

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-3.255>

УДК 666.97.033.17-026.5+536.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРИФУГИРОВАННОГО БЕТОНА

Полева И.И., Нехань Д.С.

Цель. Определить фактические значения плотности, влажности, коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости центрифугированного бетона при нагреве.

Методы. Экспериментальное определение плотности и процентного содержания воды в образцах из центрифугированного бетона до и после нагрева. Теоретические исследования коэффициентов теплопроводности и теплоемкости на основе полученных данных.

Результаты. Получены зависимости плотности бетона от температуры и местоположения в центрифугированной конструкции. Косвенно выявлена изменчивость влажности бетона по сечению центрифугированной конструкции. Для функций влажности по сечению и плотности с ростом температуры получены значения поправочных коэффициентов, которые позволяют в зависимости от свойств центрифугированной бетонной конструкции различной толщины в целом определять эти показатели на каждой заданной ее точке. Теоретически получены значения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости для центрифугированного бетона.

Область применения исследований. Результаты исследования могут быть использованы для решения теплотехнических задач расчета огнестойкости вышеуказанных конструкций.

Ключевые слова: центрифугированный бетон, анизотропность, плотность, влажность, коэффициент теплопроводности, коэффициент удельной теплоемкости, коэффициент температуропроводности, огнестойкость, высокотемпературный нагрев, относительная толщина.

(Поступила в редакцию 15 июля 2019 г.)

Введение. Технология центрифугирования при формировании бетонных изделий обеспечивает ряд преимуществ¹, таких как уменьшенное поперечное сечение, маневренность формы поперечного сечения изделия, значительная длина изделий, расширенные возможности для дизайна поверхности, наличие полости внутри изделия и др. Используемые в промышленности, энергетике и строительстве центрифугированные железобетонные изделия показывают высокую эффективность, открывая все новые и новые перспективы. Продукция постоянно улучшается и совершенствуется.

Поведение центрифугированных железобетонных конструкций (как правило, тонкостенных, с наличием внутри воздушной полости) при высокотемпературном нагреве, в частности пожаре, слабо изучено. Для изучения и объяснения аспектов поведения строительных конструкций в условиях пожара необходимо знать и понимать комплекс происходящих в их структуре физико-химических превращений, которые приводят к изменению свойств материалов. Поэтому исследования физико-механических и теплофизических свойств центрифугированного бетона как основополагающего материала вышеупомянутых конструкций являются сегодня актуальными задачами направления огнестойкости.

Основная часть. Основными физическими свойствами материала, влияющими на динамику и характер прогрева конструкции при пожаре и, как следствие, величину ее предела огнестойкости, являются плотность, теплопроводность и теплоемкость, которые, в свою очередь, составляют коэффициент температуропроводности. Для реальных строи-

¹ Europoles. Spun concrete. Benefits. BUILDINGS&SECURITY [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.europoles.com/fileadmin/user_upload/09-downloads/product-information-europoles-columns-benefits-spun-concrete.pdf. – Дата доступа: 24.05.2019.

тельных материалов необходим учет влажности (включается в значение теплоемкости), оказывающей своего рода влияние на прогрев конструкции. В отечественных источниках коэффициент температуропроводности для бетона a ($\text{м}^2/\text{с}$) вычисляется по формуле [1]:

$$a = \frac{\lambda}{(c_p + 0,012W)\rho}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; c_p – удельная теплоемкость бетона, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; ρ – плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; W – весовая влажность бетона, %.

В данной работе экспериментальными и теоретическими исследованиями определялись физические и теплофизические свойства центрифугированного бетона для интервала температур 20–1200 °С. Анизотропность структуры центрифугированного бетона является основным недостатком и в то же время определяющим фактором при разработке методики по исследованию свойств данного материала, ведь этим обусловлена изменчивость по сечению физико-механических и теплофизических характеристик как в начальных условиях, так и при повышении температуры. Состав, технологии изготовления конструкции и получения испытуемых образцов, характеристики используемого оборудования, некоторые уже исследованные физико-механические свойства центрифугированного бетона в нормальных условиях и при высокотемпературном нагреве представлены в работах [2, 3].

Плотность образцов ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) при температуре θ равна

$$\rho = \frac{m}{V'}, \quad (2)$$

где m – масса образца после нагрева, кг ; V' – объем образца при температуре θ , м^3 .

Объем V' вычислялся по формуле:

$$V' = V + \Delta V = (\sqrt{A} + \Delta a)(\sqrt{A} + \Delta a)(h + \Delta h) = (A + 2\sqrt{A}\Delta a + \Delta a^2)(h + \Delta h), \quad (3)$$

где V , h , A и \sqrt{A} – объем, средняя высота, площадь поперечного сечения и приведенная длина (ширина) образца при 20 °С; ΔV , Δa и Δh – изменения объема, приведенной длины (ширины) и средней высоты образца за счет температурной деформации.

Температурная деформация бетона в направлении заданной оси определяется по формуле:

$$\Delta l = l\alpha, \quad (4)$$

где l – характерный размер образца, α – коэффициент теплового линейного расширения бетона.

В силу малости величины Δa^2 формулу (3) можем переписать в виде:

$$\begin{aligned} V' &\approx (A + 2\sqrt{A}\Delta a)(h + \Delta h) \stackrel{(4)}{=} (A + 2\sqrt{A}\sqrt{A}\alpha)(h + h\alpha) = \\ &= Ah(1 + 2\alpha)(1 + \alpha) = V(1 + 3\alpha + 2\alpha^2). \end{aligned} \quad (5)$$

Величина $2V\alpha^2$ составляет менее 0,05 % от общего объема образца, поэтому для наших задач допустимо считать

$$V' \approx V(1 + 3\alpha). \quad (6)$$

Значения коэффициента α приняты в соответствии с ТКП EN 1992-1-2-2009² (далее Eurocode 2) и для исследуемого участка температур имели следующие значения: при 20 °С – 0; при 200 °С – 0,0018; при 400 °С – 0,0049; при 400 °С – 0,0102; при 400 °С – 0,0140.

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

Полученные значения плотности при исследованных температурах представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. Изменение плотности центрифугированного бетона с ростом температуры

| Слой (относительная толщина δ) | Плотность бетона при нагреве, кг/м ³ | | | | |
|---|---|----------|----------|----------|----------|
| | 20 °С | 200 °С | 400 °С | 600 °С | 800 °С |
| Внутренний (0,3125) | 2370±100 | 2190±180 | 2110±230 | 2090±190 | 2060±330 |
| Средний(0,5) | 2520±110 | 2400±320 | 2320±240 | 2290±300 | 2270±380 |
| Наружный (0,6875) | 2560±120 | 2460±330 | 2400±300 | 2380±400 | 2350±300 |

Примечание. Интервал результатов измерений представлен при уровне доверительной вероятности 95 %.

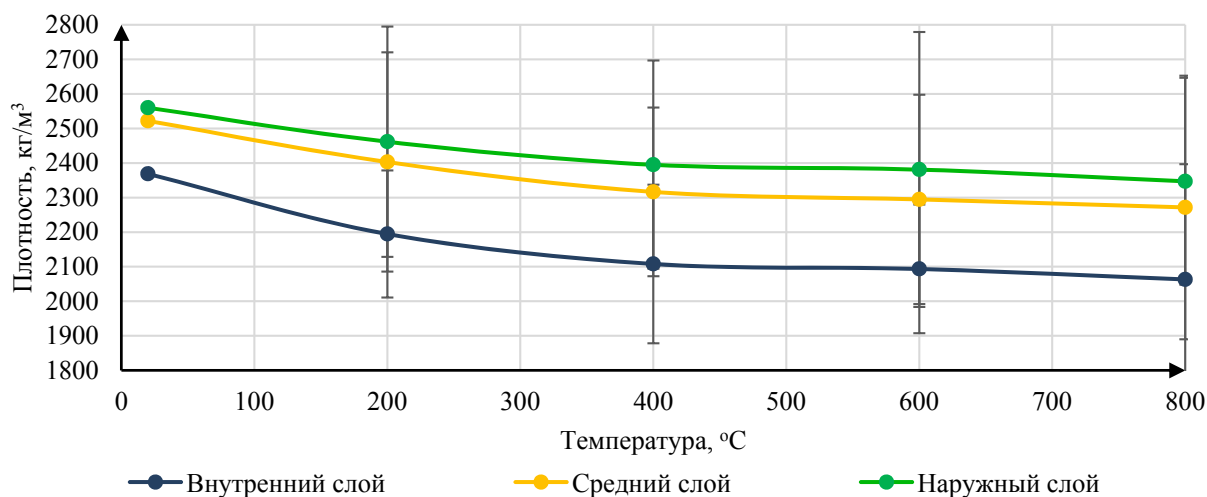


Рисунок 1. – Изменение плотности образцов центрифугированного бетона с ростом температуры

Из рисунка 1 видно, что с повышением температуры плотность всех слоев бетона уменьшается, это происходит за счет удаления воды (химически и физически связанной) и температурного расширения цементного камня и заполнителей.

При нагреве до 200 °С плотность внутренних слоев уменьшается с наибольшей скоростью, что связано с наличием большого количества свободной воды в порах и пустотах бетона, которая в процессе изготовления конструкций отжимается внутрь. При температуре до 400 °С продолжается снижение плотности всех слоев бетона за счет удаления воды, адсорбированной гелем двух- и трехкальциевого силиката, кристаллизованной воды заполнителей [4, 5]. На участке 200–400 °С большее снижение плотности характерно для внутреннего и среднего слоев, которые имеют большее относительное содержание цементного камня и количество радиально направленных канальцев. При дальнейшем повышении температуры от 400 до 800 °С удаляется химически связанная вода из гидратов и заполнителей, а также образовавшаяся при разложении гидроксида кальция [4, 6] и происходит расширение кристаллов кварца [5]. Линии снижения плотности в различных слоях практически параллельны, что говорит об одинаковом количественном удалении воды по сечению.

С ростом температуры наблюдается уменьшение скорости изменения относительного значения плотности $k_p(\theta)$ (определяемой отношением плотности образца при температуре θ к его начальной плотности) по сечению (рис. 2). Это обусловлено тем, что основной вклад в изменение плотности при нагреве бетона вносит вода, используемая при затворении бетонной смеси и находящаяся в заполнителях. Для всех бетонов, работающих при температурах выше 800 °С, количество связанной воды условно принимается равным нулю³, что находит подтверждение в работе [3]. Уменьшение плотности начиная с данной температуры может быть вызвано дальнейшими температурными деформациями, а для бе-

³ Бетон в защите ядерных установок – Количество воды в бетонах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/beton-v-zaschite-yadernyh-ustanovok-5.html>. – Дата доступа: 30.04.2019.

тонов с известняковым заполнителем – разложением известняка, сопровождающимся удалением окиси углерода [5, 6].

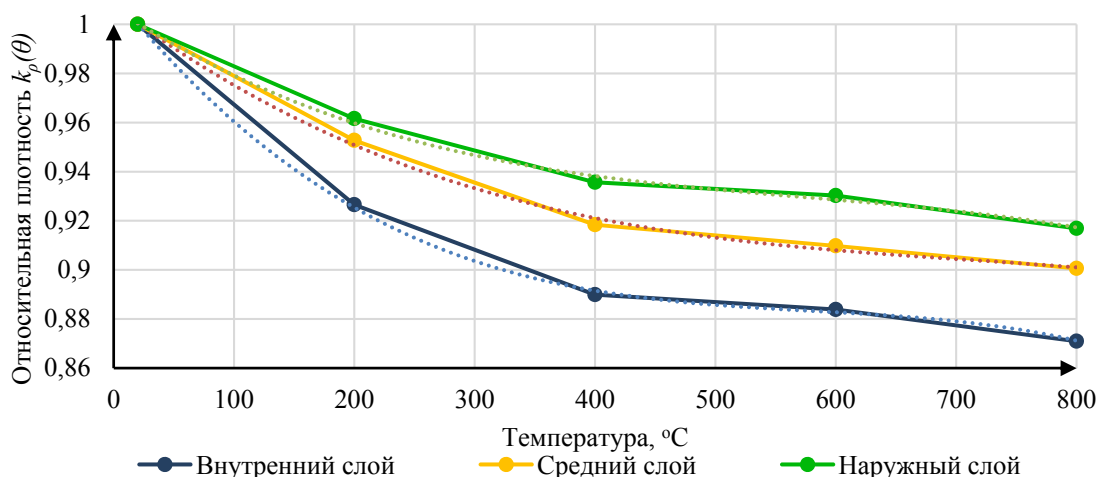


Рисунок 2. – Изменение относительной плотности образцов центрифугированного бетона с ростом температуры

Математическое описание плотности. Для описания зависимости плотности $\rho(\delta, \theta)$ центрифугированного бетона от температуры в различных слоях конструкции представим данную функцию в виде произведения составляющих, учитывающих температуру θ и относительную толщину δ :

$$\rho(\theta, \delta) = \rho_0 \Phi_1(\delta) \Phi_2(\theta) \Phi_3(\theta, \delta), \quad (7)$$

где ρ_0 – начальная плотность конструкции; $\Phi_1(\delta)$ – функция, учитывающая изменение плотности по сечению в начальных условиях; $\Phi_2(\theta)$ – функция, учитывающая характер изменения плотности конструкции в целом с ростом температуры; $\Phi_3(\delta, \theta)$ – функция, характеризующая изменение относительной плотности $k_p(\theta)$ по сечению с ростом температуры.

Согласно работе [3] функция $\Phi_1(\delta)$ принимает значение:

$$\Phi_1(\delta) = 0,899 + 0,204\delta. \quad (8)$$

На основании имеющихся данных (табл. 1, рис. 2) в качестве $\Phi_2(\theta)$ принято среднее значение относительной плотности $k_p(\theta)$ среди всего исследованного спектра слоев бетонной стойки при заданной температуре.

Для определения функции $\Phi_3(\delta, \theta)$ на исследованных участках температур построен график зависимости относительной плотности бетона $k_p(\theta)$ от относительной толщины конструкции δ (рис. 3). Учитывая, что при 20 °C в любой точке $k_p = 1$, по указанному графику можно заметить: разница в изменении относительной плотности $k_p(\theta)$ по сечению нарастает до температуры 400 °C, а затем остается практически неизменной.

Т. к. $\Phi_2(\theta)$ относится к конструкции в целом ($\delta = 0,5$), функцию $\Phi_3(\delta, \theta)$ можно представить в виде:

$$\Phi_3(\delta, \theta) = 1 + (\delta - 0,5)\xi(\theta), \quad (9)$$

где $\xi(\theta)$ – скорость изменения по сечению с ростом температуры относительной плотности бетона.

Для определения величины $\xi(\theta)$ методом наименьших квадратов получены зависимости линейного вида (рис. 3). Производные от этих функций по относительной толщине конструкции есть искомые скорости изменения по сечению относительной плотности бетона $\xi(\theta)$ (рис. 4).

С учетом характера изменения $\xi(\theta)$ (рис. 4) приняли эту функцию начиная с 400 °C постоянной и равной среднему значению из $\xi(400)$, $\xi(600)$, $\xi(800)$.

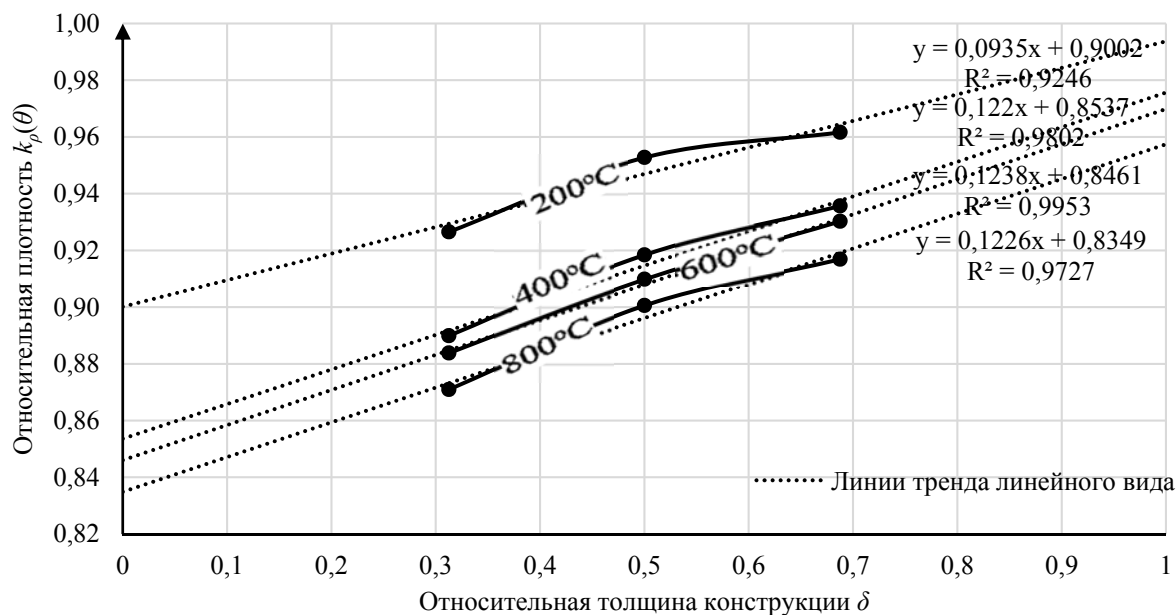


Рисунок 3. – Зависимость относительной плотности бетона от относительной толщины конструкции для температур 200, 400, 600 и 800 °C

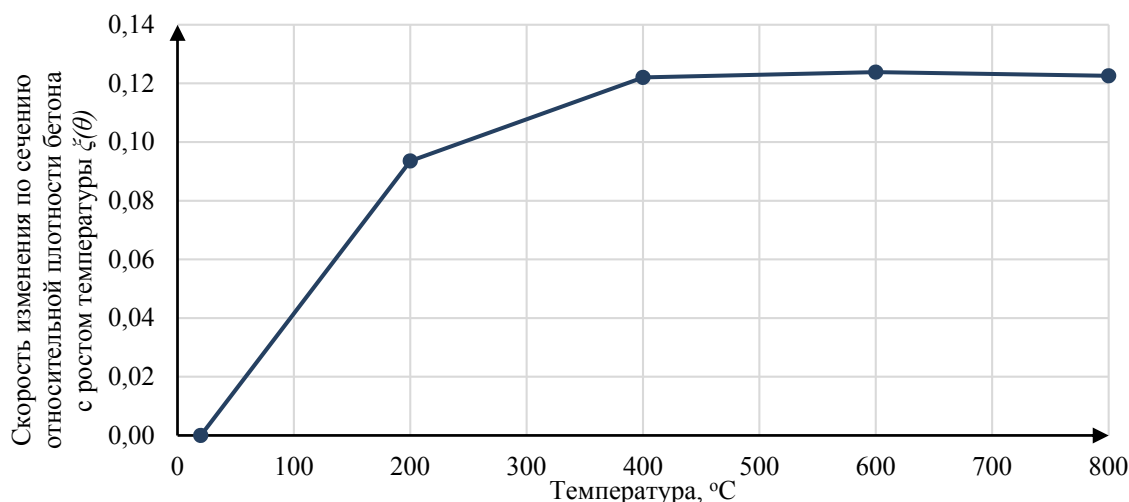


Рисунок 4. – Зависимость скорости изменения по сечению относительной плотности бетона от температуры

Для более простого описания $\Phi_2(\delta)$, $\xi(\theta)$ выделили несколько участков температур (подобно практике Eurocode 2). Полученные для исследованной бетонной стойки [2, 3] выражения этих функций приведены в таблице 2.

Таблица 2. Полученные функции $\Phi_2(\theta)$, $\xi(\theta)$

| Функция | Температура, °C | | |
|------------------|-------------------------------------|--|--|
| | 20–200 | 200–400 | 400–1200 |
| $\Phi_2(\delta)$ | $1 - 0,053 \frac{\theta - 20}{180}$ | $0,947 - 0,031 \frac{\theta - 200}{200}$ | $0,916 - 0,036 \frac{\theta - 400}{800}$ |
| $\xi(\theta)$ | $0,094 \frac{\theta - 20}{180}$ | $0,094 + 0,029 \frac{\theta - 200}{200}$ | 0,123 |

Примечание. Ввиду того, что при стандартном огневом воздействии температура в сечении строительных конструкций может превышать 800 °C, значения функций экстраполированы до 1200 °C с учетом характера изменения плотности при температурах свыше 800 °C в Eurocode 2.

Изменения плотности с ростом температуры для исследованной стойки плотностью $\rho_0 = 2480 \text{ кг/м}^3$ и толщиной $b_0 = 160 \text{ мм}$ [2, 3] в соответствии с (7) – (9) и таблицей 2 представлены на рисунке 5.

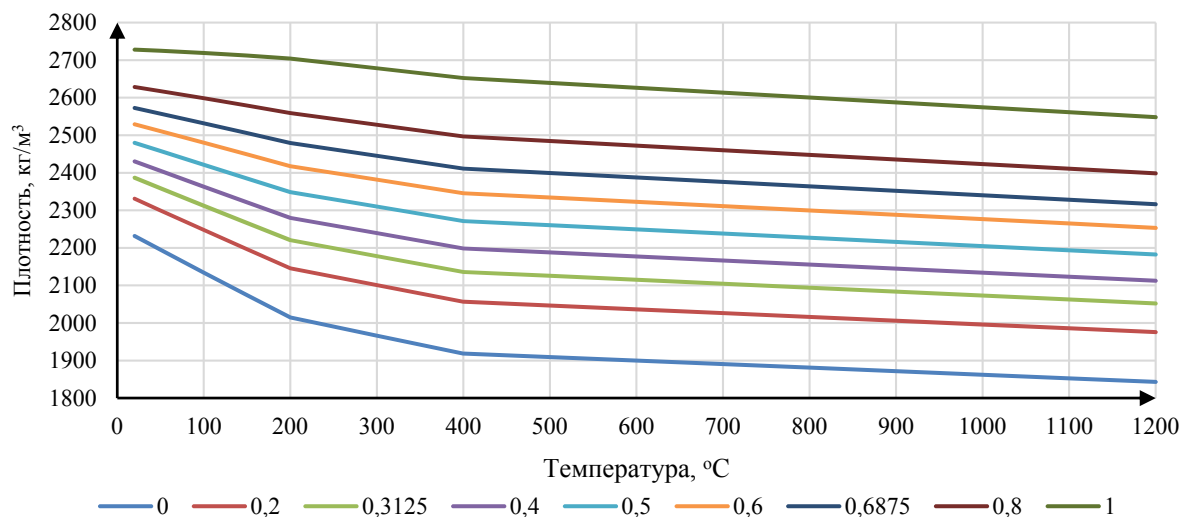


Рисунок 5. – Зависимость плотности бетона от температуры при некоторых относительных толщинах (исследования центрифугированной бетонной стойки толщиной 160 мм)

Распространение результатов исследования плотности бетона на центрифугированные бетонные конструкции различной толщины. Для конструкций толщиной, отличной от 160 мм, функция $\Phi_1(\theta)$ подлежит корректировке коэффициентами k_1 и k_2 , предложенными впервые в работе [3]. Аналогично, функция $\xi(\theta)$ также подлежит корректировке, поскольку очевидно, что ее значения с увеличением однородности будут уменьшаться, и наоборот (при изменении толщины сечения). Чтобы учитывать данное явление, предлагается функцию $\xi(\theta)$ использовать с коэффициентом k_2 (равным отношению толщины заданной конструкции b к 160 мм [3]).

Для расчета огнестойкости железобетонных конструкций необходимо знать такие теплофизические величины, как коэффициент теплопроводности и коэффициент удельной теплоемкости. Определение теплофизических характеристик бетонов при нагреве производится методом решения обратной задачи теплопроводности – путем сопоставления экспериментальных и расчетных кривых прогрева бетона [1, 7]. Вместе с тем данные величины связаны с плотностью и влажностью конкретного материала (Eurocode 2) [8].

Коэффициент теплопроводности, входящий в выражение (1), является физическим параметром материала, характеризующим его способность проводить теплоту. Для тяжелых бетонов увеличение плотности непременно вызывает увеличение теплопроводности, что связано с увеличением числа пор при снижении плотности. Воздух в порах и накапливающаяся в них влага имеют коэффициенты теплопроводности 0,026–0,032 Вт/м·К⁴ и 0,599–0,683 Вт/м·К⁵ соответственно, что значительно ниже коэффициента теплопроводности плотного камня (1,4–1,7 Вт/м·К⁶). Так, например, известна эмпирическая формула В.П. Некрасова, связывающая теплопроводность бетона с его плотностью [12]:

$$\lambda_0 = 1,16\sqrt{0,0196 + 0,22\rho^2} - 0,16, \quad (10)$$

где ρ – средняя плотность бетона, г/см³.

По формуле (10) найдены значения коэффициента теплопроводности в начальных условиях λ_0 . Коэффициент снижения теплопроводности с ростом температуры принят рав-

⁴ Теплопроводность, температуропроводность, число Прандтля для воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svojtva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svojtva-vozdruha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya>. – Дата доступа: 27.05.2019.

⁵ Плотность воды, теплопроводность и физические свойства H₂O [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://thermalinfo.ru/svojtva-zhidkostej/voda-i-rastvory/teploprovodnost-i-plotnost-vody-teplofizicheskie-svojtva-vody-h2o>. – Дата доступа: 27.05.2019.

⁶ «Ксирон-Холод». Коэффициенты теплопроводности различных материалов, таблица [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.xiron.ru/content/view/58/28>. – Дата доступа: 14.05.2019.

ным $0,0003 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C}^2)$ [10]. Коэффициент теплопроводности центрифугированного бетона с силикатным заполнителем при повышении температуры для всех слоев конструкции определялся по формуле

$$\lambda(\theta, \delta) = \lambda_0(\delta) - 0,0003\theta. \quad (11)$$

Поскольку модели расчета в отечественных и европейских источниках отличаются, коэффициент теплопроводности центрифугированного бетона с силикатным заполнителем приведем также согласно Eurocode 2. Для этого воспользуемся уточненной зависимостью, в которой коэффициент снижения теплопроводности с ростом температуры принят равным усредненному показателю $1,91 \cdot 10^{-3}\theta - 8,10 \cdot 10^{-7}\theta^2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C}^2)^2$. Альтернативное выражение $\lambda(\theta, \delta)$ имеет вид:

$$\lambda(\theta, \delta) = \lambda_0(\delta) - (1,91 \cdot 10^{-3}\theta - 8,10 \cdot 10^{-7}\theta^2). \quad (12)$$

Характер изменения коэффициента теплопроводности λ центрифугированного бетона с ростом температуры для различных относительных толщин конструкции представлен на рисунке 6.

Полученные по формуле (12) кривые (рис. 6), соответствующие относительным толщинам центрифугированной бетонной конструкции 0,0 и 0,2, пересекают ось абсцисс при температуре 925 и 1105 °С соответственно, что противоречит физическому смыслу коэффициента теплопроводности. Поэтому предполагаем, что модель В.П. Некрасова для определения коэффициента теплопроводности бетона в начальных условиях λ_0 , вычисляемых по формуле (10), не согласуется с данными Eurocode 2, и в дальнейшем при решении теплофизических задач следует учитывать значения λ_0 , приведенные в Eurocode 2.

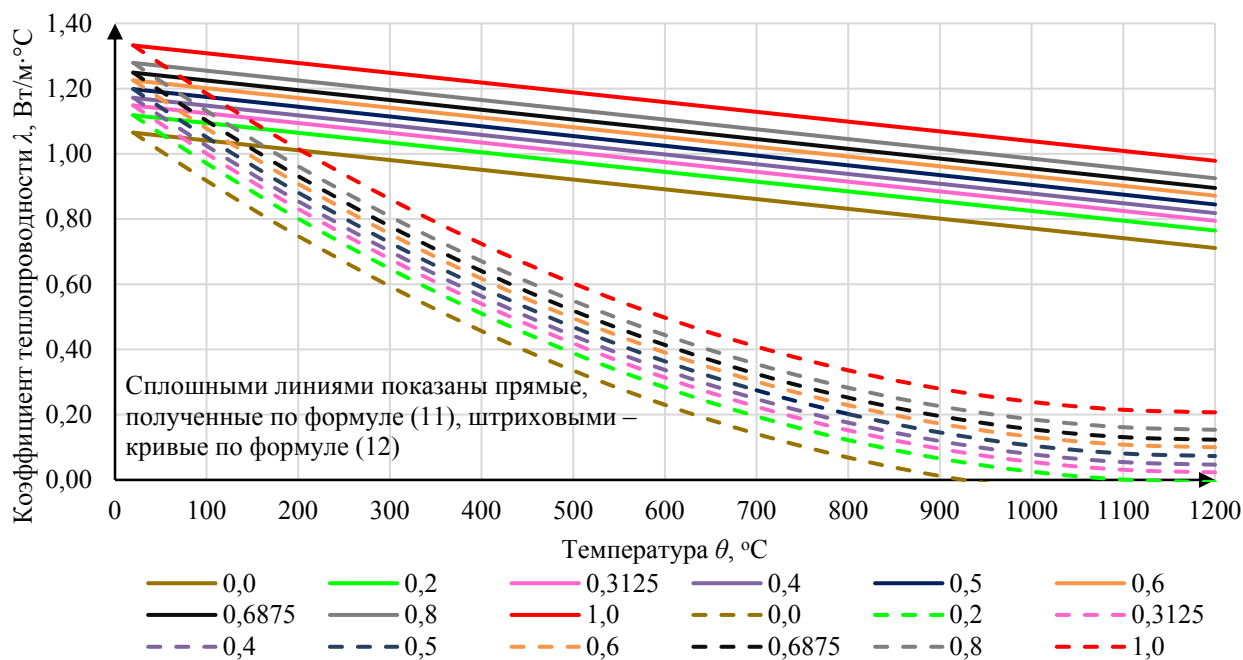


Рисунок 6. – Зависимость коэффициента теплопроводности центрифугированного бетона от температуры для некоторого ряда относительных толщин

Влажность. Для определения влажности бетона в соответствии с ГОСТ 12730.0-78⁷ и ГОСТ 12730.2-78⁸ [16, 17] изготовленные или выпиленные из конструкции образцы взвешивают, ставят в сушильный шкаф и высушивают до постоянной массы при темпера-

⁷ Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости: ГОСТ 12730.0-78. – Взамен ГОСТ 12730-67, ГОСТ 11050-64, ГОСТ 4800-59 в части общих требований; введ. 01.01.1980. – М.: Стандартиформ, 2007. – 3 с.

⁸ Бетоны. Метод определения влажности: ГОСТ 12730.2-78. – Взамен ГОСТ 12852.2-77, ГОСТ 11050-64 в части определения влажности; введ. 01.01.1980. – М.: Стандартиформ, 2007. – 4 с.

туре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$. Затем, после охлаждения образцов, проводят очередное взвешивание. Вычислив отношение изменения массы образца к массе высушенного образца, находят его влажность.

Поскольку согласно изложенной в [2, 3] методике нагрев образцов осуществлялся до температуры 200°C с четырехчасовой выдержкой при данной температуре и последующим охлаждением, не представляется возможным определить их влажность в соответствии с ГОСТ 12730.0-78 и ГОСТ 12730.2-78. Вместе с тем для решения теплотехнических задач необходимо знание влажности бетона (например, при определении коэффициента удельной теплоемкости). Поэтому предлагается определять ее по формуле (ГОСТ 12730.2-78):

$$W = \frac{m_{20} - m_{105}}{m_{105}} \cdot 100\%, \quad (13)$$

где m_{20} – масса образца до нагрева, г; m_{105} – интерполированная остаточная масса образца после нагрева до 105°C , вычисляемая по формуле:

$$m_{105} = m_{20} - \frac{105 - 20}{200 - 20} (m_{20} - m_{200}) = m_{20} - 0,472(m_{20} - m_{200}), \quad (14)$$

где m_{200} – масса образца после нагрева до 200°C , четырехчасовой выдержки и последующего охлаждения, г.

Средние значения результатов измерений массы образцов до и после нагрева по [3], а также полученные на основе экспериментальных данных по формуле (13) значения влажности образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Влажность центрифугированных бетонных образцов

| Слой | Относительная толщина | Среднее значение массы | | | Влажность, % |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| | | m_{20} , Г | m_{200} , Г | m_{105} , Г | |
| Внутренний | 0,3125 | 2386,3 | 2231,4 | 2313,2 | $3,16 \pm 0,51$ |
| Средний | 0,5 | 2574,6 | 2469,1 | 2542,8 | $1,97 \pm 0,36$ |
| Наружный | 0,6875 | 2628,0 | 2544,2 | 2588,4 | $1,53 \pm 0,32$ |
| Среднее значение (в целом) | – | – | – | – | $2,22 \pm 0,40$ |

Примечание. Интервал результатов измерений влажности представлен при уровне доверительной вероятности 95 %.

Из рисунка 7 видно, что полученные результаты значений влажности вполне достоверно согласуются с линией тренда экспоненциального вида.

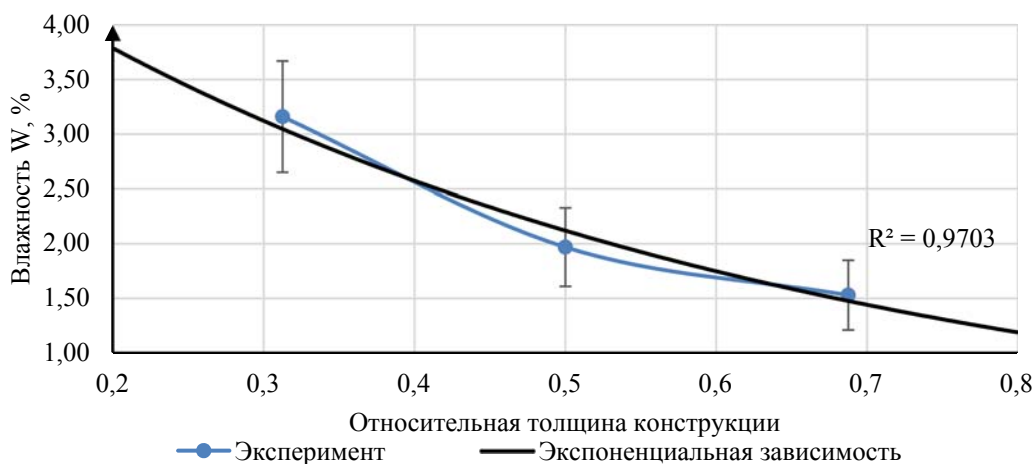


Рисунок 7. – Изменение влажности центрифугированного бетона по сечению

Методом наименьших квадратов получено уравнение, описывающее закономерность изменения влажности по сечению, которое в дальнейшем применяется к влажности конструкции в целом (среднему значению):

$$W = W_0 e^{A+C\delta} = W_0 e^{0,92-1,93\delta}, \quad (15)$$

где W_0 – начальная влажность конструкции, % масс.

Распространение результатов исследования влажности бетона на центрифугированные бетонные конструкции различной толщины. Изменение толщины конструкций приводит к изменению однородности по сечению. Поэтому, как и в случае с другими физико-механическими характеристиками [3], данная зависимость подлежит корректировке с учетом рассматриваемой толщины конструкции. В формуле (15) принимаем значение дополнительного коэффициента $k_2 = \frac{b}{b_0}$ (b – толщина конструкции, мм; $b_0 = 160$ мм) при аргументе δ и k_1 при свободном члене $A = 0,92$. Для нахождения k_1 составим уравнение, рассматривая две конструкции разной толщины, имеющие одинаковую влажность:

$$\int_0^1 W_0 e^{A+C\delta} d\delta = \int_0^1 W_0 e^{Ak_1+C\delta k_2} d\delta. \quad (16)$$

Откуда получим

$$\frac{1}{C} e^{A+C\delta} \Big|_0^1 = \frac{1}{Ck_2} e^{Ak_1+C\delta k_2} \Big|_0^1; \quad k_2 e^A (e^C - 1) = e^{Ak_1} (e^{Ck_2} - 1); \quad e^{Ak_1-A} = k_2 \frac{e^C - 1}{e^{Ck_2} - 1};$$

$$k_1 = 1 + \frac{1}{A} \ln \left(k_2 \frac{e^C - 1}{e^{Ck_2} - 1} \right). \quad (17)$$

Значения коэффициентов k_1 и k_2 позволяют переходить к зависимостям влажности для центрифугированных конструкций произвольной толщины.

Коэффициент удельной теплоемкости. Следующим параметром, необходимым для определения температурного поля в сечении конструкции, является теплоемкость материала. Теплоемкость бетона для различных слоев конструкции может быть определена по известным для обычного тяжелого бетона на гранитном (силикатном) заполнителе зависимостям⁹ (Eurocode 2), [1, 7]. Зависимости $c_p(\theta)$ из Eurocode 2 позволяют учитывать влажность в определении коэффициента удельной теплоемкости: функция коэффициента удельной теплоемкости от температуры дополняется постоянной $c_{p,peak}$, расположенной между 100 и 115 °С, значение которой зависит от влажности бетона, с последующим линейным уменьшением удельной теплоемкости в интервале от 115 (соответствует $c_{p,peak}$) до 200 °С (соответствует 1000 Дж/кг·°С). Удельная теплоемкость $c_p(\theta)$ (Дж/кг·°С) на остальных участках определяется следующим образом (Eurocode 2):

$$c_p(\theta) = 900 \quad \text{при } 20 \text{ °С} \leq \theta \leq 100 \text{ °С};$$

$$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200) / 2 \quad \text{при } 200 \text{ °С} < \theta \leq 400 \text{ °С};$$

$$c_p(\theta) = 1100 \quad \text{при } 400 \text{ °С} < \theta \leq 1200 \text{ °С}.$$

Для указанного выше ряда относительных толщин по формуле (15) найдены значения влажности (при средней влажности конструкции 2,2 % масс.) и в соответствии с положениями Eurocode 2 определены значения коэффициента удельной теплоемкости в интервале температур от 20 до 1200 °С. Результаты расчетов наглядно представлены на рисунке 8, из которого видно, что неоднородность центрифугированного бетона, обусловленная изменением влажности по сечению конструкции, вызывает различный скачок коэффициента теплоемкости в интервале от 100 до 115 °С и последующее его снижение до 200 °С. Величина скачка уменьшается по мере движения от центра к периферии, что говорит о сле-

⁹ 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: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 135 с.

дующем: для увеличения температуры единицы массы бетона наружных слоев в интервале от 100 до 200 °С требуется меньше энергии (теплоты), чем для внутренних.

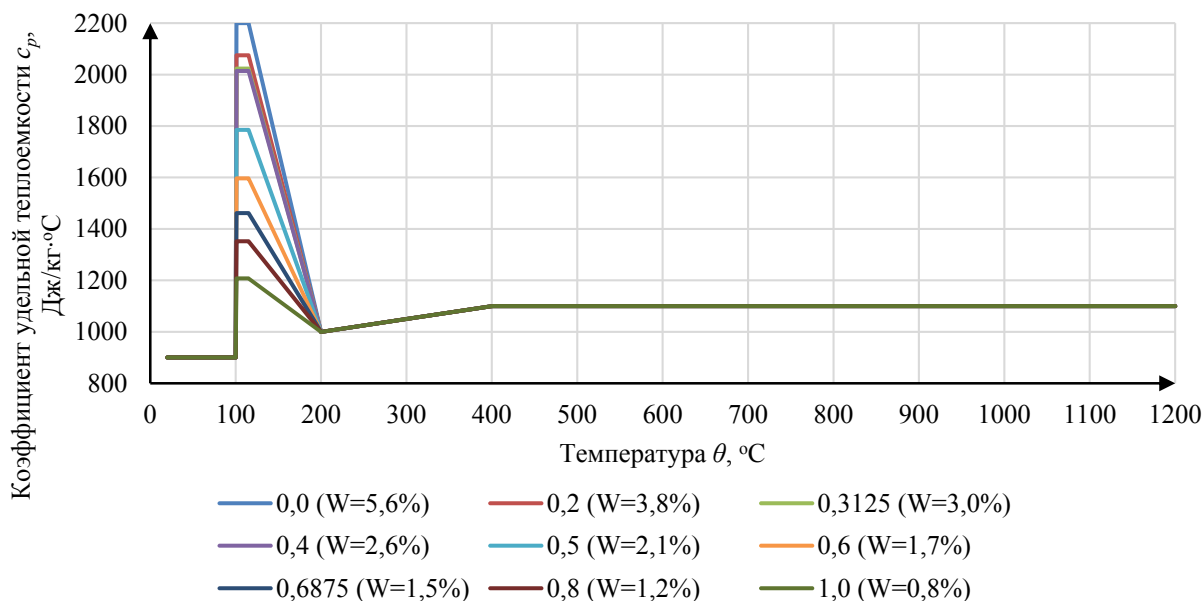


Рисунок 8. – Зависимость коэффициента удельной теплоемкости центрифугированного бетона от температуры для некоторого ряда относительных толщин

Следует отметить, что формула (1) применима в инженерной практике при оценке теплотехнических свойств бетона при высокотемпературном нагреве в упрощенной методике расчета значений коэффициентов удельной теплоемкости и теплопроводности, когда они определяются при средней температуре нагрева бетона $\theta = 450$ °С (ТКП 45-2.02-110-2008) [1, 7] и являются функциями температуры. В этом случае при определении коэффициента теплопроводности оптимально будет использовать формулу (11) и зависимости коэффициента удельной теплоемкости из [1, 7], оперируя значениями влажности конструкции в целом, а в формулу (1) подставлять плотность бетона в сухом виде.

Вместе с тем существующая тенденция к возрастанию интереса моделирования строительных конструкций при пожаре и решения теплотехнических задач огнестойкости с помощью программных комплексов приводит к необходимости применения модели, отличной от инженерной, основанной на признанных принципах и допущениях теплопроводности. В этом случае следует использовать для определения плотности бетона формулу (7); для коэффициента теплопроводности – формулу (12) (при этом определение значения λ_0 является предметом исследований; применение для данной модели значений λ_0 , определенных по формуле (10), явно приводит к значительным погрешностям); для коэффициента удельной теплоемкости – зависимости, представленные на рисунке 8.

Выводы. В настоящей работе приведены результаты комплекса лабораторных и теоретических исследований, а именно:

1. Получены данные по изменению плотности центрифугированных бетонных образцов, на основании которых построена зависимость, описывающая плотность центрифугированного бетона с повышением температуры в различных слоях исследованной конструкции. С учетом ранее выдвинутых предположений о повышении однородности конструкции с уменьшением толщины формуемого изделия предложены поправочные коэффициенты для некоторых полученных функций, при помощи которых можно определить плотность бетона в любой точке центрифугированной железобетонной конструкции различной толщины.

2. С учетом методики по определению влажности бетона (ГОСТ 12730.0-78 и ГОСТ 12730.2-78) на основании полученных данных дана оценка влажности бетонных образцов центрифугированного бетонного изделия. Получена эмпирическая зависимость экспонен-

циального вида, характеризующая изменение влажности по сечению центрифугированного бетонного изделия в зависимости от данного показателя у конструкции в целом. Эта зависимость с учетом полученных поправочных коэффициентов может быть использована при оценке влажности по сечению в центрифугированных железобетонных конструкциях различной толщины.

3. Установлен характер изменения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости по сечению бетонной стойки, описанной в [2, 3], с ростом температуры.

Результаты исследований носят прикладной характер и могут быть использованы при проведении расчетов огнестойкости центрифугированных железобетонных конструкций, в частности при решении теплотехнической задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милованов, А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
2. Полевода, И.И. Поведение центрифугированного бетона при пожаре / И.И. Полевода, 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.
3. Полевода, И.И. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона / И.И. Полевода [и др.] // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 319–329.
4. Jaeger, T. Grundzüge der Strahlenschutztechnik: für Bauingenieure, Verfahrenstechniker, Gesundheitsingenieure, Physiker / T. Jaeger, mit einem Geleitwort von Everitt P. Blizard. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2013. – 392 s.
5. Beständigkeit von Beton bei höheren Temperaturen // Cementbulletin. – 1979. – № 23. – S. 1–6.
6. Hermann, K. Brandverhalten von Beton / K. Hermann // Cementbulletin. – 1992. – № 10. – S. 1–8.
7. Яковлев, А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
8. Строительные материалы: учеб. для вузов / В.Г. Микульский [и др.]; под ред. В. Г. Микульского. – М.: АСВ, 2000. – 536 с.

Экспериментальные и теоретические исследования физических и теплофизических характеристик центрифугированного бетона

Experimental and theoretical researches of physical and thermophysical characteristics of centrifuged concrete

Полевода Иван Иванович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС
Беларуси», 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

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

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-3.255>

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCHES OF PHYSICAL AND THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CENTRIFUGED CONCRETE

Polevoda I.I., Nekhan D.S.

Purpose. To determine the actual values of the density, percentage of water, coefficients of thermal conductivity and heat capacity of centrifuged concrete during heating.

Methods. Experimental determination of the density and percentage of water of samples from centrifuged concrete before and after heating. Theoretical studies of the coefficients of thermal conductivity and heat capacity on the basis of the data obtained.

Findings. The dependences of the density of concrete on temperature and location in a centrifuged structure are obtained. Indirectly revealed the variability of humidity of concrete over the cross section of the centrifuged structure. For the functions of humidity over the cross section and density with increasing temperature, the values of the correction factors are obtained, which allow, depending on the properties of the centrifuged concrete structure of various thickness, as a whole, to determine these indicators at each point. Theoretically obtained values of the coefficients of thermal conductivity and specific heat capacity for centrifuged concrete.

Application field of research. The research results can be used to solve the heat engineering problems of calculating the fire resistance of the above constructions.

Keywords: centrifuged concrete, anisotropy, density, percentage of water, thermal conductivity coefficient, specific heat coefficient, thermal diffusivity, fire resistance, high-temperature heating, relative thickness.

(The date of submitting July 15, 2019)

REFERENCES

1. Milovanov A.F. *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy pri pozhare* [The strength of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 304 p. (rus)
2. Polevoda I.I., Nekhan' D.S., Batan D.S. Povedenie tsentrifugirovannogo betona pri pozhare [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.
3. 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]. *Nauka i tekhnika*, 2019. Vol. 18, No. 4. Pp. 319–329. (rus)
4. Jaeger T. *Grundzüge der Strahlenschutztechnik: für Bauingenieure, Verfahrenstechniker, Gesundheitsingenieure, Physiker* [Fundamentals of radiation protection technology: for civil engineers, process engineers, health engineers]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2013. 392 p. (deu)
5. Beständigkeit von Beton bei höheren Temperaturen [Resistance of concrete at higher temperatures]. *Cementbulletin*, 1979. – No. 23. Pp. 1–6. (deu)
6. Hermann K. Brandverhalten von Beton [Fire behavior of concrete]. *Cement Bulletin*, 1992. No. 10. Pp. 1–8. (deu)
7. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus)
8. Mikul'skiy V.G., Kupriyanov V.N., Sakharov G.P. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]: textbook. Moscow: ASV, 2000. 536 p. (rus)