

## НАУЧНО ОБОСНОВАННАЯ КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА

Полева И.И.

*Цель.* Систематизировать подходы к определению пределов огнестойкости и разработать научно обоснованную концепцию комплексной оценки огнестойкости современных строительных конструкций из бетона, охватывающую три уровня детализации: экспертная оценка, оптимизирующий расчет, обоснование новых решений.

*Методы.* Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

*Результаты.* Разработана научно обоснованная концепция комплексной оценки огнестойкости современных строительных конструкций из бетона, основанная на концептуальном развитии подходов, связанных с моделированием работы конструкций при пожаре, позволяющая обеспечить пожарную безопасность зданий и снизить экономический риск пожара за счет увеличения доли предотвращенных потерь.

*Область применения исследований.* Полученные результаты могут применяться при разработке норм проектирования и конструирования строительных конструкций из бетона, для решения задач по оценке огнестойкости при проектировании и строительстве зданий и сооружений, подборе эффективных решений конструктивной огнезащиты.

*Ключевые слова:* предел огнестойкости, строительные конструкции из бетона, температурный режим пожара, конструктивная огнезащита, алгоритм, концепция.

(Поступила в редакцию 15 апреля 2024 г.)

### Введение

Проблема обеспечения пожарной безопасности остается актуальной. В Республике Беларусь ежегодно происходят около шести тысяч пожаров<sup>1</sup>, приводящих к гибели людей и экономическому ущербу. В таких условиях задача обеспечения устойчивости зданий при пожаре, характеризуемой огнестойкостью, требует постоянного внимания. Согласно ст. 5 технического регламента «Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность»<sup>2</sup> обеспечение огнестойкости как существенного требования безопасности является ключевым фактором, определяющим область применения строительных конструкций.

Современные тенденции развития строительной практики связаны с внедрением конструкций из высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов, без сцепления арматуры с бетоном, совместно работающих конструкций из бетона и конструктивной огнезащиты. Их работа при пожаре, схемы разрушения, факторы, влияющие на огнестойкость и эффективность огнезащиты, изучены недостаточно, применяемые расчетные методы не систематизированы. Значительная часть существующих подходов к оценке огнестойкости базируется на использовании упрощенных методов, ориентированных на получение конечной классификационной характеристики и имеющих ограничения по использованию. Решение указанных проблем базируется на комплексном экспериментальном исследовании огнестойкости современных конструкций из бетона, установлении закономерностей их поведения и механизмов разрушения при пожаре, разработке и систематизации методов определения их пределов огнестойкости и эффективных решений огнезащиты, основанных на концептуальном развитии подходов, связанных с моделированием работы конструкций при пожаре.

<sup>1</sup> Среднее ежегодное значение с 01.01.2013 по 31.12.2023 согласно базе данных программного комплекса «Учет ЧС».

<sup>2</sup> Технический регламент Республики Беларусь. Здания и сооружения, строительные материалы и изделия. Безопасность: ТР 2009/013/ВУ. – Введ. 31.12.09. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2015. – 28 с.

## Основная часть

**Базовые положения.** Огнестойкость характеризуется способностью строительных конструкций, зданий и сооружений сохранять свои функции при пожаре. Ее оценка реализуется через предел и степень огнестойкости. Последняя является нормативно обусловленной характеристикой здания и определяется свойствами строительных конструкций, из которых оно сделано. Таким образом, для конструкций из бетона основной показатель, подлежащий комплексному исследованию, – предел огнестойкости. Важным условием является регламентирование горючести вводимых в состав бетонной смеси добавок и наполнителей, использование которых должно сохранять класс пожарной опасности конструкции К0 (не пожароопасная). Оценка безопасности в системе противопожарного нормирования основана на сопоставлении фактического и требуемого пределов огнестойкости (далее –  $ПО_{ф}$ ,  $ПО_{тр}$ ). Последний определяется нормативно исходя из геометрических и функциональных характеристик здания. Задается условие безопасности  $ПО_{ф} \geq ПО_{тр}$ . Реализуемая на практике тенденция повышения технико-экономических показателей строительной продукции приводит к вариативности конструктивных решений и оптимизации их параметров, активному использованию конструктивной огнезащиты. Как следствие, выполнение условия безопасности может обеспечиваться применением различных вариантов, выбор оптимального из которых производится путем оценки их экономической эффективности по (7) с учетом выполнения системы (8). Таким образом, комплексная оценка огнестойкости современных конструкций из бетона включает систематизацию подходов к оценке их огнестойкости, разработку алгоритма выбора конструктивных решений с учетом обеспечения их эффективности, проведение необходимых экспериментальных исследований, моделирования работы конструкций при пожаре и их инженерной адаптации, как итог – обобщение совокупности результатов в виде концепции.

**Систематизация подходов к оценке огнестойкости.** Комплексная оценка основана на анализе видов применяемого конструктива, тепловых воздействий, методов и условий их применения. Предлагается выделить три вида оценки огнестойкости:

- $A_1$  – экспертная оценка;
- $A_2$  – расчет (моделирование работы при пожаре);
- $A_3$  – экспериментальное исследование.

Экспертную оценку ( $A_1$ ) следует применять для типовых решений конструкций с известными свойствами применяемых материалов. На практике вид реализуется с использованием инженерных методов на основе табличных данных.  $A_1$  может быть применен строго в рамках установленных граничных условий, в противном случае должен производиться расчет. Для оптимизации параметров конструкции  $A_2$  является приоритетным. Экспериментальное исследование ( $A_3$ ) целесообразно для оценки огнестойкости новых (современных) конструктивных решений и представляет наиболее достоверный результат. При невозможности корректного определения схемы разрушения конструкции при пожаре  $A_3$  является безальтернативным. Ввиду наличия специфики исследуемых величин  $A_3$  подразделяются на:

- $A_3(F)$  – стандартизированные испытания на предел огнестойкости;
- $A_3(E)$  – модельные испытания на огнезащитную эффективность;
- $A_3(N)$  – натурное моделирование поведения зданий при пожаре;
- $A_3(C)$  – исследование поведения бетона при пожаре.

$A_3(F)$  регламентируется СН 2.02.05-2020<sup>3</sup>,  $A_3(E)$  – СТБ 11.03.02-2010<sup>4</sup>.  $A_3(E)$  также может быть использован для определения свойств огнезащитных материалов. Указанные

<sup>3</sup> Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020. – Введ. 04.04.21 (взамен СН 2.02.01-2019, с отменой ТКП 45-2.02-315-2018 (33020)). – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 70 с.

<sup>4</sup> Система стандартов пожарной безопасности. Средства огнезащитные. Общие технические требования и методы испытаний: СТБ 11.03.02-2010. – Введ. 20.10.10. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2010. – 40 с.

испытания проводятся с использованием стандартизированного испытательного оборудования на базе аккредитованных лабораторий и являются наиболее приоритетными из всех. Вместе с тем их реализация связана с рядом трудностей, обусловленных невозможностью соблюдения условий, адекватных разработанной проектной документации, поскольку используемые методы ограничены конструктивными особенностями испытательных установок<sup>5, 6</sup>: устройство огневых печей не позволяет воспроизводить все расчетные схемы работы конструкций, имитировать консольное опирание и жесткое защемление; не разработан механизм корректной замены сложных конструктивных решений на отдельные элементы, ограничены их форма и внешние параметры; сложно адекватно оценить работу статически неопределимых конструкций. А<sub>3</sub>(N) позволяет решить указанные проблемы. Реализация А<sub>3</sub>(N) осуществляется путем разработки методики, соответствующей ГОСТ Р 53309<sup>7</sup>, НПБ 233-96<sup>8</sup> и ГОСТ 30247.0<sup>9</sup>. Следует отметить, что натурные огневые испытания являются фундаментальными при обосновании области применения новых видов конструктивных решений.

Для строительных материалов нормируется только пожарная опасность. Вместе с тем огнестойкость конструкции напрямую связана со свойствами материала, из которого она изготовлена. Это обуславливает необходимость использования показателя, сочетающего совокупность свойств, влияющих на работу конструкции при пожаре. В качестве интегральной характеристики поведения бетона при пожаре предлагается  $k_c(\theta)$  ( $f_{cd}(\theta) = f_{ck} \cdot k_c(\theta)$ ,  $E_{cm}(\theta) = E_{cm} \cdot [k_c(\theta)]^2$ , где  $k_c(\theta)$  – коэффициент условий работы бетона при пожаре;  $\theta$  – температура нагрева, °С;  $f_{cd}$ ,  $f_{cd}(\theta)$  – расчетная прочность бетона на сжатие в нормальных условиях и при температуре нагрева  $\theta$  соответственно, МПа;  $f_{ck}$  – характеристическая прочность бетона на сжатие, МПа;  $E_{cm}$ ,  $E_{cm}(\theta)$  – средний модуль упругости бетона в нормальных условиях и при температуре нагрева  $\theta$  соответственно, МПа). Основным методом определения  $k_c(\theta)$  являются испытания на кубиковую прочность (А<sub>3</sub>(С)), в зависимости от вида образцов и особенностей проведения испытаний в рамках общей предлагается частная классификация (табл. 1). Проведенный анализ [1] показал, что наиболее предпочтительным является метод А<sub>3</sub>(С<sub>1</sub>).

**Таблица 1. – Метод исследования поведения бетона при пожаре**

Метод исследования	Образец	Стадии теплового воздействия			Момент приложения нагрузки	Наличие необходимого оборудования в Республике Беларусь
		нагрев	выдержка	охлаждение		
А <sub>3</sub> (С <sub>1</sub> )	куб	+	+	+	после охлаждения	более 20 ед.
А <sub>3</sub> (С <sub>2</sub> )	призма	+	+	–	после выдержки	нет
А <sub>3</sub> (С <sub>3</sub> )	полый цилиндр	+	–	–	до нагрева	нет

Проведенный анализ моделей конструкций для оценки огнестойкости [1; 2] позволил выделить три вида конструктива:

- К<sub>1</sub> – строительная конструкция (элемент);
- К<sub>2</sub> – конструктивная система (К<sub>1</sub> с конструктивной огнезащитой);
- К<sub>3</sub> – фрагмент (часть) здания, который(-ую) невозможно корректно отнести к К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub>.

<sup>5</sup> Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.01.96. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 11 с.

<sup>6</sup> Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Введ. 01.01.96. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 11 с.

<sup>7</sup> Здания и фрагменты зданий. Метод натурных огневых испытаний. Общие требования: ГОСТ Р 53309-2009. – Введ. 01.01.10. – М.: Стандартинформ, 2019. – 8 с.

<sup>8</sup> Здания и фрагменты зданий. Метод натурных огневых испытаний. Общие требования: НПБ 233-96. – Введ. 01.01.97. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. – 15 с.

<sup>9</sup> См. сноску 5.

$K_1$  является базовым конструктивом в принятой системе противопожарного нормирования. Использование  $K_3$  обусловлено невозможностью корректного вычленения отдельного элемента из общей схемы здания и используется, скорее, как исключение.

Нормирование огнестойкости строительных конструкций базируется на унификации температурного режима пожара, под которым понимается зависимость температуры огневой среды вблизи поверхности строительной конструкции от времени пожара. С учетом проведенного анализа [1; 3] предлагается следующая их классификация:

- $T_1$  – равномерный рост температуры с заданной скоростью;
- $T_2$  – стандартный температурный режим пожара по ISO 834;
- $T_2^*$  – углеводородный температурный режим пожара по СН 2.01.03<sup>10</sup>;
- $T_3$  – параметрический режим пожара;
- $T_3^*$  – параметрический режим пожара, эквивалентный стандартному.

Использование режима  $T_1$  обоснованно только для оценки поведения строительных материалов с целью оценки влияния их поведения при нагреве на огнестойкость выполненных из них конструкций. Режим  $T_2$  наиболее распространен в мировой практике и применяется для стандартизированных испытаний с целью обеспечения возможности сравнения конструкций, испытанных в разных лабораториях. Данный режим является номинальным и используется для обеспечения устойчивости классификации по огнестойкости.  $T_2^*$  следует рассматривать как перспективную альтернативу  $T_2$  с учетом значительно изменившейся за последние десятилетия реальной усредненной пожарной нагрузки в зданиях. Режим  $T_3$  задается моделью пожара, определяющей состояние среды в конкретном помещении со строго заданной пожарной нагрузкой и проемностью. К данному режиму применимо определение «реальный» пожар.  $T_3^*$  является частным случаем  $T_3$  и характеризуется таким же воздействием на конструкцию, как и  $T_2$ . Правила сочетания видов конструктивов и температурных режимов приведены в таблице 2.

**Таблица 2. – Сочетание видов конструктива и температурных режимов пожара**

Температурный режим пожара	Вид конструктива			Метод исследования поведения бетона при пожаре		
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$A_3(C_1)$	$A_3(C_2)$	$A_3(C_3)$
$T_1$	–	–	–	+	+	–
$T_2$	+	+	–	–	–	+
$T_3$	+*	+*	+	–	–	–

*Примечание.* \* Применяется в исключительных случаях для обоснования уникальных решений.

Для установления соответствия между видами анализа и видами конструктива введена классификация базовых условий оценки огнестойкости:

- $U_1$  – соответствие граничным условиям экспертной оценки;
- $U_2$  – неизвестны свойства материалов, из которых изготовлена конструкция;
- $U_3$  – исходные параметры конструкции позволяют произвести расчет;
- $U_4$  – невозможно корректное проведение расчета, параметры конструкции позволяют провести экспериментальное исследование с использованием стандартизированных методов;
- $U_5$  – невозможно корректное использование расчета и стандартизированных экспериментальных методов.

Выбор вида оценки огнестойкости осуществляется исходя из выполнения базовых условий ( $U_1$ – $U_5$ ) и вида применяемого конструктива ( $K_1$ – $K_3$ ) по таблице 3.

<sup>10</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.

Таблица 3. – Определение вида оценки огнестойкости

Базовые условия оценки огнестойкости	Вид конструктива		
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>
U <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	–
U <sub>2</sub>	A <sub>3</sub> (C <sub>1</sub> ) → A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub> (E) → A <sub>2</sub>	–
U <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> *
U <sub>4</sub>	A <sub>3</sub> (F)	A <sub>3</sub> (E)	–
U <sub>5</sub>	–	–	A <sub>3</sub> (N)

Примечание. \* Допускается только с использованием численного моделирования работы здания при пожаре.

**Алгоритм комплексной оценки огнестойкости строительных конструкций из бетона.** На основе проведенной систематизации подходов разработан алгоритм комплексной оценки огнестойкости конструкций из бетона (рис. 1).

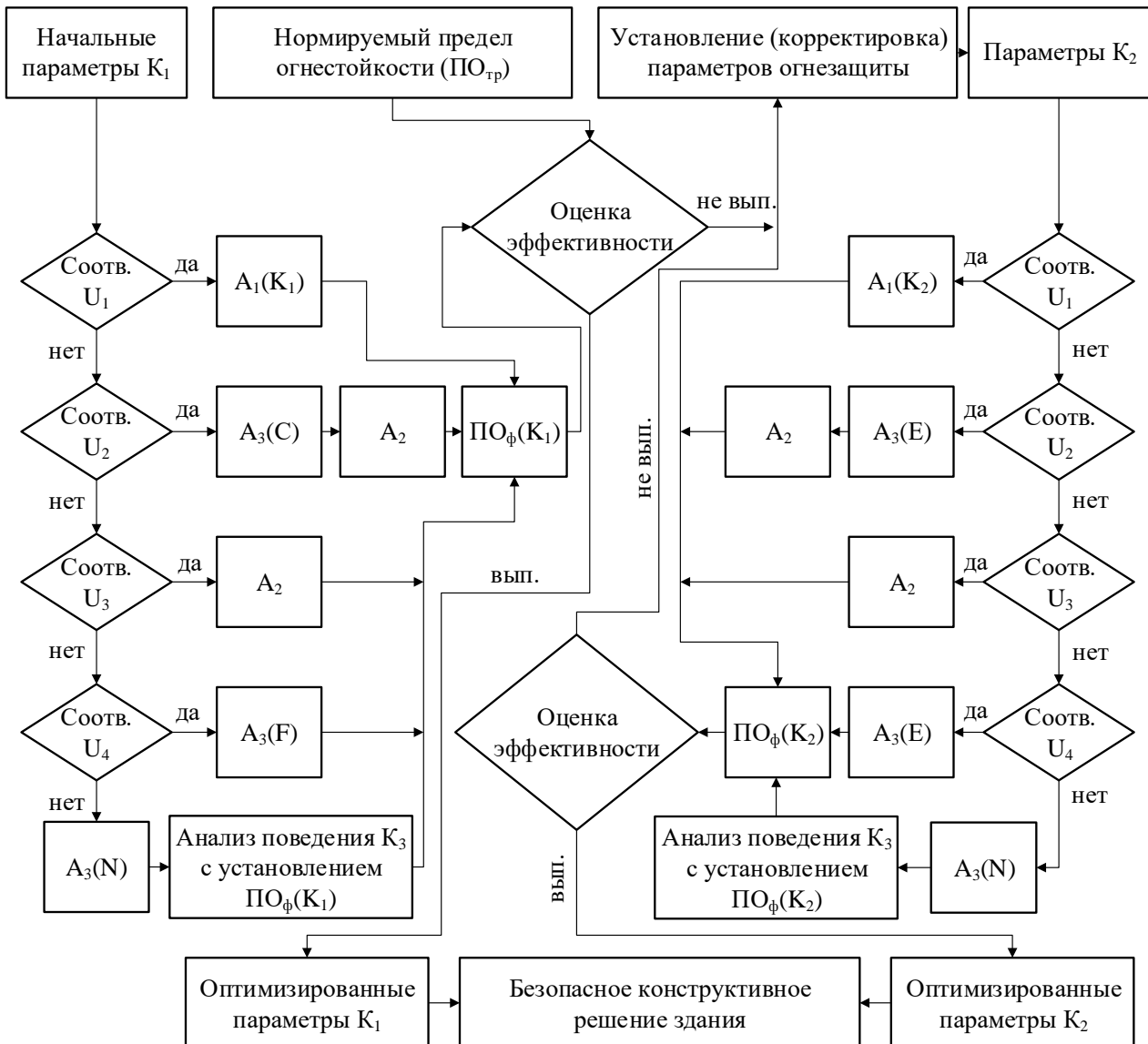


Рисунок 1. – Алгоритм комплексной оценки огнестойкости конструкций из бетона

Исходными данными для оценки являются параметры конструкции (K<sub>1</sub>), необходимые для определения ее предела огнестойкости. Последовательно производится проверка базовых условий оценки огнестойкости (U<sub>1</sub>...U<sub>4</sub>) с целью определения вида оценки (A<sub>1</sub>...A<sub>3</sub>). Если ни один из сценариев не реализован (базовое условие U<sub>5</sub>), то проводится натурное моделирование поведения здания при пожаре для K<sub>3</sub>. Выбор температурного режима (T<sub>1</sub>...T<sub>3</sub>)

для каждого вида оценки определяется исходя из вида конструктива по таблице 2. Результатом каждого из сценариев является определение фактического предела огнестойкости конструкции ( $ПО_{\phi}(K_1)$ ). При наличии нескольких вариантов конструктивных решений обработка этого блока алгоритма производится для каждого из них. Далее производится оценка эффективности, для чего на основании геометрических и функциональных характеристик здания определяется  $ПО_{тр}$ . При невозможности эффективного обеспечения требуемой огнестойкости устанавливаются параметры огнезащиты, вид конструктива меняется на  $K_2$ , далее по аналогии производится проверка базовых условий оценки огнестойкости ( $U_1 \dots U_4$ ). Результатом реализации данного блока алгоритма является определение огнезащитной эффективности конструктивной защиты и определение фактического предела огнестойкости конструктивной системы в целом ( $ПО_{\phi}(K_2)$ ). Далее производится оценка эффективности по аналогии с  $K_1$ . В данном блоке с  $ПО_{тр}$  сопоставляются как  $ПО_{\phi}(K_2)$ , так и  $ПО_{\phi}(K_1)$  для всех вариантов решений. В результате выбирается базовое конструктивное решение, для которого экономическая эффективность будет максимальной.

Для обеспечения реализации указанного алгоритма для современных строительных конструкций из бетона с целью выявления и учета специфики их работы при пожаре выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований:

- проведено комплексное экспериментальное исследование ( $A_3$ );
- разработан метод моделирования их работы при пожаре ( $A_2$ );
- разработаны инженерные методы для экспертной оценки ( $A_1$ ).

**Комплексные экспериментальные исследования оценки огнестойкости современных конструкций из бетона ( $A_3$ ).** С учетом недостаточной изученности закономерностей поведения и механизмов разрушения при пожаре указанных конструкций для оценки их огнестойкости использован экспериментальный подход (рис. 2).

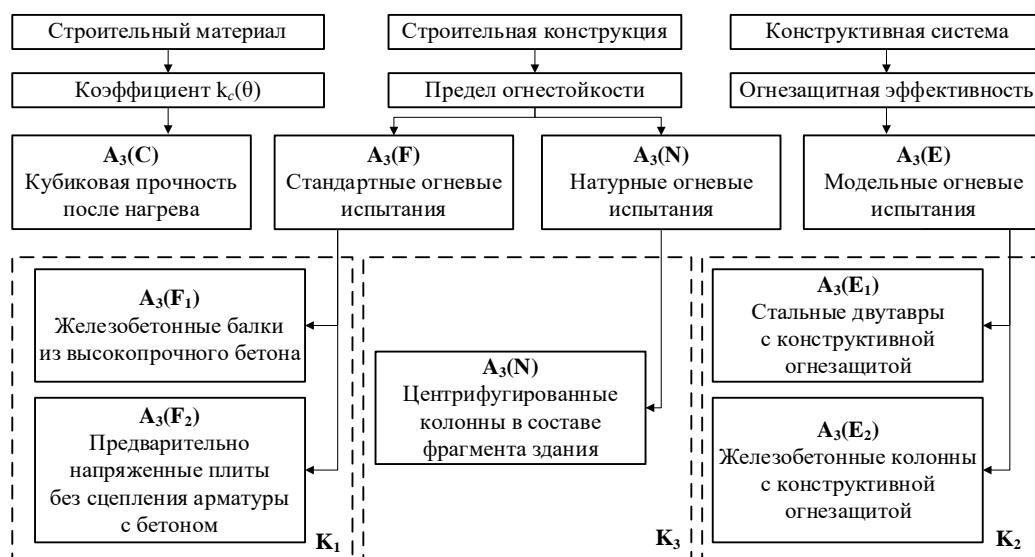


Рисунок 2. – Схема комплексных исследований огнестойкости современных конструкций из бетона

В основу положен комплексный эксперимент, реализованный на трех уровнях: строительный материал (бетон), строительная конструкция, конструктивная система. Проведено 5 серий стандартизированных огневых испытаний на огнестойкость, 8 серий модельных огневых испытаний на огнезащитную эффективность, натурное огневое испытание здания, 2187 лабораторных испытаний на кубиковую прочность. Для реализации испытаний разработаны методики для  $A_3(N)$ ,  $A_3(E_2)$ , адаптированы под специфику конструкций  $A_3(F_1)$ ,  $A_3(F_2)$ ,  $A_3(C_1)$ . Результаты исследований представлены:

- для высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов ( $A_3(C_1)$ ) – [1–5];
- балок из высокопрочного бетона ( $A_3(F_1)$ ) – [1; 2];
- преднапряженных плит ( $A_3(F_2)$ ) – [1; 6];

- центрифугированных колонн ( $A_3(N)$ ) – [1; 7];
- конструкций из бетона с конструктивной огнезащитой ( $A_3(E_2)$ ) – [1; 8–10].

Итогом стала методика и результаты комплексного исследования огнестойкости балок из высокопрочного бетона, плит с предварительно напряженной арматурой без сцепления арматуры с бетоном, центрифугированных колонн, эффективности конструктивной огнезащиты из огнестойких гипсовых плит, включающие пределы огнестойкости, зависимости температур бетона, арматуры и гипсовых плит, избыточного давления паровоздушной смеси в замкнутых полостях и прогибов конструкций от времени огневого воздействия, которые в совокупности позволили выявить и описать механизмы разрушения конструкций, установить эффективные значения теплофизических характеристик огнестойких гипсовых плит толщиной от 12,5 до 50 мм и модернизировать алгоритм моделирования их работы при пожаре, необходимые для обоснования новых конструктивных решений.

**Моделирование работы современных конструкций из бетона при пожаре ( $A_2$ ).**

Анализ результатов экспериментальных исследований [1–10] позволил разработать метод определения пределов огнестойкости современных строительных конструкций из бетона, сущность которого заключается в определении длительности пожара, при которой остаточная несущая способность конструкции ( $R_{d,fi}$ ) становится равной внешней нагрузке ( $E_{d,fi}$ ). Для реализации метода разработан алгоритм моделирования работы конструкций из бетона при пожаре (рис. 3), состоящий из двух последовательно реализуемых частей: моделирование нагрева и моделирование несущей способности [3; 11–15]. Использование для моделирования нагрева с применением метода конечных элементов программного комплекса Ansys Workbench детально рассмотрено в [16–21].

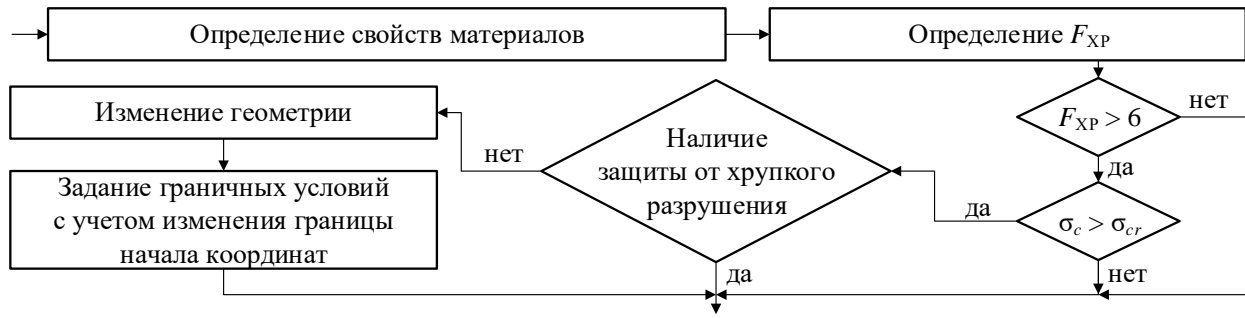


$\tau_f$  – время огневого воздействия;  $\Delta\tau_f$  – шаг расчета времени огневого воздействия;  $R_{d,fi}$  – остаточное расчетное сопротивление конструкции при пожаре;  $E_{d,fi}$  – расчетное значение эффекта воздействия при пожаре

**Рисунок 3. – Алгоритм моделирования работы конструкций из бетона при пожаре**

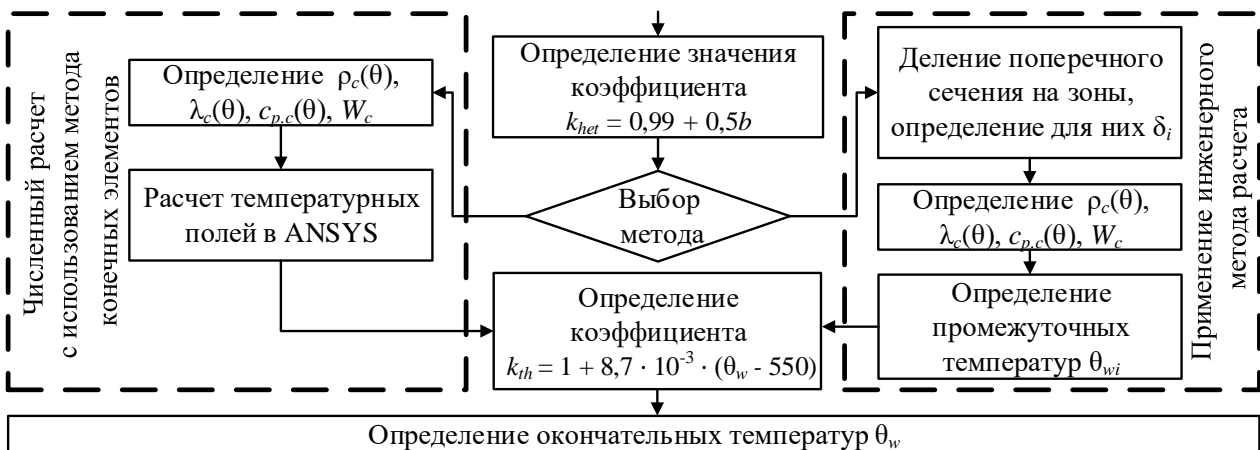
Для учета специфики работы современных конструкций из бетона в алгоритм введены блоки «Учет специфики работы современных конструкций из бетона» и «Моделирование поведения бетона при пожаре». Специфика работы реализуется путем учета:

- изменения расчетных геометрических характеристик конструкции при хрупком взрывообразном разрушении защитного слоя (далее – ХР) (блок  $S_1$ ) (рис. 4);
- неоднородности бетона по толщине поперечного сечения при пожаре (блок  $S_2$ ) (рис. 5);
- работы конструктивной огнезащиты (блок  $S_3$ ) (рис. 6).



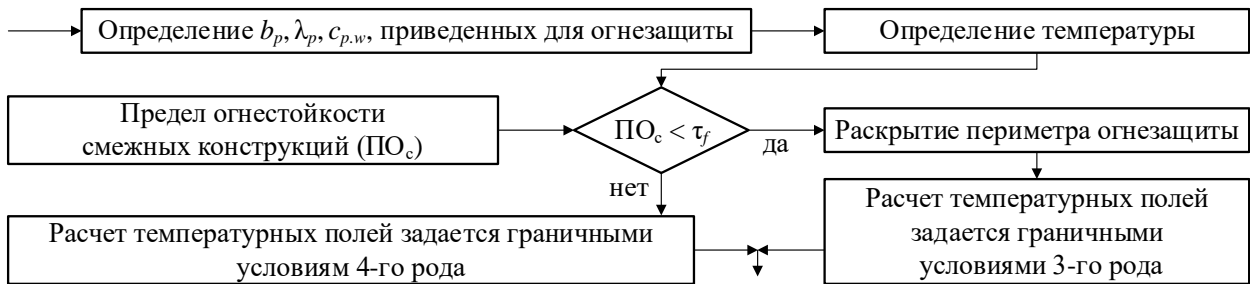
$F_{XP}$  – критерий хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре;  $\sigma_c$  – напряжение сжатия;  $\sigma_{cr}$  – критическое напряжение сжатия

Рисунок 4. – Учет изменения расчетных геометрических характеристик конструкции при XP защитного слоя бетона (блок S1)



$\rho_c(\theta)$  – средняя плотность бетона при температуре  $\theta$ ;  $\lambda_c(\theta)$  – эффективный коэффициент теплопроводности бетона при температуре  $\theta$ ;  $c_{p,c}(\theta)$  – эффективная удельная изобарная теплоемкость бетона при температуре  $\theta$ ;  $W_c$  – весовая влажность бетона;  $\theta_{wi}$  – температура материала без учета трещинообразования, °C;  $k_{het}$  – коэффициент учета неоднородности бетона в поперечном сечении; 0,5 – размерный коэффициент, м<sup>-1</sup>;  $k_{th} \geq 1,4$  – коэффициент учета ускорения нагрева вследствие трещинообразования при  $\theta_{wi} > 550$  °C; 550 °C – температура трещинообразования;  $8,7 \cdot 10^{-3}$  – эмпирический коэффициент, °C<sup>-1</sup>

Рисунок 5. – Учет неоднородности бетона по толщине поперечного сечения при пожаре (блок S2)



$b_p$  – толщина огнестойких гипсовых плит конструктивной огнезащиты;  $\lambda_p$  – эффективный коэффициент теплопроводности огнестойкой гипсовой плиты;  $c_{p,w}$  – эффективная удельная изобарная теплоемкость материала

Рисунок 6. – Учет работы конструктивной огнезащиты (блок S3)

Моделирование поведения бетона при пожаре (блок S4) позволяет определять необходимые для моделирования работы конструкции характеристики материалов с учетом специфики поведения высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов при нагреве.

Учет каскадного обрушения каркаса здания при расчете пределов огнестойкости отдельных его элементов (балок, колонн и др.) учитывается блоком S5, предусматривающим дополнительную оценку несущей способности указанных элементов, учитывающую изменение свойств материалов при пожаре, блоки S1–S4, а также перераспределение усилий в результате потери устойчивости одного или нескольких элементов каркаса.



Обосновано применение блока  $S_1$  для конструкций из высокопрочного бетона и преднапряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном [1; 6], блока  $S_2$  – для центрифугированных конструкций [1; 7]. В случае использования конструктивной огнезащиты блок  $S_3$  используется последовательно совместно с другими:  $S_1$ - $S_3$  или  $S_2$ - $S_3$ , для типовых бетонов блок может быть применен самостоятельно [1; 8–10]. В случаях эксплуатации центрифугированных колонн в условиях повышенной влажности и при уровне нагрузки при пожаре не менее 0,7 возможен вариант  $S_1$ - $S_2$ - $S_3$ .

Для высокопрочного бетона и предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном характерно интенсивное взрывообразное хрупкое разрушение защитного слоя бетона, которое существенно влияет на остаточную несущую способность конструкции. Ключевая величина, необходимая для оценки указанного явления, – параметр  $F_{ХР}$ , определяемый по формуле (5). Результаты исследований в данном направлении представлены в [1; 4–6; 17; 22; 23]. Для центрифугированного бетона характерно проявление неоднородности физико-механических и теплофизических свойств по толщине поперечного сечения конструкции, которое усиливается при пожаре. Проведенный анализ показал, что данное явление существенно влияет на результаты расчета и подлежит обязательному учету [4; 5; 24–26]. Блок  $S_2$  может быть реализован двумя методами: численным моделированием с использованием метода конечных элементов либо с помощью разработанного инженерного метода [1; 20; 22; 25; 26].

Адаптация алгоритма при переходе от  $K_1$  к  $K_2$  включает при проведении моделирования нагрева конструкции учет дополнительного защитного слоя и их совместную оценку при определении распределения температур в конструктивной системе. Анализ совместной работы конструкций из бетона и конструктивной огнезащиты приведен в [8–10]. В алгоритме учтен сценарий достижения предела огнестойкости смежными конструкциями с раскрытием периметра огнезащиты, что позволяет повысить объективность расчетов и разработать эффективные способы применения конструктивной огнезащиты для снижения температур в поперечном сечении защищаемых конструкций при пожаре.

Итогом стал метод определения пределов огнестойкости современных строительных конструкций из бетона, в том числе с конструктивной огнезащитой из огнестойких гипсовых плит, основанный на моделировании их нагрева и несущей способности при пожаре, отличающийся учетом состава бетонной смеси, возможности изменения расчетных геометрических характеристик конструкции в случае хрупкого взрывообразного разрушения защитного слоя, переменных свойств бетона по толщине поперечного сечения, позволяющий оптимизировать параметры конструкций из высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов, без сцепления арматуры с бетоном с учетом обеспечения их огнестойкости и разработать эффективные способы применения конструктивной огнезащиты.

**Моделирование поведения бетона при пожаре (блок  $S_4$ ).** На основании анализа результатов экспериментальных исследований поведения высокопрочного, модифицированного и центрифугированных бетонов при высокотемпературном нагреве разработана теоретическая модель поведения бетона при пожаре, учитывающая его возможное хрупкое взрывообразное разрушение [1; 22]. Разработанная модель позволяет определить критическую температуру ( $\theta_{cr}$ ) бетона заданного состава, опираясь на условие безопасности элементарной зоны  $k_c(\theta_{cr}) = k_{CF} \cdot \eta_{fi}$ , где  $k_{CF} = f_{cd}/f_{ck}$ ;  $\eta_{fi}$  – уровень нагрузки при пожаре (рис. 7). Для определения коэффициента условий работы бетона при пожаре предложены и обоснованы формулы (1) и (2), которые хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 8). Учет состава бетонной смеси и возможности хрупкого взрывообразного разрушения производится с помощью (3) и (4). Для учета переменных свойств бетона по толщине сечения конструкции при пожаре предложен и обоснован коэффициент  $k_{cz}$  в формуле (2) (рис. 9), полученные с помощью которого результаты  $k_c(\theta)$  для центрифугированного бетона хорошо согласуются с эмпирическими данными (рис. 10). За основу для оценки взрывообразного хрупкого разрушения бетона при пожаре взят критерий хрупкого взрывообразного разрушения ( $F_{ХР}$ ) по

В.В. Жукову. Для оценки ХР высокопрочного и центрифугированного бетона предложена и обоснована формула (5) и использование коэффициента  $k_{sz}$  (рис. 11).

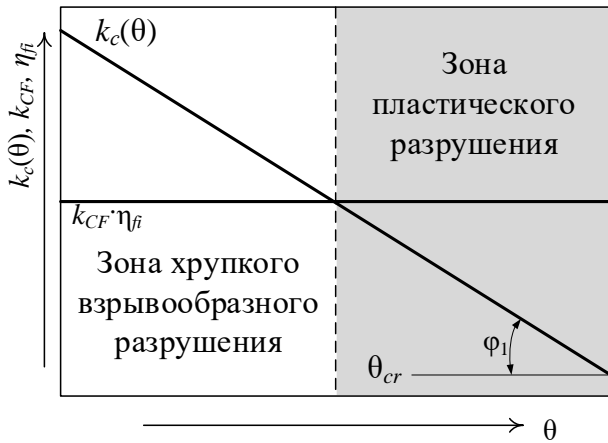


Рисунок 7. – Комплексная оценка поведения бетона при пожаре

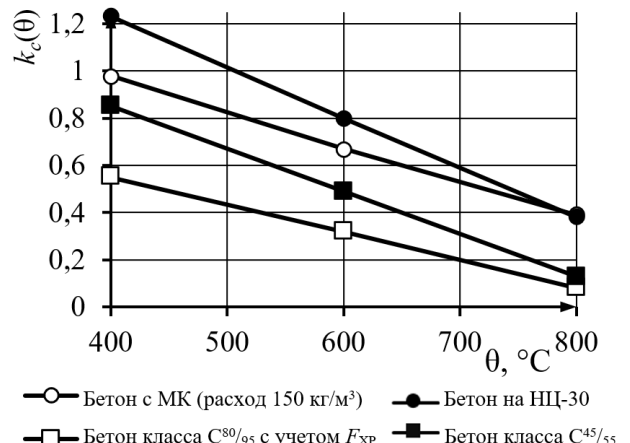


Рисунок 8. – Зависимость  $k_c(\theta)$  от температуры

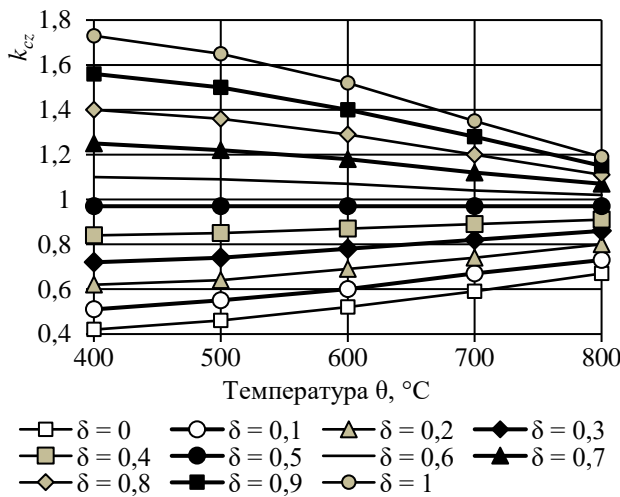


Рисунок 9. – Зависимость  $k_{cz}$  от температуры

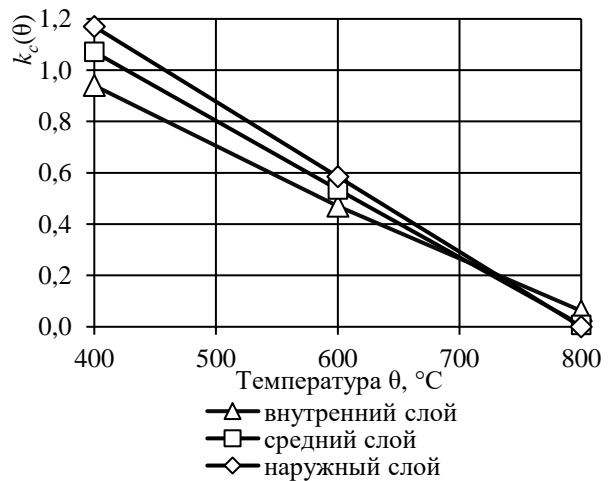


Рисунок 10. – Зависимость  $k_c(\theta)$  от температуры для центрифугированного бетона

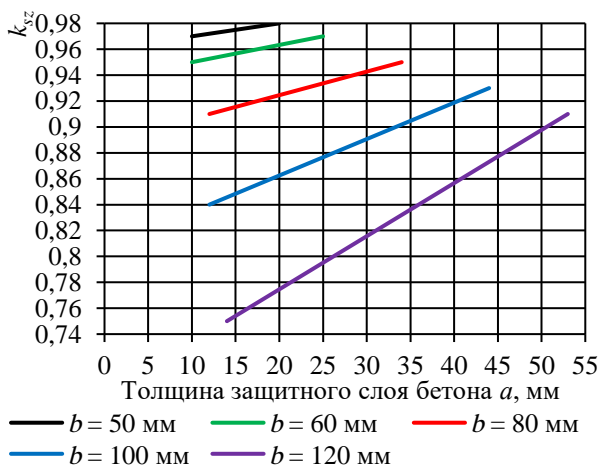


Рисунок 11. – Зависимость  $k_{sz}$  от толщины защитного слоя бетона  $a$

При  $\theta < 400$  °C:

$$k_c(\theta) = k_{cz} [1 - 0,00263 \cdot (\theta - 20) \cdot (1 - 0,88\alpha_k)]; \quad (1)$$

при  $400 \leq \theta \leq 800$  °C:

$$k_c(\theta) = k_{cz} \cdot [0,88\alpha_k - \xi \cdot (\theta - 400)], \quad (2)$$

$$\alpha_k = \begin{cases} 5 \cdot \alpha_{B/Ц} \cdot \alpha_{ТВО} \cdot \alpha_A / F_{XP} & \text{при } F_{XP} \geq 6; \\ \alpha_{B/Ц} \cdot \alpha_{ТВО} \cdot \alpha_A & \text{при } F_{XP} < 6, \end{cases} \quad (3)$$

$$\xi = \begin{cases} 5 \cdot \xi_G \cdot \xi_{ТВО} \cdot \xi_A / F_{XP} & \text{при } F_{XP} \geq 6; \\ \xi_G \cdot \xi_{ТВО} \cdot \xi_A & \text{при } F_{XP} < 6, \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{XP} = 0,045 \cdot E_{cm} \cdot \Pi^{0,2} \cdot k_{sz}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – относительная толщина зоны (слоя);  $b$  – толщина (ширина) конструкции, мм;  $k_{cz} = [1 + 6,25b \cdot (\delta - 0,5) \cdot \text{tg}\varphi] \cdot (0,975 - 2,36b + 4,6b\delta)$  – поправочный коэффициент, учитывающий

влияние переменной прочности бетона на сжатие в поперечном сечении конструкции на ее несущую способность при пожаре [22; 26];  $\alpha_k$  – коэффициент, учитывающий накопленные дефекты структуры бетона при температуре 400 °С с учетом возможности хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре;  $\alpha_{в/ц}$  – коэффициент учета влияния водоцементного отношения;  $\alpha_{тво}$  – коэффициент учета влияния ТВО при нагреве до 400 °С;  $\alpha_A$  – коэффициент учета влияния добавок при нагреве до 400 °С;  $\xi$  – коэффициент интенсивности деструктивных процессов с учетом возможности хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре;  $\xi_G$  – коэффициент учета объемных концентраций компонентов, °С<sup>-1</sup>;  $\xi_{тво}$  – коэффициент учета влияния ТВО при нагреве выше 400 °С;  $\xi_A$  – коэффициент учета влияния добавок при нагреве выше 400 °С; 0,045 – эмпирико-аналитический коэффициент пропорциональности, МПа<sup>-1</sup>·кг<sup>-0,2</sup>·м<sup>0,6</sup>; Ц – расход цемента, кг/м<sup>3</sup>;  $k_{sz}$  – коэффициент относительного изменения критерия ХР бетона при пожаре в области защитного слоя центрифугированной железобетонной конструкции.

Итогом стала теоретическая модель поведения бетона при пожаре, основанная на комплексных экспериментальных исследованиях характеристик высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов после высокотемпературного нагрева и впервые установленных закономерностях влияния состава бетонной смеси, вводимых добавок, наполнителей и условий изготовления на коэффициент условий работы бетона при пожаре, позволяющая прогнозировать наступление хрупкого взрывообразного разрушения бетона при пожаре, подбирать составы бетонной смеси с наивысшей критической температурой разрушения и объективно рассчитать необходимую для оценки огнестойкости несущую способность конструкций из бетона при пожаре.

**Экспертная оценка огнестойкости современных конструкций из бетона (А1).** По методике (рис. 3) с помощью компьютерного моделирования исследованы обеспечивающие требуемую огнестойкость минимальные значения параметров современных конструкций из бетона, в том числе с конструктивной огнезащитой, на основании которых разработаны инженерные методы оценки их огнестойкости [27]. Проведена корректировка подходов действующих норм для железобетонных стен, колонн, балок, плит и ферм. С учетом использования отечественного сырья и технологий определены значения поправочных коэффициентов для конструкций из высокопрочного бетона (1,1–1,6), предложены способы защиты указанных конструкций от хрупкого взрывообразного разрушения при пожаре. Впервые получены и обоснованы обеспечивающие требуемый предел огнестойкости минимальные параметры полых центрифугированных железобетонных колонн, предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, совместно работающих конструкций из бетона и конструктивной огнезащиты.

Итогом стали инженерные методы определения пределов огнестойкости, основанные на компьютерном моделировании обеспечивающих требуемую огнестойкость минимальных значений параметров современных строительных конструкций из бетона, в том числе впервые разработанные для конструкций из высокопрочного и центрифугированного бетонов, конструкций с предварительно напряженной арматурой без сцепления арматуры с бетоном, совместно работающих конструкций из бетона и конструктивной огнезащиты. Совокупность инженерных методов формализована в виде правил определения пределов огнестойкости строительных конструкций из бетона [27].

**Оценка величины предотвращенного экономического ущерба.** Экономическая эффективность систем, влияющих на пожарную безопасность, определяется по ГОСТ 12.1.004-91<sup>11</sup> и [28; 29].

$$E_3 = \alpha_3 \cdot (\Pi_i - 3_i) = (1 + E_n)^{t_p - t} \cdot (\Pi_i - 3_i), \quad (6)$$

<sup>11</sup> Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91 – Введ. 01.07.92. – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

где  $\Pi_i$  – стоимостная оценка предотвращенных потерь за расчетный период при использовании мероприятий противопожарной защиты;  $Z_i$  – стоимостная оценка затрат по реализации мероприятий противопожарной защиты;  $\alpha_3$  – коэффициент приведения разновременных затрат и предотвращенных потерь к расчетному году (коэффициент дисконтирования);  $t_p$  – расчетный год;  $t$  – год, затраты которого приводятся к расчетному;  $E_n$  – нормативный коэффициент капитальных вложений, устанавливаемый на уровне нормативной рентабельности капитальных вложений. На стадии проектирования суть оценки эффективности инноваций в строительстве заключается в том числе в рассмотрении их соответствия установленным критериям, основными из которых являются критерии безопасности, анализируемые с учетом возможных рисков. Согласно методу *Net Present Value* эффект инноваций определяется [29]:

$$E_3 = \sum_j \frac{P_j}{(1 + \alpha_3)^j} - I_n, \quad (7)$$

где  $P_j$  – денежные поступления, генерируемые инновацией в  $j$ -м году;  $I_n$  – величина первоначальных инвестиций. Таким образом, эффективность внедрения строительных конструкций оценивается по (7), а эффективность обеспечения их огнестойкости – по (6). Учитывая, что огнестойкость является составной частью характеристик строительной конструкции и вычленив составляющую себестоимости ее обеспечения из итоговой цены не представляется возможным, а также принимая  $E_3 > 0$  и фиксируя затраты стадией строительства ( $Z_i = I_n$ ), формулы (6) и (7) преобразуются в систему (8), с учетом выполнения условия безопасности может быть проведена оценка эффективности для определенной конструкции на заданном объекте (здании).

$$I_n \leq \alpha_3 \cdot \Pi_i; \quad I_n \leq \sum_j \frac{P_j}{(1 + \alpha_3)^j}. \quad (8)$$

В ряде случаев целесообразна экспертная оценка с использованием риск-ориентированного подхода, основанного на обработке статистических данных, принимая совокупный экономический риск пожара  $R_n$  равным сочетанию вероятности пожара в год  $P_n$  и ожидаемого при пожаре ущерба  $U_n$ :

$$R_n = P_n \cdot U_n = \frac{N_{\text{об.пож}}}{N_{\text{об}} \cdot T} \cdot U_n, \quad (9)$$

где  $N_{\text{об.пож}}$  – количество пожаров, произошедших на однотипных анализируемых объектах за расчетный период;  $N_{\text{об}}$  – количество однотипных анализируемых объектов;  $T$  – расчетный период, год. Численное значение величины снижения экономического риска пожара за счет предотвращения разрушения строительных конструкций вследствие обеспечения их огнестойкости можно представить в виде:

$$\Delta R_n = P_n \cdot U_n \cdot \alpha_{\text{ПО}} = P_n \cdot \frac{U_{\text{сум}}}{N_{\text{об.пож}}} \cdot \alpha_{\text{ПО}}, \quad (10)$$

где  $\alpha_{\text{ПО}} = U_{\text{ск}} / U_n$  – статистический коэффициент, указывающей на долю ущерба, определяемую разрушением строительных конструкций при пожаре, т.е. необеспечением их огнестойкости;  $U_{\text{ск}}$  – стоимостная оценка ущерба от разрушения строительных конструкций;  $U_{\text{ск}}$  – величина ущерба принимается эквивалентной статистически ожидаемому ущербу на отдельном анализируемом объекте; где  $U_{\text{сум}}$  – суммарный ущерб от пожаров, произошедших на анализируемых объектах. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Принимая  $U_n = \Pi_i$ , можно констатировать, что  $\Delta R_n$  также указывает на снижение экономического риска пожара за счет повышения доли предотвращенных потерь вследствие эффективности конструктивных решений по обеспечению огнестойкости строительных конструкций. Величина  $\Delta R_n$  является минимальной оценкой и не учитывает каскадного характера

накопления предотвращенного ущерба вследствие учета влияния разрушения конструкций на технологическое оснащение здания. Таким образом, реализация конструктивных решений по приведению к нормируемым значениям пределов огнестойкости строительных конструкций, наряду с обеспечением эффективности инноваций в строительстве, позволяет уменьшить экономический риск от негативных эффектов пожара на  $0,8\text{--}46,2$  тыс. руб. год<sup>-1</sup> · объект<sup>-1</sup> за счет увеличения доли предотвращенных потерь.

Таблица 4. – Экспертная оценка экономических рисков пожара

Вид объекта	$P_{п,}$ 1/(год·объект)	$U_{п,}$ тыс.руб./(год·объект)	$R_{п,}$ тыс.руб./(год·объект)	$\alpha_{ПО}$	$\Delta R_{п,}$ тыс.руб./(год·объект)
Производственные и складские здания	$1,75 \cdot 10^{-2}$	33417,97	584,81	0,079	46,2
Здания для хранения автомобилей	$4,10 \cdot 10^{-2}$	12092,90	495,80	0,089	44,1
Здания библиотек, архивов, музеев	$1,12 \cdot 10^{-3}$	1792,30	2,01	0,400	0,8
Здания объектов образования	$1,04 \cdot 10^{-2}$	8052,88	83,74	0,109	9,1
Здания розничной торговли	$1,96 \cdot 10^{-2}$	19643,54	385,01	0,034	13,1

**Концепция комплексной оценки огнестойкости современных строительных конструкций из бетона.** В развитие алгоритма (рис. 1) на основании обобщения результатов проведенных исследований разработана научно обоснованная концепция комплексной оценки огнестойкости современных конструкций из бетона с учетом обеспечения их огнестойкости (рис. 12).

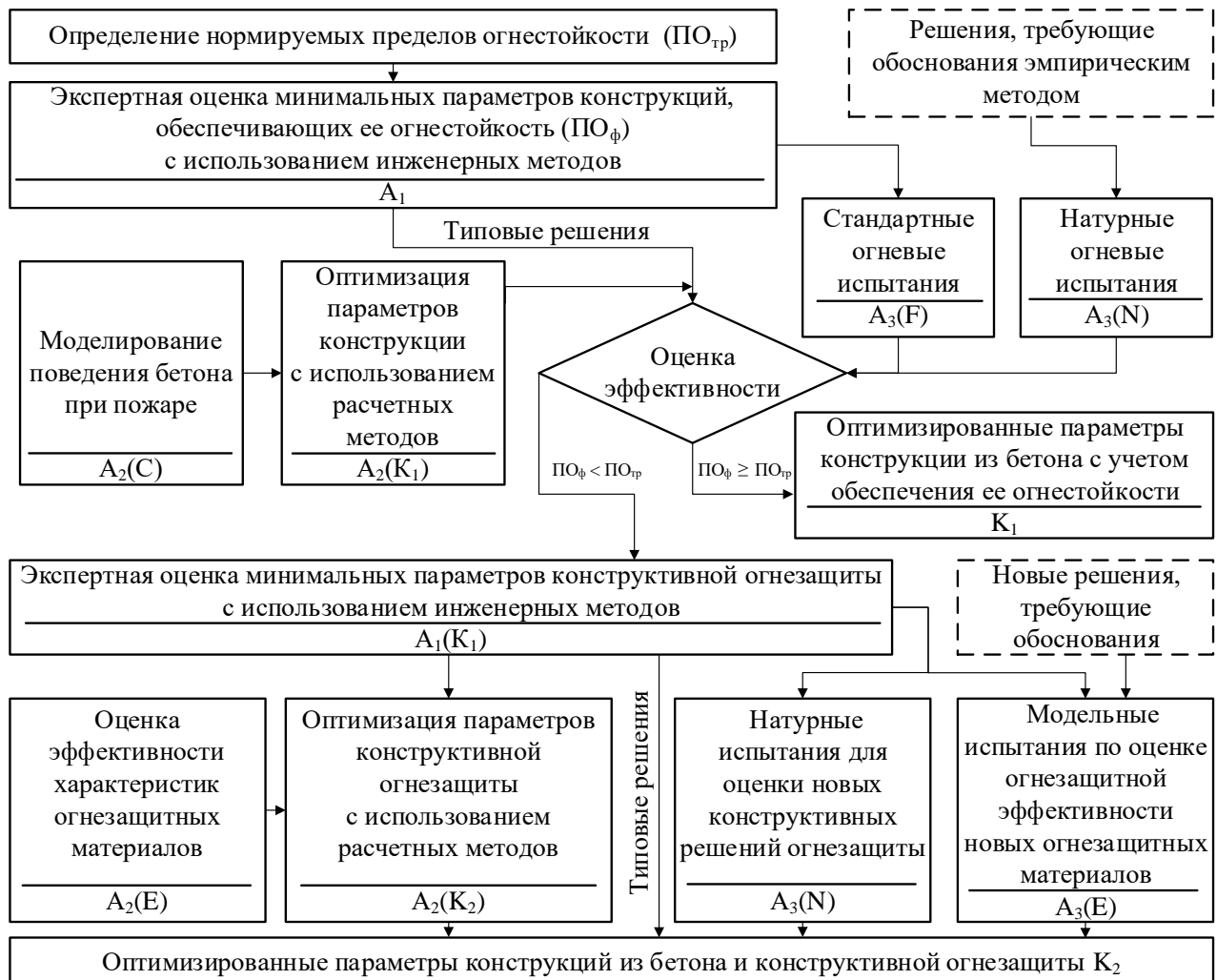


Рисунок 12. – Концепция комплексной оценки огнестойкости современных конструкций из бетона

## Заключение

В работе систематизированы подходы к определению пределов огнестойкости, классифицированы виды температурных режимов, строительных конструкций, базовых условий оценки, проведены экспериментальные и теоретические исследования, разработаны соответствующие методы, как их совокупность разработана научно обоснованная концепция комплексной оценки огнестойкости современных строительных конструкций из бетона, основанная на концептуальном развитии подходов, связанных с моделированием работы конструкций при пожаре, позволяющая обеспечить пожарную безопасность зданий и снизить экономический риск пожара за счет увеличения доли предотвращенных потерь. Концепция и ее составляющие внедрены органами и организациями, занимающимися нормотворческой и надзорной деятельностью, учреждениями и предприятиями, занимающимися проектированием, изготовлением и монтажом строительных конструкций, научной, экспертной и инжиниринговой деятельностью, профильными учебными учреждениями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полевода, И.И. Огнестойкость современных строительных конструкций из железобетона: монография / И.И. Полевода [и др.]: под ред. И.И. Полеводы. – Минск: УГЗ, 2023. – 420 с.
2. Полевода, И.И. Огнестойкость изгибаемых железобетонных конструкций из высокопрочного бетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / И.И. Полевода. – Минск, 2004. – 202 л.
3. Полевода, И.И. Трансформация базовых диаграмм деформирования тяжелого бетона на гранитном заполнителе в условиях кратковременного высокотемпературного воздействия / И.И. Полевода, В.А. Кудряшов, В.М. Кодеба // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2008. – № 1 (7). – С. 21–34. – EDN: SMTLIL.
4. 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. – EDN: KIXBAR.
5. Полевода, И.И. Экспериментальные и теоретические исследования физических и теплофизических характеристик центрифугированного бетона / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 255–267. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.255. – EDN: RNCLOG.
6. Полевода, И.И. Результаты испытания на огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова, Н.И. Чайчиц // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 37–44. – EDN: VKXNSJ.
7. 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. – EDN: ASBKFB.
8. Полевода, И.И. Модельные огневые испытания железобетонных центрифугированных колонн с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, С.М. Жамойдик, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 3. – С. 289–299. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-3.289. – EDN: HJXXED.
9. Полевода, И.И. Огнестойкость железобетонных колонн с конструктивной огнезащитой // И.И. Полевода, С.М. Жамойдик, Д.С. Нехань // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – № 2. – С. 67–81. – DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81. – EDN: OVMPIXF.
10. Басакович, И.А. Огнезащитная эффективность гипсовых плит Knauf Fireboard для вертикальных стальных профилей различного сортамента / И.А. Басакович [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 268–282. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.268. – EDN: JCWJCS.
11. Касперов, Г.И. Использование «зонного» метода для расчета пределов огнестойкости железобетонных колонн из высокопрочного бетона / Г.И. Касперов, И.И. Полевода // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2005. – № 2 (2). – С. 32–40. – EDN: SMTKJG.

12. Касперов, Г.И. Расчет пределов огнестойкости изгибаемых строительных конструкций из высокопрочного бетона в безразмерных величинах / Г.И. Касперов, И.И. Полевода // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2005. – № 1 (1). – С. 4–13. – EDN: SMNXML.
13. Голоднов, А.И. Сопоставительная оценка огнестойкости железобетонных многопустотных плит с использованием стандартов Беларуси, Украины, Европейского союза, а также расчетных методов / А.И. Голоднов [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 1 (21). – С. 30–39. – EDN: ТКРҮНІ.
14. Ширко, А.В. Прочностной расчет железобетонных плит при пожаре с использованием программной среды ANSYS / А.В. Ширко [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 1 (19). – С. 48–58. – EDN: SYKPYX.
15. Нехань, Д.С. Решение статической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн / Д.С. Нехань, И.И. Полевода // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 94–106. – EDN: FONZFL.
16. Ширко, А.В. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием программой среды ANSYS / А.В. Ширко [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 260–269. – EDN: SNFAML.
17. Полевода, И.И. Моделирование поведения бетона при теплотехническом нагружении с учетом трещинообразования методом конечных элементов на примере российского стандарта / И.И. Полевода [и др.] // Вестник Кокшетауского технического института МЧС Республики Казахстан. – 2014. – № 2 (14). – С. 3–14.
18. Полевода, И.И. Определение предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 2 (24). – С. 32–38. – EDN: WEZNOL.
19. Полевода, И.И. Моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в программном комплексе ANSYS / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 4. – С. 385–391. – DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-4.385. – EDN: ZRKOZD.
20. 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. – EDN: ONYDWP.
21. Полевода, И.И. Определение пределов огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона с применением компьютерного моделирования в ANSYS / И.И. Полевода // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 42–57. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.42. – EDN: EJENKP.
22. Полевода, И.И. Теоретическая модель стойкости высокопрочного, модифицированного и центрифугированного бетонов при пожаре / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2 (131). – С. 52–61. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-52-61.
23. Полевода, И.И. Огнестойкость изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 161–167. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.161. – EDN: XPAHNF.
24. Нехань, Д.С. Моделирование прогрева центрифугированной железобетонной колонны с учетом анизотропии теплофизических характеристик бетона по сечению / Д.С. Нехань, С.М. Жамойдик, И.И. Полевода // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 366–377. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.366. – EDN: ENCGRI.
25. Полевода, И.И. Огнестойкость центрифугированных железобетонных колонн / И.И. Полевода, Д.С. Нехань // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 139–158. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.139. – EDN: KGKYBX.
26. 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. – EDN: MHTDVR.

27. Полевода, И.И. Нормирование огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона / И.И. Полевода [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 144–163. – DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-2.144. – EDN: ILCPEE.
28. Руководство по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1981 – 56 с.
29. Методические рекомендации по оценке эффективности инноваций на этапе проекта: метод. указания / Комитет по совершенствованию тендерных процедур и инновационной деятельности Национального объединения проектировщиков; сост.: Н.П. Четверик, С.В. Чижов, О.В. Вязовиченко, А.В. Максименко, А.А. Постовалова, И.Д. Сахарова, Х.М. Ханухов. – М.: НОП, 2014. – 53 с.



**Научно обоснованная концепция комплексной оценки огнестойкости  
современных строительных конструкций из бетона**

**Scientifically based conception for integrated assessing the fire resistance  
of modern building structures**

***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

Email: ip@ucp.by

SPIN-код: 1662-9457

***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: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: ip@ucp.by

ORCID: 0000-0003-2469-3553

## SCIENTIFICALLY BASED CONCEPTION FOR INTEGRATED ASSESSING THE FIRE RESISTANCE OF MODERN BUILDING STRUCTURES

Palevoda I.I.

*Purpose.* To systematize the approaches to determining fire resistance limits and develop a scientifically based concept for a comprehensive assessment of fire resistance of modern building structures made of concrete, covering three levels of detail: expert assessment, optimizing calculation, justification of new solutions.

*Methods.* Analysis and generalization of the results of theoretical and experimental research.

*Findings.* A scientifically based conception for integrated assessing the fire resistance of modern building structures has been developed, based on the conceptual development of approaches related to modeling the operation of structures in case of fire, which makes it possible to ensure the fire safety of buildings and reduce the economic risk of fire by increasing the share of prevented losses.

*Application field of research.* The obtained research results can be used in developing standards for the design and construction of building structures made of concrete, for solving problems of assessing fire resistance in the design and construction of buildings and structures, as well as while selecting effective solutions for structural fire protection.

*Keywords:* fire resistance limit, concrete building structures, fire temperature conditions, structural fire protection, algorithm, conception.

(The date of submitting: April 15, 2024)

### REFERENCES

1. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Zaynudinova N.V., Nekhan' D.S. *Ognestoykost' sovremennykh stroitel'nykh konstruksiy iz zhelezobeta* [Fire resistance of modern reinforced concrete building structures]: monograph. Ed. by I.I. Palevoda. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 420 p. (rus)
2. Palevoda I.I. *Ognestoykost' izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruksiy iz vysokoprochnogo betona* [Fire resistance of bending reinforced concrete structures made of high-strength concrete]. PhD tech. sci. diss.: 05.23.01. Minsk, 2004. 202 p. (rus)
3. Palevoda I.I., Kudryashov V.A., Kodeba V.M. Transformatsiya bazovykh diagramm deformirovaniya tyazhelogo betona na granitnom zapolnitele v usloviyakh kratkovremennogo vysokotemperaturnogo vozdeystviya [Transformation of the basic diagrams of deformation of heavy concrete on a granite aggregate under conditions of short-term high-temperature impact]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2008. No. 1 (7). Pp. 21–34. (rus). EDN: SMTLIL.
4. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S., Batan D.S. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv tsentrifugirovannogo betona [Study of the physical and mechanical properties of centrifuged concrete]. *Science & Technique*, 2019. Vol. 18, No. 4. Pp. 319–329. (rus). DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-319-329. EDN: KIXBAR.
5. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya fizicheskikh i teplofizicheskikh kharakteristik tsentrifugirovannogo betona [Experimental and theoretical researches of physical and thermophysical characteristics of centrifuged concrete]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 3. Pp. 255–267. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.255. EDN: RNCLOG.
6. Palevoda I.I., Zaynudinova N.V., Chaychits N.I. Rezul'taty ispytaniya na ognestoykost' zhelezobetonnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom [The results of the fire test concrete slabs with unbonded reinforcement of the fire resistance]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 37–44. (rus). EDN: VKXNSJ.
7. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Rezul'taty naturnykh ognevykh ispytaniy tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh 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. EDN: ASBKFB.
8. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S. Model'nye ognevye ispytaniya zhelezobetonnykh tsentrifugirovannykh kolonn s konstruktivnoy ognezashchitoy [Reinforced concrete centrifuged columns with structural fire protection model fire tests]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 3. Pp. 289–299. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-3.289. EDN: HJXXED.

9. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S. Ognestoykost' zhelezobetonnykh kolonn s konstruktivnoy ogneshchitoy [Fire resistance of reinforced concrete columns with structural fire retardance]. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2022. No. 2. Pp. 67–81. (rus). DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81. EDN: OBMPXF.
10. Basakovich I.A., Botyan S.S., Zhamoydik S.M., Kudryashov V.A., Osyayev V.A., Palevoda I.I. Ogneshchitnaya effektivnost' gipsovykh plit Knauf Fireboard dlya vertikal'nykh stal'nykh profiley razlichnogo sortamenta [Knauf Fireboard fire protection efficiency for vertical steel profiles of various cross section shapes]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 3. Pp. 268–282. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-3.268. EDN: JCWJCS.
11. Kasperov G.I., Palevoda I.I. Ispol'zovanie «zonnogo» metoda dlya rascheta predelov ognestoykosti zhelezobetonnykh kolonn iz vysokoprochnogo betona [Use of the «zone» method for calculating the fire resistance limits of reinforced concrete columns made of high-strength concrete]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2005. No. 2 (2). Pp. 32–40. (rus). EDN: SMTKGJ.
12. Kasperov G.I., Palevoda I.I. Raschet predelov ognestoykosti izgibaemykh stroitel'nykh konstruksiy iz vysokoprochnogo betona v bezrazmernykh velichinakh [Calculation of fire resistance limits of bent building structures from high-strength concrete in dimensionless quantities]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2005. No. 1 (1). Pp. 4–13. (rus). EDN: SMNXML.
13. Golodnov A.I., Kudryashov V.A., Palevoda I.I., Otrosh Yu.A., Tkachuk I.A., Seminog N.N., Drobysch A.S. Sopostavitel'naya otsenka ognestoykosti zhelezobetonnykh mnogopustotnykh plit s ispol'zovaniem standartov Belarusi, Ukrainy, Evropeyskogo soyuza, a takzhe raschetnykh metodov [Comparative assessment fire resistance concrete hollow-core slabs using standards of Belarus, Ukraine, the European Union, and computational methods]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2015. No. 1 (21). Pp. 30–39. (rus). EDN: TKPYHJ.
14. Shirko A.V., Kamlyuk A.N., Palevoda I.I., Zaynudinova N.V. Prochnostnoy raschet zhelezobetonnykh plit pri pozhare s ispol'zovaniem programmnoy sredy ANSYS [The strength calculation of concrete slabs in a soft-ware environment ANSYS]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 1 (19). Pp. 48–58. (rus). EDN: SYKPYX.
15. Nekhan' D.S., Palevoda I.I. Reshenie staticheskoy zadachi ognestoykosti tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn [The static analysis problem of fire resistance of spun reinforced concrete columns]. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*, 2021. No. 8. Pp. 94–106. (rus). EDN: FONZFL.
16. Shirko A.V., Kamlyuk A.N., Palevoda I.I., Zaynudinova N.V. Teplotekhnicheskyy raschet ognestoykosti elementov zhelezobetonnykh konstruksiy s ispol'zovaniem programmoy sredy ANSYS [Thermotechnical calculation of fire resistance of elements of reinforced concrete structures using the ANSYS program]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2013. No. 2 (18). Pp. 260–269. EDN: SNFAML. (rus)
17. Palevoda I.I., Kamlyuk A.N., Shirko A.V., Zaynudinova N.V. Modelirovanie povedeniya betona pri teplotekhnicheskoy nagruzhennii s uchetom treshchinoobrazovaniya metodom konechnykh elementov na primere rossiyskogo standarta [Modeling the behavior of concrete under thermal engineering loading taking into account crack formation by the finite element method on the example of the Russian standard]. *Vestnik Kokshetauskogo tekhnicheskogo instituta MChS Respubliki Kazakhstan*, 2014. No. 2 (14). Pp. 3–14. (rus)
18. Palevoda I.I., Zaynudinova N.V. Opredelenie predela ognestoykosti zhelezobetonnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom [Determination of the fire resistance of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 2 (24). Pp. 32–38. (rus). EDN: WEZNOL.
19. Palevoda I.I., Zaynudinova N.V. Modelirovanie povedeniya zhelezobetonnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom v programmnom komplekse ANSYS [Modelling of the behavior of concrete slabs with unbonded reinforcement in the ANSYS program complex]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 4. Pp. 385–391. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-4.385. EDN: ZRKOZD.
20. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Reshenie 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. EDN: ONYDWP.

21. Palevoda I.I. Opredelenie predelov ognestoykosti sovremennykh stroitel'nykh konstruksiy iz zhelezobetona s primeneniem komp'yuternogo modelirovaniya v ANSYS [Determination of fire resistance limits for modern reinforced concrete building structures using computer simulation in ANSYS]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 1. Pp. 42–57. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-1.42. EDN: EJENKP.
22. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Teoreticheskaya model' stoykosti vysokoprochnogo, modifitsirovannogo i tsentrifugirovannogo betonov pri pozhare [Theoretical model of resistance of high-strength, modified and spun concrete in fire]. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2023. No. 2 (131). Pp. 52–61. (rus). DOI: 10.36773/1818-1112-2023-131-2-52-61.
23. Palevoda I.I., Zaynudinova N.V. Ognestoykost' izgibaemykh zhelezobetonnykh predvaritel'no napryazhennykh plit bez stsepleniya armatury s betonom [Fire resistance of binding prestressed concrete slab with unbonded reinforcement]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 161–167. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.161. EDN: XPAXHF.
24. Nekhan' D.S., Zhamoydik S.M., Palevoda I.I. Modelirovanie progreva tsentrifugirovannoy zhelezobetonnoy kolonny s uchedom anizotropii teplofizicheskikh kharakteristik betona po secheniyu [Modeling of heating of a centrifuged reinforced concrete column taking into account anisotropy of thermophysical characteristics of concrete in cross section]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 3, No. 4. Pp. 366–377. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.366. EDN: ENCGRI.
25. Palevoda I.I., Nekhan' D.S. Ognestoykost' tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn [Fire resistance of spun reinforced concrete columns]. *Journal of Civil Protection*, 2019. Vol. 5, No. 2. Pp. 139–158. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-2.139. EDN: KGKYBX.
26. 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. EDN: MHTDVR.
27. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Zaynudinova N.V., Nekhan' D.S. Normirovanie ognestoykosti sovremennykh stroitel'nykh konstruksiy iz zhelezobetona [Regulation of the fire resistance of modern building structures of reinforced concrete]. *Journal of Civil Protection*, 2023. Vol. 7, No. 2. Pp. 144–163. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2023.7-2.144. EDN: ILCPED.
28. *Rukovodstvo po opredeleniyu ekonomicheskoy effektivnosti povysheniya kachestva i dolgovechnosti stroitel'nykh konstruksiy* [Guidelines for determining the cost-effectiveness of improving the quality and durability of building structures]. *Research Institute for Reinforced Concrete Construction of the USSR State Construction Committee*. Moscow. Stroyizdat, 1981. 56 p. (rus)
29. Chetverik N.P., Chizhov S.V., Vyazovichenko O.V., Maksimenko A.V., Postovalova A.A., Sakharova I.D., Khanukhov Kh.M. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti innovatsiy na etape proekta* [Methodological recommendations for assessing the effectiveness of innovations at the project stage]. Committee for Improving Tender Procedures and Innovation Activities of the National Association of Designers. Moscow: National Association of Designers, 2014. 53 p. (rus)