И.И. Полевада, Д.С. Нехань, Д.С. Батан // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 4. – С. 455–469. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.455.
7. Ширко, А.В. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием программой среды Ansys / А.В. Ширко [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 260–269.
8. Полевада, И.И. Моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в программном комплексе Ansys / И.И. Полевада, Н.В. Зайнудинова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 4. – С. 385–391. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-4.385.
9. Нехань, Д.С. О методике проведения натуральных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн и теоретическом расчете избыточного давления смеси газов в полости укрупненных конструкций / Д.С. Нехань // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2019. – № 1 (45). – С. 62–72.

**Моделирование прогрева центрифугированной железобетонной колонны с учетом анизотропии теплофизических характеристик бетона по сечению**

**Modeling of heating of a centrifuged reinforced concrete column taking into account anisotropy of thermophysical characteristics of concrete in cross section**

***Нехань Денис Сергеевич***

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», факультет подготовки научных кадров, адъюнкт

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25  
e-mail: denis\_nechany@mail.ru

***Denis S. Nekhan'***

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Faculty of Postgraduate Scientific Education, Adjunct

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25  
e-mail: denis\_nechany@mail.ru

***Жамойдик Сергей Михайлович***

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, доцент

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25  
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

***Sergey M. Zhamoydik***

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Associate Professor

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25  
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com

***Полевода Иван Иванович***

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», начальник университета

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25  
e-mail: ip@ucp.by

***Ivan I. Polevoda***

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Head of University

Address: 220118, Belarus, Minsk, ul. Mashinostroiteley, 25  
e-mail: ip@ucp.by

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-4.366>

## MODELING OF HEATING OF A CENTRIFUGED REINFORCED CONCRETE COLUMN TAKING INTO ACCOUNT ANISOTROPY OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE IN CROSS SECTION

**Nekhan' D.S., Zhamoydik S.M., Polevoda I.I.**

*Purpose.* To determine the temperature field of a centrifuged reinforced concrete column exposed to standard fire temperature regime around the external perimeter.

*Methods:* Computer simulation based on the results of experimental and theoretical studies of the physical and thermophysical properties of centrifuged concrete. Thermotechnical calculations according to the current technological regulations.

*Findings.* A computational computer model was developed for modeling the heat transfer of a centrifuged reinforced concrete column with a fire gaseous atmosphere. The temperature field of the centrifuged reinforced concrete construction of the annular section is determined at a given point in time due to the standard fire exposure all around. The simulation results are compared with the data obtained from calculation by engineering methods according to the current technical regulations.

*Application field of research.* The results of the study can be used to determine fire resistance limits of the centrifuged reinforced concrete constructions. The obtained data are planned to be compared with experimental data.

*Keywords:* fire resistance, standard fire temperature, centrifuged reinforced concrete constructions, relative thickness, computer simulation, temperature field, anisotropy, thermotechnical calculation, Ansys Workbench.

(The date of submitting September 17, 2019)

### REFERENCES

1. Kazachek V.G., Lazovskiy D.N., Rak N.A., Tur V.V. Shagaya v nogu so vremenem [Keeping up with the times]. *Journal of Polotsk State University*, 2014. No. 16. Pp. 111–113. (rus)
2. Polevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S., Batan, D.S. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv tsentrifugirovannogo betona [Study of physical and mechanical properties of centrifuged concrete]. *Science and technology*, 2019. Vol. 18, No. 4. Pp. 319–329. (rus)
3. Akhverdov I.N. *Zhelezobetonnye napornye tsentrifugirovannye trubyy* [Reinforced concrete pressure centrifuged pipes]. Moscow: Stroyizdat, 1967. 163 p. (rus)
4. Shchutskiy V.L., Dedukh D.A., Gritsenko M.Yu. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv tsentrifugirovannogo betona [Study of physical and mechanical properties of centrifuged concrete]. *Engineering Journal of the Don*, 2015. No. 2, P. 2. 13 p. (rus) <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3000>.
5. Polevoda I.I., Nekhan' D.S. Experimental and theoretical researches of physical and thermophysical characteristics of centrifuged concrete. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 3. Pp. 255–267. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.255.
6. Polevoda I.I., Nekhan' D.S., Batan D.S. Behavior of centrifuged concrete in case of fire. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 4. Pp. 455–469. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-4.455.
7. Shirko A.V., Kamlyuk A.N., Polevoda I.I., Zaynudinova N.V. Teplotekhnicheskii raschet ognestoykosti elementov zhelezobetonnykh konstruksiy s ispol'zovaniem programmoy sredy Ansys [Thermotechnical calculation of fire resistance of elements of reinforced concrete structures using the Ansys program]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2013. No. 2 (18). Pp. 260–269. (rus)
8. Polevoda I.I., Zaynudinova N.V. Modeling the behavior of reinforced concrete prestressed slabs without coupling reinforcement with concrete in the Ansys software package. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 4. Pp. 385–391. (rus) DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-4.385.
9. Nekhan' D.S. O metodike provedeniya naturnykh ognevnykh ispytaniy tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn i teoreticheskom raschete izbytochnogo davleniya smesi gazov v polosti ukazannykh konstruksiy [About the method for full-scale fire tests of centrifuged reinforced concrete columns and the theoretical calculation of the positive pressure of a gas mixture in the cavity of these constructions]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2019. № 1 (45). Pp. 62–72. (rus)