

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.139>

УДК 614.841.332:691.328.1::666.97.033.17

## ОГНЕСТОЙКОСТЬ ЦЕНТРИФУГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН

Полева И.И., Нехань Д.С.

*Цель.* На основании экспериментальных и теоретических исследований изучить огнестойкость железобетонных колонн, изготовленных методом центрифугирования.

*Методы.* Экспериментально-теоретические исследования физико-механических и теплофизических характеристик центрифугированного бетона в нормальных условиях и при высокотемпературном нагреве. Натурные испытания центрифугированных железобетонных колонн под совместной температурно-силовой нагрузкой. Аналитическое решение теплотехнической и статической задач огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн. Компьютерное моделирование на базе платформ Ansys Workbench и ЛИРА-САПР.

*Результаты.* Выявлено различие физико-механических характеристик центрифугированного бетона в поперечном сечении конструкций заданной толщины в нормальных условиях, а также различие в их относительном изменении при высокотемпературном нагреве. Установлены экспериментальные зависимости коэффициента условий работы центрифугированного бетона при пожаре. Экспериментальным путем установлена схема разрушения центрифугированных железобетонных колонн при пожаре, а также изучено их поведение при пожаре. Выявлена сниженная склонность центрифугированного бетона к хрупкому взрывообразному разрушению при пожаре по отношению к вибрированному бетону. Установлено влияние неоднородности центрифугированного бетона в поперечном сечении изделий, тонкостенности и воздушной полости изделий на их огнестойкость. Разработана методика расчета пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн. Разработан табличный метод оценки пределов огнестойкости серии центрифугированных железобетонных колонн.

*Область применения исследований.* Результаты исследования могут быть использованы при оценке пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн, а также при разработке изменений в технические нормативные правовые акты в области оценки огнестойкости железобетонных конструкций.

*Ключевые слова:* центрифугированный бетон, коэффициент условий работы бетона при пожаре, натурные огневые испытания, предел огнестойкости, методика расчета, статический расчет, теплотехнический расчет, хрупкое взрывообразное разрушение бетона.

(Поступила в редакцию 27 апреля 2021 г.)

### Введение

Современные тенденции строительства предполагают увеличение высоты возводимых зданий, пролетов, крановых нагрузок, технологического оборудования, что становится невозможным без применения конструкций, обладающих высокой несущей способностью. Одним из путей технического развития в области железобетонных конструкций является применение тонкостенных изделий эффективных форм и сечений, изготавливаемых по прогрессивным технологиям. Так, технология центрифугирования при производстве железобетонных конструкций позволяет не только сократить расходы бетона и стали, но также повысить их несущую способность и обеспечить ряд других преимуществ. На сегодня обоснована экономическая рентабельность применения центрифугированных железобетонных конструкций. Также известно, что снижение затрат на производство строительных конструкций является одним из основных условий роста конкурентоспособности государства. Именно поэтому изготовленные по данной технологии железобетонные конструкции нашли широкое

применение в качестве колонн одно- и многоэтажных зданий гражданского и промышленного назначения в Республике Беларусь и за ее пределами<sup>1</sup> [1].

Одним из основных требований, предъявляемых к зданиям и сооружениям, является обеспечение их пожарной безопасности. Огнестойкость строительных конструкций – одно из ключевых понятий в данной области, способствующее ее обеспечению<sup>2</sup>. Отсутствие обширных исследований в области огнестойкости центрифугированных железобетонных конструкций не позволяет определить рациональную область их применения в строительной индустрии. Существующие методы оценки пределов огнестойкости железобетонных конструкций не могут быть корректно использованы для оценки данного показателя в вышеупомянутых изделиях, что обусловлено появлением в результате центрифугирования неоднородности бетона в поперечном сечении конструкций и наличием определенных конструктивных особенностей (воздушная полость, тонкостенность), влияющих на предельную сопротивляемость конструкций огневому воздействию<sup>3, 4, 5</sup>. В связи с этим не гарантируются достоверность проводимых расчетов и, соответственно, обеспечение пожарной безопасности еще на этапе проектирования. Поэтому актуальным является проведение комплексных исследований, направленных на изучение огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн, и разработка на основе этого методики расчета пределов огнестойкости данных конструкций. Это позволит повысить пожарную безопасность современных зданий.

Изучению огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн посвящена настоящая работа. Достижение цели работы предполагало решение ряда задач:

Задача 1. Разработать методику и выполнить исследования физико-механических характеристик центрифугированного бетона в нормальных условиях и при высокотемпературном нагреве. На основании данных исследований оценить влияние технологии центрифугирования на изменение основных характеристик бетона в поперечном сечении изделия.

Задача 2. Разработать методику и провести натурные испытания центрифугированных железобетонных колонн под совместной температурно-силовой нагрузкой. На основании данных испытаний изучить их поведение и механизм разрушения при пожаре.

Задача 3. Провести теплотехнический и статический расчеты огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн с учетом экспериментальных исследований, на основе которых оценить влияние структурных и конструктивных особенностей данных конструкций.

Задача 4. Оценить возможность наступления хрупкого взрывообразного разрушения бетона (далее – ХР) в центрифугированных железобетонных конструкциях при пожаре.

Задача 5. Разработать методику расчета пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн, учитывающую влияние конструктивных и структурных особенностей данных конструкций на их огнестойкость. На основании расчета пределов огнестойкости серии центрифугированных железобетонных колонн в соответствии с данной методикой разработать табличный метод оценки пределов огнестойкости данных конструкций.

<sup>1</sup> 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](https://www.europoles.com/fileadmin/user_upload/09-downloads/product-information-europoles-columns-benefits-spun-concrete.pdf). – Дата доступа: 10.04.2020.

<sup>2</sup> Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ: принят 02.07.2013: вступ. в силу 01.08.2010 / постановление Совета Министров Респ. Беларусь. – Минск: Госстандарт, 2015. – 28 с.

<sup>3</sup> Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Введ. 01.01.09 (с отменой на территории Респ. Беларусь П1-02 к СНБ 2.02.01-98). – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 135 с.

<sup>4</sup> Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 96 с.

<sup>5</sup> Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности: СП 468.1325800.2019. – Введ. 11.06.20. – М.: Стандартинформ, 2020. – 86 с.

### Основная часть

**Задача 1.** Методика исследований физико-механических характеристик центрифугированного бетона в нормальных условиях и при высокотемпературном нагреве включает:

- изготовление методом центрифугирования бетонной стойки (класс бетона по прочности на сжатие  $C^{32/40}$ ) кольцевого сечения наружным диаметром 950 мм с толщиной стенки 160 мм;

- отбор опытных образцов секторного сечения размерами 100×100×100 мм и 150×150×150 мм (базовый образец для изучения свойств конструкции в целом) из бетонной стойки путем послойного выпиливания в соответствии с ГОСТ 28570-90;

- определение плотности и прочности на сжатие бетонных образцов одной серии, в том числе на базовых образцах, в нормальных условиях;

- нагрев остальных серий образцов со скоростью роста температуры в печи 120–150 °С/ч до температур 200, 400, 600 и 800 °С соответственно, 4-часовая выдержка при заданной температуре и последующее охлаждение со скоростью остывания печи;

- определение плотности, прочности на сжатие образцов, а также количества удаленной воды из их структуры после нагрева.

Полученные данные по оценке структурной неоднородности центрифугированного бетона приведены в таблице 1.

**Таблица 1. – Физико-механические свойства центрифугированного бетона в нормальных условиях [2]**

| Слой (относительная толщина $\delta$ ) | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Фактический предел прочности на сжатие, МПа |
|--|------------------------------|---|
| Внутренний (0,3125)                    | 2369 ± 164                   | 33,6 ± 5,0                                  |
| Средний (0,5)                          | 2522 ± 182                   | 41,3 ± 5,8                                  |
| Наружный (0,6875)                      | 2560 ± 202                   | 45,1 ± 9,1                                  |
| Образец в целом (0,5)                  | 2479 ± 136                   | 41,3 ± 5,4                                  |

*Примечание.* Под относительной толщиной понимается отношение расстояния от внутренней поверхности бетонной стойки до рассматриваемой точки к толщине стойки.

Учитывая повышение однородности в поперечном сечении центрифугированных железобетонных конструкций с уменьшением их толщины [2], были получены зависимости плотности центрифугированного бетона  $\rho_c$ , его сопротивления сжатию  $f_c$  от местоположения в конструкции и ее толщины:

$$\rho_c(\delta, b) = \rho_{c0} \cdot (1,002 - 0,64b + 1,2b\delta); \quad (1)$$

$$f_c(\delta, b) = f_{c0} \cdot (0,975 - 2,36b + 4,6b\delta), \quad (2)$$

где характеристика с индексом 0 соответствует конструкции в целом,  $b$  – толщина конструкции, м.

На рисунке 1 сплошными линиями показан характер изменения плотности бетонных образцов при нагреве, а штриховыми – количество удаленной воды из их структуры [2].

Плотность центрифугированного бетона с повышением температуры описывается следующими эмпирическими зависимостями [3]:

при 20–200 °С:  $\rho_c(\theta, \delta, b) = \rho_c(\delta, b) \cdot \left[ 1 - 0,053 \cdot \frac{\theta - 20}{180} \right] \cdot \left[ 1 + (\delta - 0,5) \cdot 0,59b \cdot \frac{\theta - 20}{180} \right];$

при 200–400 °С:  $\rho_c(\theta, \delta, b) = \rho_c(\delta, b) \cdot \left[ 0,947 - 0,031 \cdot \frac{\theta - 200}{200} \right] \cdot \left[ 1 + (\delta - 0,5) \cdot \left( 0,59 + 0,18 \cdot \frac{\theta - 200}{200} \right) b \right];$

при 400–1200 °С:  $\rho_c(\theta, \delta, b) = \rho_c(\delta, b) \cdot \left[ 0,916 - 0,036 \cdot \frac{\theta - 400}{800} \right] \cdot [1 + (\delta - 0,5) \cdot 0,77b].$

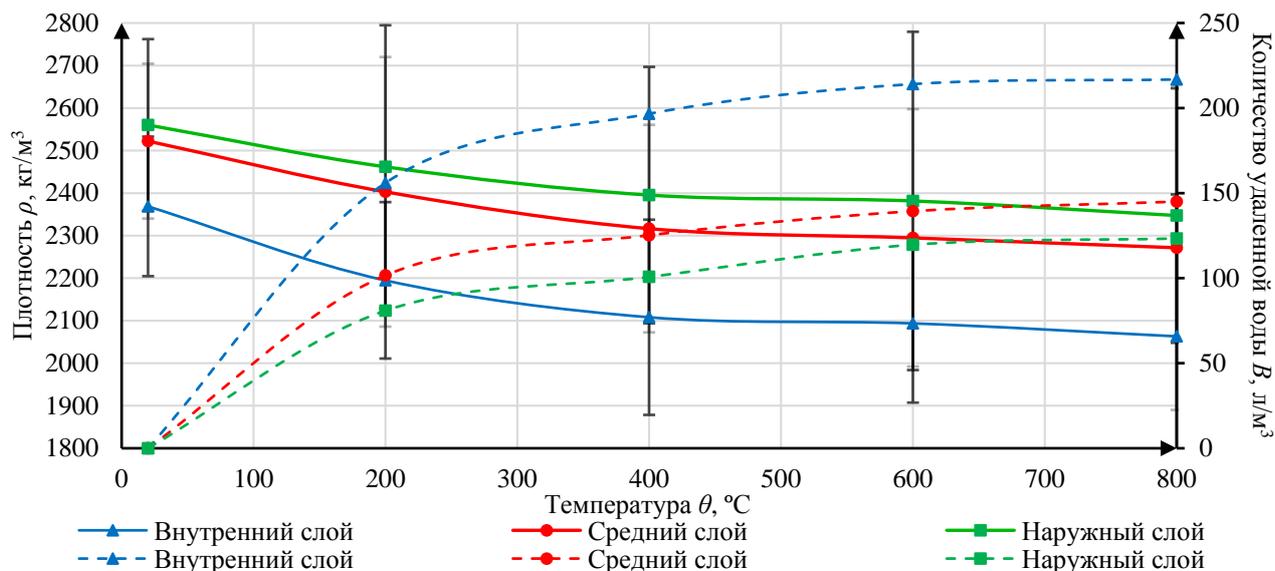


Рисунок 1. – Плотность и количество удаленной воды из структуры образцов центрифугированного бетона с ростом температуры

Стойкость центрифугированного бетона при нагреве, характеризуемая коэффициентом условий работы бетона при пожаре  $k_c(\theta)$ , изменяется от наружной к внутренней поверхности готового изделия. Более низкая стойкость к температурам до 700 °C характерна для внутренних слоев. Прочность наружного слоя при 800 °C исчерпана (рис. 2). При испытании образцов склонность к ХР не наблюдалась [4].

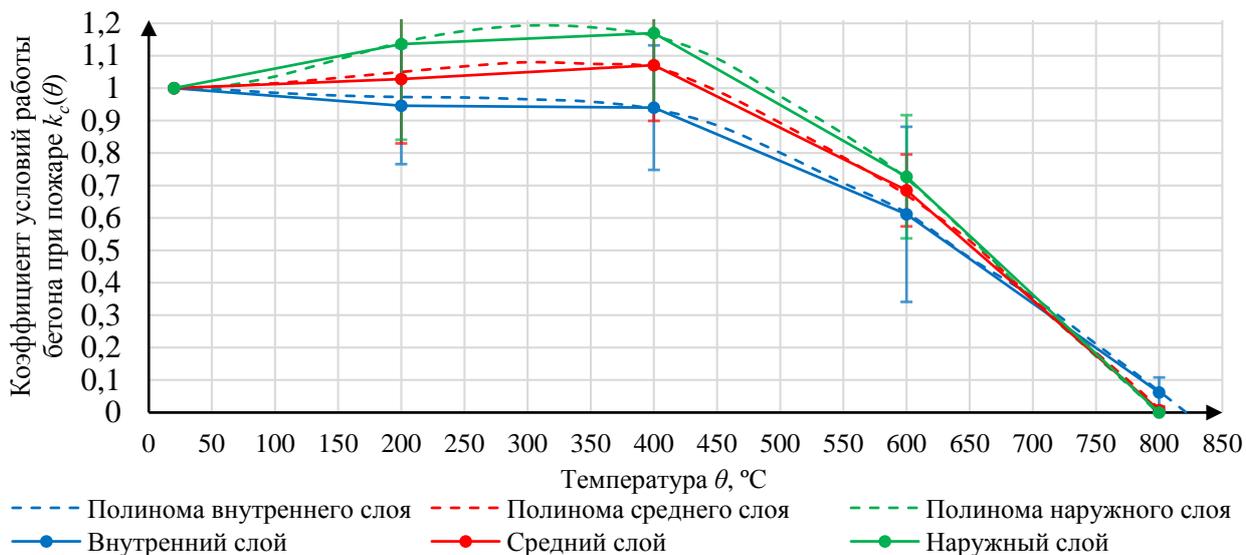


Рисунок 2. – Коэффициент условий работы бетона при пожаре  $k_c(\theta)$  для послойно выпиленных образцов из центрифугированной бетонной стойки [4]

Подробное описание характера изменения физико-механических свойств центрифугированного бетона в поперечном сечении конструкции, в том числе при высокотемпературном нагреве, приведено в работах [2; 4].

Обработка экспериментальных данных позволила получить номограмму по определению  $k_c(\theta)$  в сечении исследованной центрифугированной бетонной стойки [4], а также с учетом повышения однородности центрифугированного бетона в поперечном сечении изделий при уменьшении их толщины описать  $k_c(\theta)$  следующей зависимостью:

$$k_c(\theta) = k_{c0}(\theta)[1 + 6,25b \cdot (\delta - 0,5) \cdot \text{tg } \varphi], \quad (3)$$

где  $\text{tg } \varphi = 4,4 \cdot 10^{-12} \theta^4 - 3,8 \cdot 10^{-9} \theta^3 - 5,0 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 0,004\theta - 0,079$ .

Проведенные теоретические исследования водосодержания центрифугированной бетонной смеси  $B$  и влажности центрифугированного бетона  $W$  с учетом проведенного эксперимента [2; 3] позволили получить зависимости их изменения в поперечном сечении конструкций:

$$B(\delta, b) = B_0(0,98 + 4,71b - 9,44b\delta), \quad (4)$$

$$W(b, \delta) = W_0(1,0 + 6,1b - 12,3b\delta). \quad (5)$$

Полученные данные используются при решении статической и теплотехнической задач огнестойкости, а также при оценке возможности наступления ХР центрифугированного бетона при пожаре.

**Задача 2.** Методика натуральных испытаний центрифугированных железобетонных колонн под совместной температурно-силовой нагрузкой учитывает положения ГОСТ 30247.0-94, ГОСТ 30247.1-94 и ГОСТ Р 53309-2009 и предусматривает:

- изготовление двух центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения длиной 3,6 м наружным диаметром 560 мм с толщиной стенки 55 мм (из бетона класса по прочности на сжатие  $C^{32/40}$ ), армированных пространственным каркасом (класс продольных арматурных стержней S500);

- проектирование и возведение экспериментального фрагмента здания размером 9000×3000×2750 мм, выполненного по каркасной конструктивной схеме, который состоит из двух центрифугированных железобетонных колонн и бескапитальной безбалочной монолитной железобетонной плиты перекрытия (далее – плита);

- возведение самонесущих стен из газосиликатных блоков с заданной площадью оконных и дверных проемов по периметру фрагмента;

- определение вида и количества пожарной нагрузки и ее размещение в объеме фрагмента;

- статическое нагружение конструкций фрагмента;

- размещение измерительных устройств и оборудования;

- наблюдение за поведением конструкций фрагмента здания с момента воспламенения пожарной нагрузки до разрушения одной из испытываемых конструкций;

- измерение температуры огневой газовой среды, арматуры, бетона на внутренней поверхности колонн, в том числе в месте узла соединения с плитой, и газовой среды в полости, а также избыточного давления (далее – ИД) в полости;

- фото- и видеофиксацию конструкций в процессе испытаний и после их окончания (рис. 3).



Рисунок 3. – Испытанный фрагмент здания

Подробное описание методики испытаний, а также конструкций фрагмента приводится в работах [5; 6].

Длительность натуральных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения под нагрузкой составила 68 мин 15 с. Температурный режим в объеме фрагмента был близок к температурному режиму стандартного пожара (рис. 4). Для

более детальной оценки прогрева каждой из колонн при решении теплотехнической задачи температурные воздействия на них в дальнейшем были разграничены.

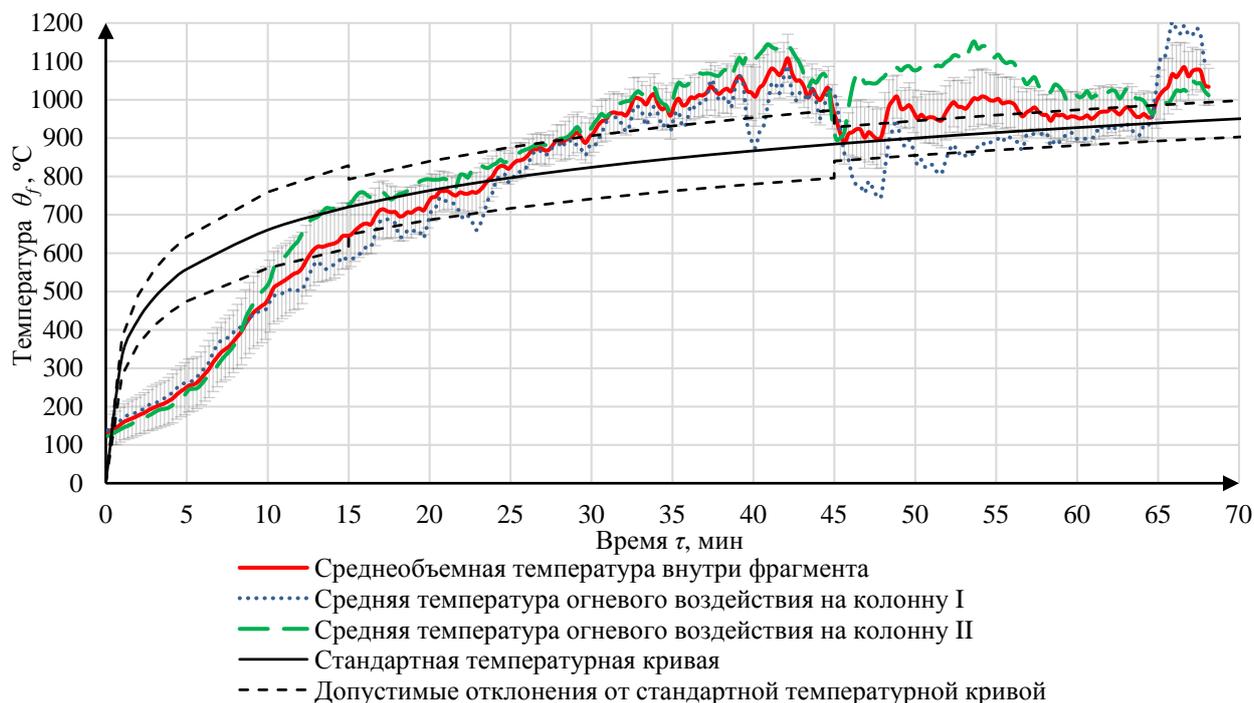


Рисунок 4. – Температура огневой газовой среды в процессе испытаний

Разрушение колонны II произошло в средней трети ее длины. Ему предшествовало образование магистральных спиралевидных трещин, направленных под углом 75–80° к плоскости земли, и нарастание деформаций изгиба (рис. 5). Разрушение колонны II привело к обрушению всего фрагмента.

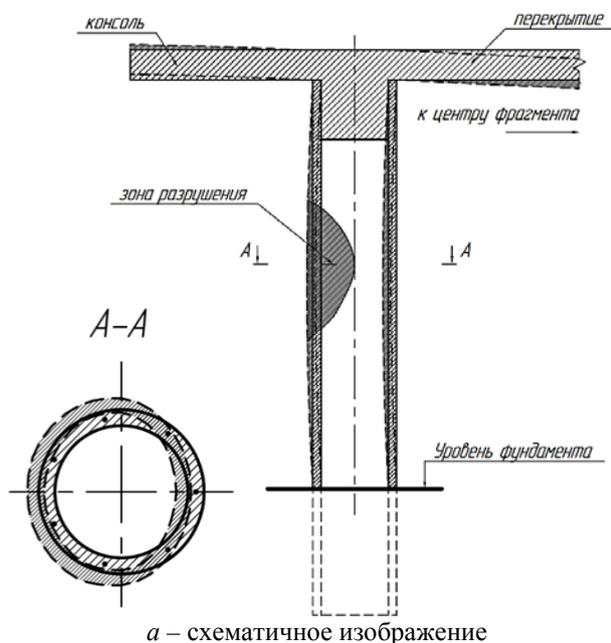


Рисунок 5. – Механизм разрушения центрифугированной железобетонной колонны при пожаре

Фактический предел огнестойкости испытанных колонн составил не менее R69. В рассматриваемой каркасной конструктивной схеме данные конструкции оказались наиболее слабыми с точки зрения огнестойкости. ХР бетона в колоннах в процессе испытаний не наблюдалось.

Анализ экспериментальных данных показал, что температура арматурных стержней в момент обрушения фрагмента в колоннах I и II составила  $(522 \pm 21)^\circ\text{C}$  и  $(882 \pm 80)^\circ\text{C}$  соответственно, бетона на их внутренней поверхности  $(517 \pm 47)^\circ\text{C}$  и  $(848 \pm 224)^\circ\text{C}$ . При этом выявлено, что стенки центрифугированных железобетонных колонн со свободной воздушной полостью имеют более высокую скорость прогрева, чем стенки в местах примыкания монолитной железобетонной шпонки (температура бетона на внутренней поверхности колонн в месте узла соединения в окончании испытаний оказалась в среднем на 224 и 314 °C соответственно ниже). Наблюдались стадии роста и стравливания ИД газовой среды в полости данных колонн. Максимальные значения ИД находились в пределах 0,15–0,16 МПа, когда внутренняя поверхность колонн прогрелась до температуры 125–140 °C, а газовая среда в полости – 110–120 °C. Характер прогрева колонн, а также изменения ИД и температуры газовой среды в их полости с течением времени испытаний, описание причин такого поведения представлены в работе [6].

Полученные данные совместно с исследованиями центрифугированного бетона позволили решить теплотехническую и статическую задачи оценки огнестойкости испытанных колонн.

**Задача 3.** Оценку предела огнестойкости колонн проводили зонным методом и методом изотермы 500 °C.

Для решения теплотехнической задачи была использована система конечно-элементного анализа *Ansys Workbench*. Объект моделирования – центрифугированные железобетонные колонны кольцевого сечения. Моделирование прогрева испытанных колонн осуществляли при теплофизических характеристиках бетона, взятых из ряда известных литературных источников<sup>6, 7, 8</sup> [7–9], а также полученных в ходе экспериментально-теоретических исследований [3]. Теплофизические характеристики стали во всех случаях взяты из ТКП EN 1993-1-2-2009<sup>9</sup>. Параметры теплообмена между огневой газовой средой и обогреваемой поверхностью колонн приняты в соответствии с источником, из которого взята информация о теплофизических характеристиках бетона. Расчет параметров теплообмена между внутренней поверхностью испытанных колонн и газовой средой в их полости приведен в работе [10]. Поперечное сечение конструкции подвергнуто равномерному тепловому воздействию по внешнему периметру. Расчетная схема нагрева и краевые условия представлены на рисунке 6.

С учетом оптимальных временных затрат и недопущения существенных погрешностей размеры ячейки (*Mesh*) приняты равными для бетона 2,75 мм (1/20 толщины стенки), для арматуры – 1,2 мм (1/10 диаметра).

В ходе решения теплотехнической задачи было выявлено отсутствие влияния газовой среды в полости конструкций кольцевого сечения, обогреваемых равномерно по всему наружному периметру, на температурное поле в них.

Далее производилась оценка влияния структурных и конструктивных особенностей центрифугированных железобетонных конструкций на их прогрев. Оценка влияния неоднородности центрифугированного бетона позволила получить коэффициент ускорения прогрева центрифугированной железобетонной конструкции за счет неоднородности бетона в ее поперечном сечении  $k_{het}$  (показывает отношение температуры бетона в неоднородной конструкции к его температуре в однородной) [11]:

$$k_{het} = 0,99 + 0,5b . \quad (6)$$

<sup>6</sup> См. сноску 2.

<sup>7</sup> См. сноску 3.

<sup>8</sup> См. сноску 4.

<sup>9</sup> Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1993-1-2-2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 80 с.

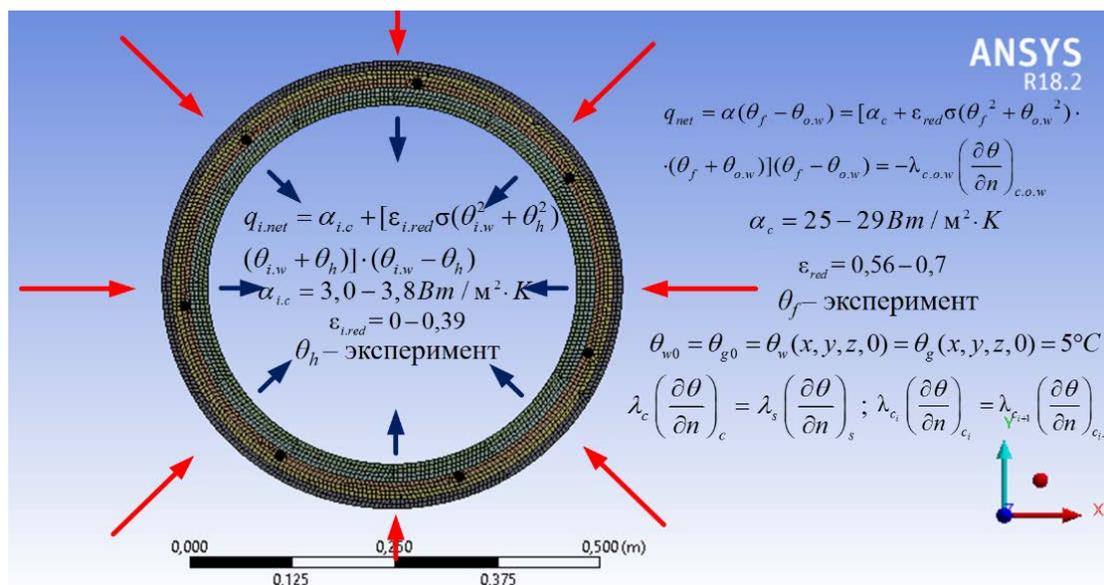


Рисунок 6. – Расчетная модель нагрева центрифугированной железобетонной колонны кольцевого сечения

Оценка влияния тонкостенности центрифугированных железобетонных конструкций на ускорение прогрева их сечения за счет раскрытия трещин в бетоне при пожаре производилась путем анализа экспериментальных температур до и после раскрытия трещин в колонне II. Это позволило установить зависимость коэффициента  $k_{th}$ , который учитывает данную составляющую прогрева изучаемых конструкций (равен не менее 1) [11; 12]:

$$k_{th} = 1 + 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot (\theta_w - \theta_{crc.b}) \leq 1,40, \quad (7)$$

где  $\theta_w$  – температура материала в сечении конструкции без учета трещинообразования, °C;  $\theta_{crc.b}$  – температура начала раскрытия трещин, принимаемая равной 550 °C [12].

Моделирование прогрева серий железобетонных колонн кольцевого и круглого сечений заданных диаметров, подвергнутых стандартному огневому воздействию, в разрезе полного факторного эксперимента позволило оценить увеличение температур в сечении полых железобетонных колонн, обогреваемых по всему наружному периметру. Полученный в результате коэффициент  $k_{hol}$ , учитывающий данный эффект, адекватно корректирует формулу расчета температур в сечении конструкций круглого сечения из ТКП 45-2.02-110<sup>10</sup> для конструкций кольцевого сечения [13]. Дополнительно коэффициентами  $k_{het}$  и  $k_{th}$  формула [13] была адаптирована для расчета температур в сечении центрифугированных железобетонных конструкций кольцевого сечения, подвергаемых воздействию стандартного температурного режима по всему наружному периметру [11–13]:

$$\theta_w = (\theta_{w0} + 1200 \cdot (1-r)^2 \cdot \sqrt{D/(D-2x)}) \cdot k_{hol} \cdot k_{het} \cdot k_{th}, \quad (8)$$

где  $D$  – диаметр конструкции, м;  $x$  – расстояние от обогреваемой поверхности до рассматриваемой точки, м;  $r$  – относительное расстояние<sup>11</sup>.

Методика решения теплотехнической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных конструкций сводится к моделированию их прогрева в программном комплексе (далее – ПК) *Ansys Workbench* (при теплофизических характеристиках бетона по ТКП EN 1992-1-2-2009, стали по ТКП EN 1993-1-2-2009, граничных условиях по СН 2.01.03-2019<sup>12</sup>) и корректировке полученного температурного поля коэффициентами  $k_{het}$  и  $k_{th}$ . В случае воздействия по всему наружному периметру конструкции стандартного температурного

<sup>10</sup> См. сноску 3.

<sup>11</sup> См. сноску 3.

<sup>12</sup> Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Введ. 01.01.10 (с отменой ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250)). – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 43 с.

режима пожара для решения теплотехнической задачи допускается использование адаптированной для центрифугированных железобетонных колонн формулы (8).

Проведенное моделирование прогрева испытанных колонн с учетом  $k_{het}$  и  $k_{th}$  при воздействии реальных температур греющей среды, а также расчет по формуле (8) показали приемлемую сходимость полученных температур с экспериментальными (рис. 11).

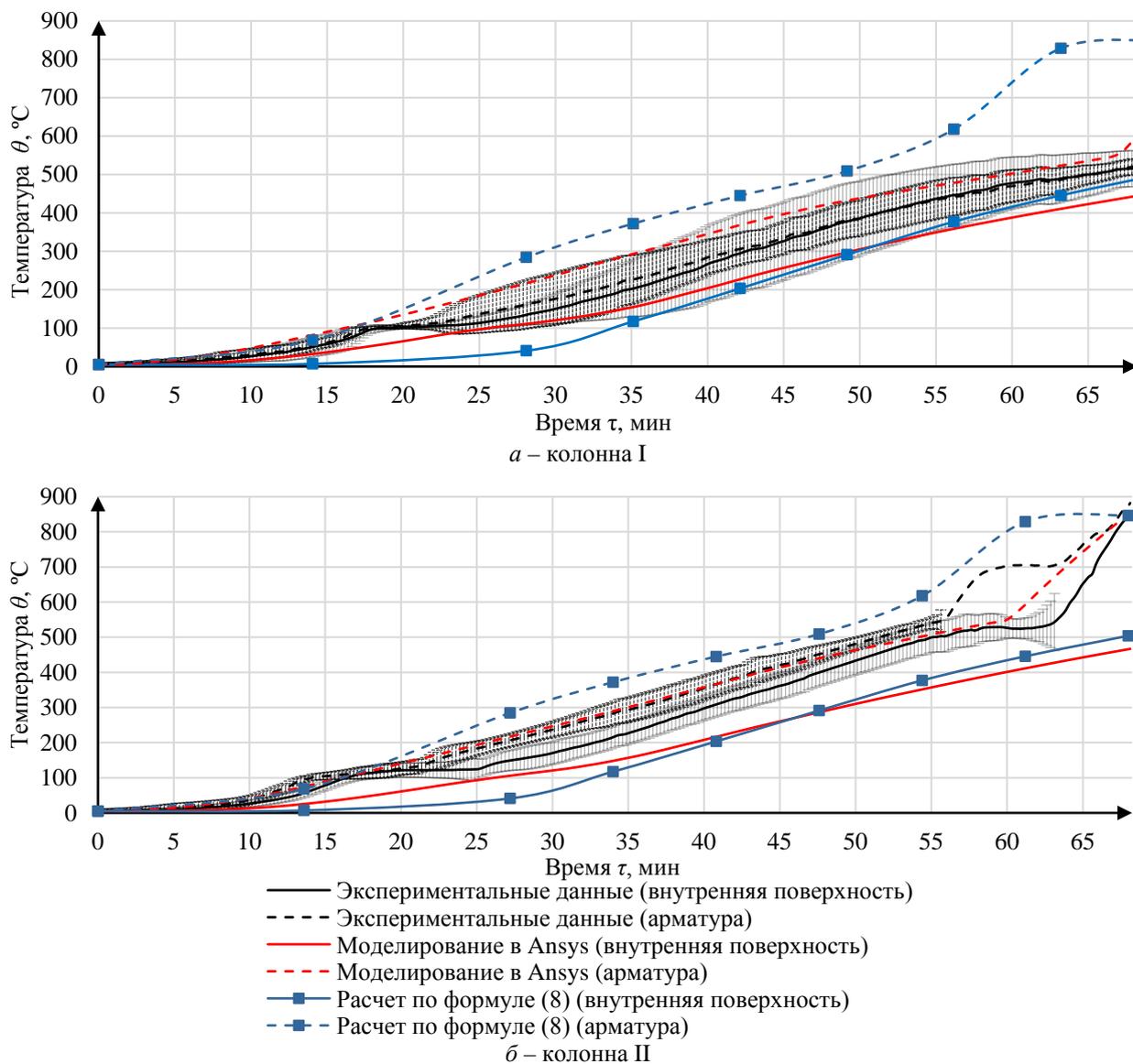


Рисунок 7. – Сопоставление экспериментальных и теоретических температур в сечении испытанных конструкций

Значения температур, полученные в ходе проведения теплотехнического расчета, в дальнейшем используются в статической части, которая решает задачу определения сопротивления колонн и статических усилий в заданный момент времени огневого воздействия.

Продольные усилия и изгибающие моменты от внешнего воздействия в поперечных сечениях колонн в начальных условиях определялись путем проведения статического расчета смоделированной рамы в ПК ЛИРА-САПР 2013 R5 (рис. 8). В модели учитывались фактическое расположение статической нагрузки на плите перекрытия, собственный вес элементов и их механические характеристики. При этом значения изгибной жесткости использованы с коэффициентами 0,4 для колонн и 0,3 – для плиты<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Бетонные и железобетонные конструкции: СП 5.03.01-2020. – Введ. 01.07.03 (с отменой на территории Респ. Беларусь СНиП 2.03.01-84 и СНБ 5.03.01-02). – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 244 с.

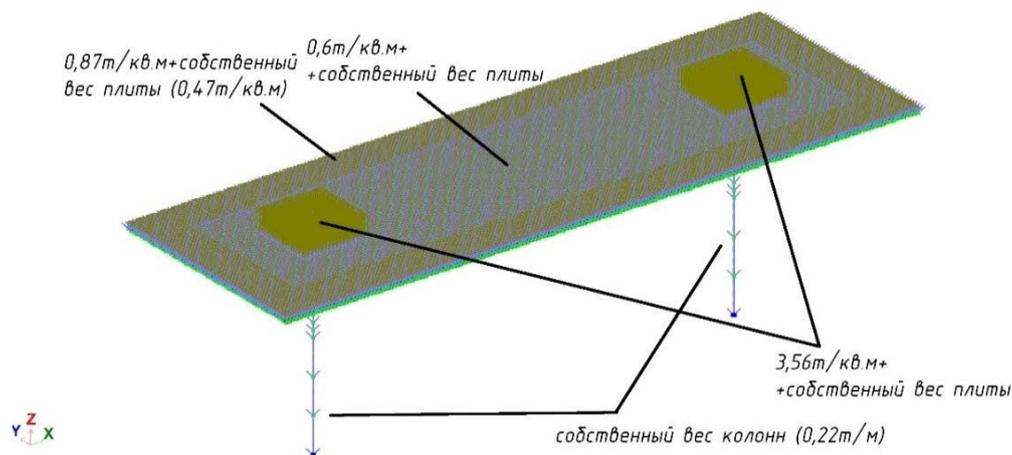


Рисунок 8. – Модель рамы для статического расчета

Продольная сила  $N_{Ed,fi}$  в процессе испытаний принята неизменной и равной 183 кН (среднее среди значений во всех сечениях). Суммарный изгибающий момент в заданном сечении колонн  $M_{Ed,fi}$  от внешнего воздействия был изменчивым в процессе огневых испытаний (задача 2) и определялся по формуле:

$$M_{Ed,fi} = N_{Ed,fi} (e_c \eta_a + e_0 + e_f + e_t), \quad (9)$$

где  $e_c$  – эксцентриситет продольной силы относительно центра тяжести сечения колонн в начальных условиях, м;  $\eta_a$  – коэффициент, учитывающий влияние продольного изгиба колонны на ее несущую способность, м;  $e_0$  – случайный эксцентриситет, принятый равным 0,02 м<sup>14</sup>;  $e_f$  – эксцентриситет продольной силы относительно центра тяжести приведенного сечения колонны, обусловленный ее поворотом вследствие прогиба плиты при пожаре, м;  $e_t$  – эксцентриситет от огневого воздействия (температурный), принятый равным 0 при всестороннем обогреве<sup>15</sup> [9].

Поскольку во время испытаний разрушение колонны II началось в пределах средней трети ее длины, значения изгибающего момента и продольного усилия для определения  $e_c$  выбраны из сечения в средней трети длины колонны, в котором изгибающий момент максимален.

Так как железобетонная шпонка на протяжении всего времени испытаний являлась составной частью плиты (ее среза не произошло), значения  $e_f$  для каждой из опытных колонн определялись из геометрических соображений (рис. 9).

Перемещения плиты  $f_s$  и  $f_{kl}, f_{kn}$  во время испытаний взяты из работы [14].

При определении несущей способности колонн руководствовались результатами исследований внецентренно сжатых элементов кольцевого сечения [15], которые получили распространение в ТНПА<sup>16, 17</sup>. Значения механических характеристик бетона и арматуры взяты из ТКП EN 1992-1-1-2009<sup>18</sup> исходя из их класса, а характер изменения механических характеристик с ростом температуры – из ТКП EN 1992-1-2-2009<sup>19</sup>. В статической части рас-

<sup>14</sup> См. сноску 13.

<sup>15</sup> См. сноску 5.

<sup>16</sup> Руководство по проектированию, изготовлению и применению железобетонных центрифугированных конструкций кольцевого сечения // Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1979. – 144 с.

<sup>17</sup> Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: СП 63.13330.2018 – Введ. 20.06.19. – М.: Минстрой России, 2018. – 150 с.

<sup>18</sup> Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250). – Введ. 10.12.09. – Минск: Мин-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 207 с.

<sup>19</sup> См. сноску 4.

чета при использовании зонного метода была учтена неоднородность механических характеристик центрифугированного бетона в поперечном сечении конструкции введением поправочного коэффициента  $k_{cor}$  при определении приведенного коэффициента снижения прочности бетона на сжатие  $k_c$ :

$$k_c = \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{0,2}{n} \right) \cdot \sum_{i=1}^n c_i \cdot k_{cor,i} \cdot k_{c,i}(\theta), \quad (10)$$

где  $n$  – количество зон;  $c_i$  – доля площади  $i$ -й зоны от общей площади сечения бетона.

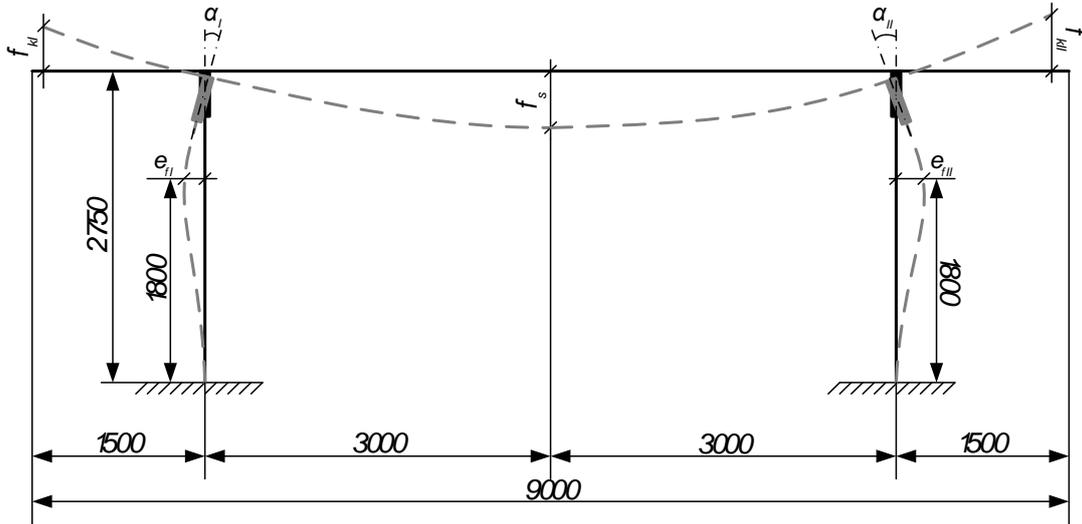


Рисунок 9. – Схема рамы к определению  $e_f$

Коэффициент  $k_{cor}$  определяется следующим образом [4]:

$$k_{cor} = k_t \cdot k_p, \quad (11)$$

где  $k_t$  – коэффициент, учитывающий различие в  $k_c(\theta)$  по сечению конструкции при заданной температуре, определяемый исходя из формулы (3):

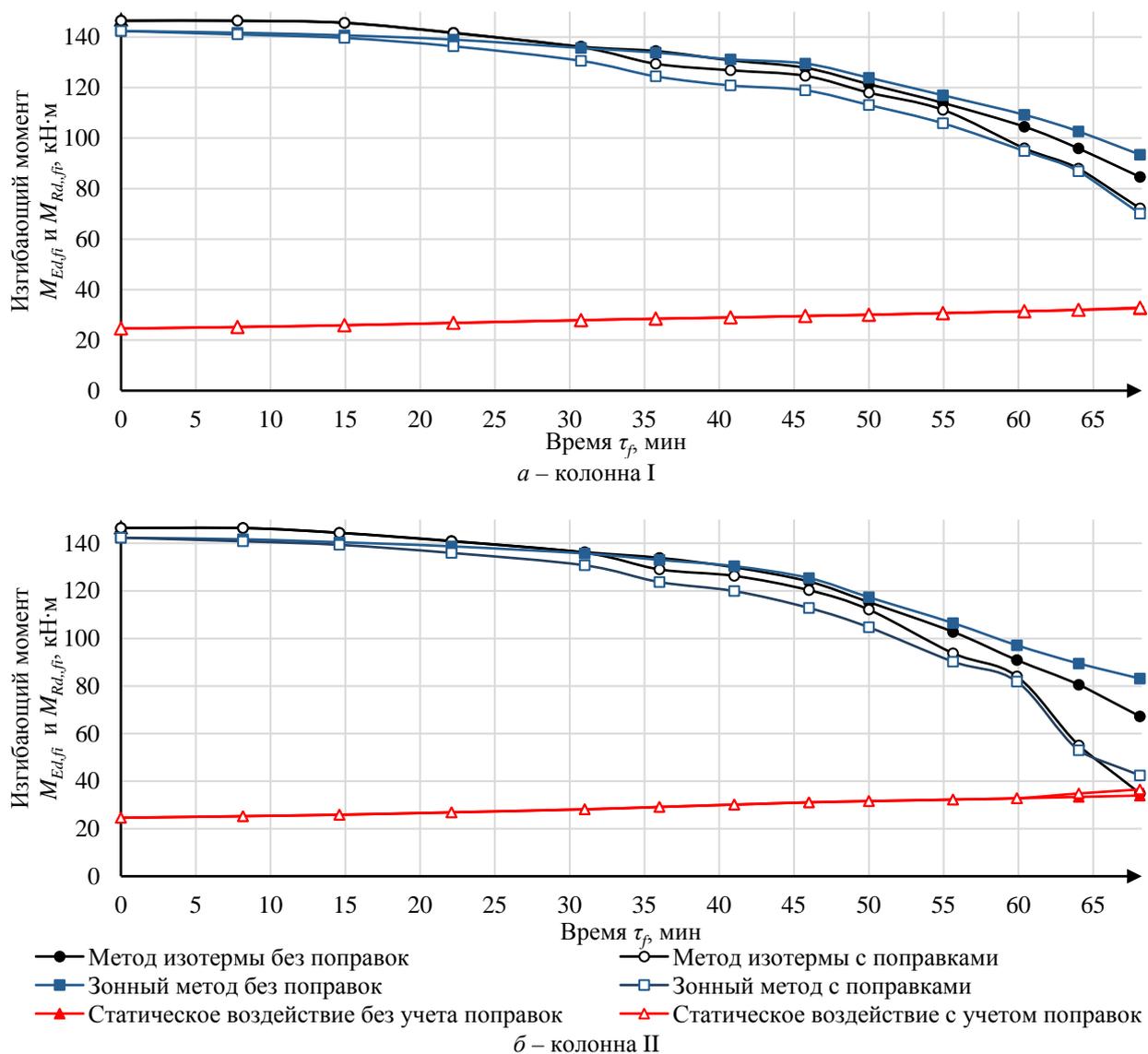
$$k_t = 1 + 6,25b \cdot (\delta - 0,5) \cdot \operatorname{tg} \varphi(\theta), \quad (12)$$

$k_p$  – коэффициент, учитывающий различие прочности центрифугированного бетона по сечению конструкции в нормальных условиях, определяемый из формулы (2):

$$k_p = 0,975 - 2,3b + 4,6b\delta. \quad (13)$$

Соппротивление испытанных колонн изгибающему моменту и действующие изгибающие моменты в заданные моменты времени испытаний, рассчитанные с учетом структурных и конструктивных особенностей центрифугированных железобетонных конструкций и без данного учета, представлены на рисунке 10.

Поскольку при проведении натурных испытаний центрифугированных железобетонных колонн под совместной температурно-силовой нагрузкой (задача 2) разрушение колонны II привело к обрушению всего испытываемого фрагмента, анализ результатов расчета проведем на ней (табл. 2).



**Рисунок 10. – Сопротивление центрифугированных железобетонных колонн и действующие изгибающие моменты на них во время огневых испытаний**

**Таблица 2. – Результаты расчетов предела огнестойкости испытанных центрифугированных железобетонных колонн**

| Метод расчета               | Предел огнестойкости, мин |   | Отклонение результатов расчета от эксперимента, % |
|-----------------------------|---------------------------|---|---|
|                             | Расчет                    | Эксперимент                               |   |
| Зонный метод с поправками   | 70,1                      | 68,25 <sup>-0,002</sup> <sub>-0,005</sub> | 2,7   |
| Зонный метод без поправок   | 78,3                      |   | 14,7  |
| Метод изотермы с поправками | 67,8                      |   | -0,7  |
| Метод изотермы без поправок | 97,4                      |   | 42,7  |

*Примечание.* Знак «-» указывает на отклонение в меньшую сторону от экспериментального значения, отсутствие знака – в большую.

Расчет предела огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн традиционными методами не обеспечивает соответствующей безопасности при пожаре (табл. 2). Вместе с тем расчетное значение предела огнестойкости, полученное зонным методом с учетом конструктивных и структурных особенностей центрифугированных железобетонных конструкций, больше экспериментального всего на 2,7 %, а предел огнестойкости, рассчитанный методом изотермы с учетом поправок в теплотехнической части, вовсе оказался

ниже экспериментального на 0,7 %. Различие связано с пренебрежением температурным эксцентриситетом в формуле (9) и изгибающими моментами в сечении колонн, возникающими вследствие температурного расширения плиты.

**Задача 4.** Во время огневых испытаний (задача 2) доля пара, образующегося из физически и химически связанной воды в бетоне при нагреве конструкций, попадала во внутреннюю замкнутую полость колонн. Нагрев колонн и паровоздушной смеси (далее – ПВС) в их полости сопровождался ростом ИД в ней [6]. ИД ПВС в полости колонн по сравнению с приведенным сопротивлением бетона растяжению пренебрежимо мало, и оно не привело к преждевременной потере колоннами своей несущей способности при пожаре. В связи с этим в расчетах огнестойкости данное явление допустимо не учитывать.

В процессе анализа экспериментальных данных были выявлены причины отсутствия ХР бетона в центрифугированных железобетонных колоннах кольцевого сечения при проведении огневых испытаний:

- повышение газопроницаемости бетона при нагреве колонн (в нормальных условиях она составляет 0,8 МПа) (способствуют температурные деформации и трещинообразование в колоннах);

- наличие негерметичности в области сопряжения смежных конструкций (вследствие их деформирования);

- большая площадь поверхности (помимо внешней поверхности имеется внутренняя) по сравнению с конструкциями сплошного сечения (происходит усиленная фильтрация образующегося пара, что приводит к более интенсивному снижению давления в порах и капиллярах бетона);

- более эффективное перераспределение усилий в конструкциях кольцевого сечения (не образуются чрезмерно прогретые зоны подобно углам конструкций прямоугольного сечения);

- неоднородная структура бетона в поперечном сечении колонн (увеличение прочности бетона и снижение водосодержания от внутренней поверхности к периферии).

На основании экспериментальных исследований неоднородности центрифугированного бетона (задача 1) и теоретических исследований ряда характеристик, входящих в критерий ХР бетона по В.В. Жукову<sup>20, 21</sup>, была получена зависимость поправочного коэффициента  $T_{sc}$  для оценки данного критерия в центрифугированных железобетонных конструкциях различной толщины:

$$T_{sc} \approx \frac{(0,975 + 2,24b - 2,3m)^{0,3} \cdot (1 - 6,2b + 6,15m)}{(1,002 + 0,56b - 0,6m)^{0,13} \cdot (0,98 - 4,73b + 4,72m)}, \quad (14)$$

где  $m$  – толщина защитного слоя бетона, м.

Определенные по формуле (14) значения  $T_{sc}$  для серии центрифугированных железобетонных колонн оказались меньше 1 (табл. 3), что свидетельствует о сниженной склонности центрифугированного бетона к ХР при пожаре по отношению к вибрированному бетону.

**Таблица 3. – Значения коэффициента  $T_{sc}$**

| Толщина конструкции $b$ , мм           | 50   |      | 60   |      | 80   |      | 100  |      | 120  |      |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Толщина защитного слоя бетона $m$ , мм | 10   | 20   | 10   | 25   | 12   | 34   | 12   | 44   | 14   | 53   |
| Коэффициент $T_{sc}$                   | 0,97 | 0,98 | 0,95 | 0,97 | 0,91 | 0,95 | 0,84 | 0,93 | 0,75 | 0,91 |

*Примечание.* Промежуточные значения  $T_{sc}$  определяются линейной интерполяцией.

**Задача 5.** Решение задач 1–3 позволило разработать методику расчета пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн (рис. 17), которая учитывает:

<sup>20</sup> См. сноску 4.

<sup>21</sup> См. сноску 5.

- неоднородность характеристик центрифугированного бетона в поперечном сечении изделий, способствующую более скорому прогреву сечения [11] и снижению механических показателей бетона [4];
- наличие воздушной полости в изделиях, которая позволяет практически всему количеству теплоты, получаемой конструкцией при пожаре, аккумулироваться в сплошной части структуры конструкции [13];
- тонкостенность изделия, способствующая более раннему наступлению трещинообразования в конструкции и вследствие этого усиливающемуся прогреву [6].

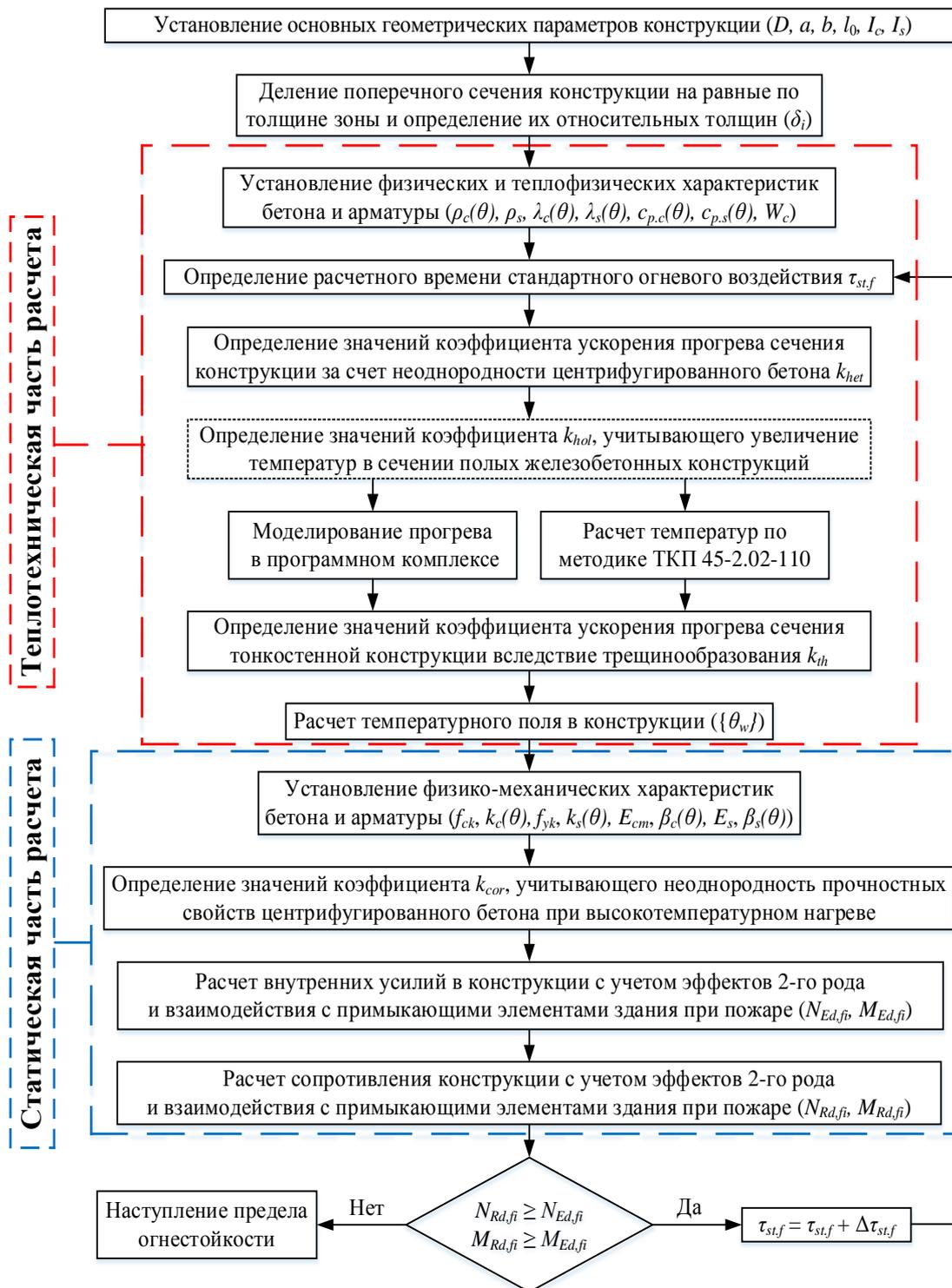


Рисунок 11. – Методика расчета пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн

При оценке пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн в соответствии с разработанной методикой используется зонный метод или метод изотермы 500 °С.

Проведенный с использованием зонного метода расчет пределов огнестойкости серии колонн<sup>22</sup> (коэффициент условий закрепления конструкции не более 0,7) при различном коэффициенте использования их несущей способности  $\eta$  позволил свести полученные результаты в таблицу 4.

Таблица 4. – Предел огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн

| Диаметр $D$ , мм | Толщина $b$ , мм | Коэффициент использования несущей способности $\eta$ |  |        |  |    |  |      |  |    |  |    |  |      |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|------------------|------------------|--|--|--------|--|----|--|------|--|----|--|----|--|------|--|----|--|----|--|--------|--|--------|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|--------|--|--------|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|----|--|
|                  |                  | 0,15   |  |        |  |    |  | 0,3  |  |    |  |    |  | 0,5  |  |    |  |    |  | 0,7    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  |                  | Расстояние до оси арматуры $c$ , мм                  |  |        |  |    |  |      |  |    |  |    |  |      |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  |                  | 20-21*   |  | 25-27* |  | 30 |  | 35   |  | 40 |  | 45 |  | 50   |  | 55 |  | 60 |  | 20-21* |  | 25-27* |  | 30 |  | 35 |  | 40 |  | 45 |  | 50 |  | 55 |  | 60 |  | 20-21* |  | 25-27* |  | 30 |  | 35 |  | 40 |  | 45 |  | 50 |  | 55 |  | 60 |  |
| 300              | 50               | R45  |  |        |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R30    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 60               | R60  |  |        |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R45    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| 400              | 50               | R45  |  |        |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R30    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 60               | R60  |  |        |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R45    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 70               | R90  |  |        |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| 500              | 50               | R45  |  |        |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R30    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 60               | R60  |  |        |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R45    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 70               | R90  |  |        |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| 600              | 60               | R60  |  |        |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R45    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 70               | R90  |  |        |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 80               | R120   |  |        |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R90    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 100              | R120   |  |        |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R90    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| 700              | 60               | R60  |  |        |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R45    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 70               | R90  |  |        |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 80               | R120   |  |        |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R90    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 100              | R120   |  |        |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R90    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| 800              | 60               | R60  |  |        |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R45  |  |    |  |    |  | R45    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 70               | R90  |  |        |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 80               | R120   |  |        |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R90    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 90               | R150   |  |        |  |    |  | R150 |  |    |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R120   |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 110              | R180   |  |        |  |    |  | R180 |  |    |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R120   |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 120              | R180   |  |        |  |    |  | R180 |  |    |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R120   |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
| 1000             | 80               | R90  |  |        |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60  |  |    |  |    |  | R60    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 90               | R120   |  |        |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R90  |  |    |  |    |  | R90    |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 100              | R150   |  |        |  |    |  | R150 |  |    |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R120   |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |
|                  | 110              | R180   |  |        |  |    |  | R180 |  |    |  |    |  | R120 |  |    |  |    |  | R120   |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |        |  |        |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |    |  |

Примечание. \* – обеспечивается выполнением требований<sup>23, 24</sup>.

<sup>22</sup> См. сноску 16.

<sup>23</sup> См. сноску 13.

<sup>24</sup> См. сноску 16.

По таблице 4 без проведения расчета можно оценить предел огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн, а также установить параметры данных изделий, позволяющие обеспечить требуемый предел огнестойкости (табличный метод).

### **Заключение**

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана методика и выполнены исследования физико-механических свойств центрифугированного бетона в нормальных условиях и при высокотемпературном нагреве. Произведена оценка неоднородности физико-механических свойств центрифугированного бетона по сечению готового изделия в заводских условиях с учетом его толщины. Выявлено различие в относительном изменении физико-механических характеристик бетона при нагреве в зависимости от его расположения в поперечном сечении конструкции.

2. Установлены экспериментальные зависимости коэффициента условий работы центрифугированного бетона при пожаре. Стойкость центрифугированного бетона при нагреве изменяется от наружной к внутренней поверхности готового изделия. Более низкая стойкость к температурам до 700 °С характерна для внутренних слоев. При более высоких температурах они более стойки из-за меньшего содержания в своей структуре крупного заполнителя. Исчерпание прочности центрифугированного бетона на сжатие в периферийных слоях происходит при температуре, не превышающей 800 °С.

3. Разработана методика и проведены натурные испытания центрифугированных железобетонных колонн под совместной температурно-силовой нагрузкой (в составе фрагмента здания, выполненного по каркасной конструктивной схеме). Экспериментально установлена схема разрушения внецентренно-сжатых центрифугированных железобетонных колонн при пожаре, а также изучено их поведение при пожаре. Получены экспериментальные данные по прогреву центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения, подверженных огневому воздействию (близкому к стандартному) по всему наружному периметру, а именно: зависимости температур арматуры и бетона на внутренней поверхности конструкций от времени. Выявлено, что стенки колонн в месте узлового соединения с плитой перекрытия (примыкание монолитной железобетонной шпонки) имеют более низкую скорость прогрева. При этом зафиксированы экспериментальные значения температуры и избыточного давления газовой среды в полости данных колонн в процессе огневого воздействия.

4. Выявлена экспериментально и подтверждена теоретически сниженная склонность центрифугированного бетона к хрупкому взрывообразному разрушению при пожаре по отношению к вибрированному бетону. Усовершенствована для центрифугированных железобетонных конструкций методика оценки возможности наступления хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре, предложенная В.В. Жуковым.

5. Решены теплотехническая и статическая задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн, в том числе с применением метода конечных элементов в программно-вычислительных комплексах Ansys Workbench и ЛИРА-САПР. Установлены влияние неоднородности центрифугированного бетона в поперечном сечении изделий на их прогрев и снижение механических показателей бетона, а также влияние воздушной полости и тонкостенности изделий на их прогрев и несущую способность. Выявлено, что зонный метод и метод изотермы 500 °С, учитывающие особенности данных конструкций, допустимо применять при оценке их огнестойкости, а игнорирование указанных особенностей небезопасно с точки зрения обеспечения пожарной безопасности.

6. Разработана методика расчета пределов огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн, которая учитывает структурные и конструктивные особенности данных изделий путем использования соответствующих поправочных коэффициентов. Разработан табличный метод определения пределов огнестойкости серии центрифугированных железобетонных колонн.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шагая в ногу со временем / В.Г. Казачек [и др.] // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. – 2014. – № 16. – С. 111–113.
2. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона / И.И. Полевода [и др.] // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 319–329. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329.
3. Нехань, Д.С. Физические и теплофизические характеристики центрифугированного бетона в тонкостенных конструкциях / Д.С. Нехань // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 2 дек. 2020 г. / ФГБОУ ВО «Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т». – Уфа, 2020. – С. 25–27.
4. 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.
5. Исследования температуры газовой среды при проведении натуральных огневых испытаний строительных конструкций / Д.С. Нехань [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 130–141. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
6. Полевода, И.И. Результаты натуральных огневых испытаний центрифугированных железобетонных колонн кольцевого сечения / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 142–159. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.
7. Огнестойкость зданий / В.П. Бушев [и др.]; под общ. ред. В.А. Пчелинцева. – М.: Стройиздат, 1970. – 262 с.
8. Милованов, А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
9. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
10. Полевода, И.И. Определение параметров теплообмена между внутренней поверхностью железобетонных колонн кольцевого сечения и газовой средой в их полости для решения теплотехнической задачи огнестойкости / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Пожарная и аварийная безопасность: сб. материалов XV Междунар. науч.-практ. конф., посв. 30-й годовщине МЧС России, Иваново, 17–18 нояб. 2020 г. / ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – Иваново, 2020. – С. 349–352.
11. Полевода, И.И. Решение теплотехнической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 2. – С. 49–70. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.49-70.
12. Нехань, Д.С. Огнестойкость сжато-изгибаемых центрифугированных железобетонных конструкций / Д.С. Нехань, И.И. Полевода // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 7–8 апр. 2021 г. / Ун-т гражданской защиты МЧС Беларуси. – Минск, 2021. – С. 211–213.
13. Нехань, Д.С. Расчет температурного поля в сечении полых железобетонных колонн, обогреваемых по всему наружному периметру / Д.С. Нехань // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: сб. материалов Всероссийской науч.-практ. конф., посв. 30-летию МЧС России, Урал, 14–16 дек. 2020 г. / ФГБОУ ВО Уральский ин-т ГПС МЧС России. – Екатеринбург, 2021. – С. 122–127.
14. Результаты натуральных огневых испытаний железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 49–66. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49.
15. Баташев, В.М. Прочность, трещиностойкость и деформации железобетонных элементов с многорядным армированием. – Киев: Будівельник, 1978. – 120 с.
16. Нехань, Д.С. Вплив надлишкового тиску газового середовища в порожнини центрифугованих залізобетонних конструкцій на їх несучу здатність при пожежі / Д.С. Нехань, І.І. Полевода // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XII Міжнар. науково-практ. конф., Черкаси, 8–9 кві. 2021 г. / Черкаський ін-т пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного ун-ту цивільного захисту України: редкол. – Черкаси, 2021. – С. 201–203.

**Огнестойкость центрифугированных железобетонных колонн**  
**Fire resistance of spun reinforced concrete columns**

***Полевода Иван Иванович***

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: ip@ucp.by

ORCID: 0000-0003-2469-3553

***Ivan I. Palevoda***

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: ul. Mashinostroiteley, 25,  
220118, Minsk, Belarus

e-mail: ip@ucp.by

ORCID: 0000-0003-2469-3553

***Нехань Денис Сергеевич***

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

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: denis\_nechany@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7838-4663

***Denis S. Nekhan'***

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

Address: ul. Mashinostroiteley, 25,  
220118, Minsk, Belarus

e-mail: denis\_nechany@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7838-4663

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.139>

## FIRE RESISTANCE OF SPUN REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Palevoda I.I., Nekhan' D.S.

*Purpose.* On the basis of experimental and theoretical studies to study the fire resistance of reinforced concrete columns made by spinning.

*Methods.* Experimental and theoretical studies of physical, mechanical and thermophysical characteristics of spun concrete under normal conditions and at high temperature heating. Full-scale test of spun reinforced concrete columns under joint temperature and static loads. Analytical solution of thermal and static problem of fire resistance of spun reinforced concrete columns. Simulating based on Ansys Workbench and LIRA-SAPR platforms.

*Findings.* The difference in the physical and mechanical characteristics of spun concrete in the cross-section of structures of a given thickness under normal conditions, as well as the difference in their relative change during high-temperature heating are revealed. Experimental dependences of working factor conditions of spun concrete at a fire have been established. A reduced tendency of spun concrete to brittle explosive destruction at a fire was revealed in relation to vibrated concrete. The influence of the heterogeneity of centrifuged concrete in the cross-section of the products, the thinness of the walls and the air cavity of the products on their fire resistance has been established. The destruction mechanism of spun reinforced concrete columns in case of fire has been established experimentally, and their behavior in case of fire has been studied. A reduced tendency of spun concrete to explosive destruction at a fire was revealed in relation to vibrated concrete. A method for calculating fire resistance limits of spun reinforced concrete columns has been developed. A tabular method for estimating the fire resistance of a series of spun reinforced concrete columns has been developed.

*Application field of research.* The results of the study can be used for the estimation of fire resistance limits of spun concrete columns, as well as for the development of amendments to technological regulations in the field of estimation of fire resistance of spun concrete structures.

*Keywords:* spun concrete, coefficient of concrete working conditions in case of a fire, full-scale fire tests, fire resistance limit, calculation method, static calculation, heat engineering calculation, brittle explosive destruction of concrete.

(The date of submitting: April 27, 2021)

### REFERENCES

1. Kazachek V.G., Lazovskij D.N., Rak N.A., Tur V.V. Shagaya v nogu so vremenem [Keeping pace with the times]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014. No. 16. Pp. 111–113. (rus)
2. Palevoda 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 Technique*, 2019. Vol. 18, No. 4. Pp. 319–329. (rus). DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329.
3. Nekhan' D.S. Fizicheskie i teplofizicheskie kharakteristiki tsentrifugirovannogo betona v tonkostennykh konstruktsiyakh [Physical and thermal characteristics of spun concrete in thin-walled structures]. *Proc. III Intern. scientific-practical conf. «Aktual'nye problemy i tendentsii razvitiya tekhnosfernoy bezopasnosti v neftegazovoy otrasli»*, Ufa, December 2, 2020. Ufa State Petroleum Technical University. Ufa, 2020. Pp. 25–27. (rus)
4. Palevoda 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.
5. Palevoda I.I., Nekhan' D.S., Batan D.S. Issledovaniya temperatury gazovoy sredy pri provedenii naturnykh ognevykh ispytaniy stroitel'nykh konstruktsiy [Temperature studies of the gaseous medium during full-scale fire tests of building constructions]. *Journal of Civil Protection*. 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 130–141. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
6. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Rezul'taty naturnykh ognevykh ispytaniy tsentrifugirovannykh zhelezobetonnnykh kolonn kol'tseвого secheniya [Results of full-scale fire test of spun reinforced concrete columns of annular section]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 142–159. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.142.

7. Bushev V.P., Pchelintsev V.A., Fedorenko V.S., Yakovlev A.I. *Ognestoykost' zdaniy* [Fire resistance of buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1970. 262 p. (rus)
8. Milovanov A.F. *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy pri pozhare* [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 304 p. (rus)
9. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus)
10. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. *Opredelenie parametrov teploobmena mezhdu vnutrenney poverkhnost'yu zhelezobetonnykh kolonn kol'tseвого secheniya i gazovoy sredoy v ikh polosti dlya resheniya teplotekhnicheskoy zadachi ognestoykosti* [Determination of heat transfer parameters between the inner surface of annular-section columns and gaseous medium in their hollow for solving the thermal problem of fire resistance]. *Proc. XV Intern. scientific-practical conf. «Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'», Ivanovo, November 17–18, 2020*. Ivanovo Academy of the State Fire Service EMERCOM of Russia. Ivanovo, 2020. Pp. 349–352. (rus)
11. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. *Resheniye teplotekhnicheskoy zadachi ognestoykosti tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn* [A solution to the thermal problem of fire resistance of spun reinforced concrete columns]. *Fire and Explosion Safety*, 2021. Vol. 30. No. 2. Pp. 49–70. (rus). DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.49-70.
12. Nekhan' D.S., Palevoda I.I. *Ognestoykost' szhato-izgibaemykh tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh konstruksiy* [Fire resistance of compressed-bend spun reinforced concrete structures]. *Proc. XV Intern. scientific-practical conf. «Obespechenie bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: problemy i perspektivy», Minsk, April 7–8, 2021*. University of Civil Protection of the MES of the Republic of Belarus. Minsk, 2021. Pp. 211–213. (rus)
13. Nekhan' D.S. *Raschet temperaturnogo polya v sechenii polykh zhelezobetonnykh kolonn, obogrevaemykh po vsemu naruzhnomu perimetru* [Calculation of the temperature of hollow reinforced concrete columns heated along the entire outer perimeter]. *Proc. All-Russian scientific-practical conf. «Aktual'nye problemy i innovatsii v obespechenii bezopasnosti», Ural, December 14–16, 2020*. Ural Institute of State Fire Service EMERCOM of Russia. Ekaterinburg, 2021. Pp. 122–127. (rus)
14. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Nguyen T.K. *Rezultaty naturnykh ognevykh ispytaniy zhelezobetonного monolitного perekrytiya v sostave eksperimental'nogo fragmenta karkasного zdaniya* [Results of full-scale fire tests of the monolithic reinforced concrete slab as part of a fragment of a frame building]. *Journal of Civil Protection*. 2021. Vol. 5, No. 1. Pp. 49–66. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.49.
15. Batashev V.M. *Prochnost', treshchinostoykost' i deformatsii zhelezobetonnykh elementov s mnogorядnym armirovaniem* [Strength, crack resistance and deformation of reinforced concrete elements with multi-row reinforcement]. Kiev: Budivel'nik, 1978. 120 p. (rus)
16. Nekhan' D.S., Palevoda I.I. *Vpliv nadlishkovogo tisku gazovого seredovishcha v porozhnini tsentrifugovannykh zalizobetonnykh konstruksiy na ikh nesuchu zdatsnist' pri pozhezhi* [Influence of excess pressure of gaseous medium in cavities of centrifuged reinforced concrete structures on their bearing capacity in case of fire]. *Proc. XII Intern. scientific-practical conf. «Teoriya i praktika gasinnya pozhezh ta likvidatsii nadzvichaynykh situatsiy», Cherkasy, April 8–9, 2021*. Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine. Cherkasy, 2021. Pp. 201–203. (ukr)