

НОРМИРОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Полева И.И., Жамойдик С.М., Зайнудинова Н.В., Нехань Д.С.

Цель. На основании разработанной комплексной методики расчета пределов огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона получить табличные данные по оценке огнестойкости железобетонных стен, колонн, балок и плит, учитывающие наличие воздушной полости, класс бетона, вид заполнителя, предварительное напряжение арматуры, а также наличие конструктивной огнезащиты на основе огнестойких гипсовых плит и огнестойких подвесных потолков.

Методы. Анализ и обобщение результатов расчета пределов огнестойкости железобетонных строительных конструкций по разработанной на основе экспериментальных (лабораторные и огневые, в том числе натурные) и теоретических исследований методике.

Результаты. Разработаны правила определения пределов огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона, основанные на упрощенном использовании табличных данных, которые позволяют обеспечить пожарную безопасность зданий и сооружений путем оценки предела огнестойкости незащищенных железобетонных строительных конструкций и подбора параметров конструктивной огнезащиты для его повышения.

Область применения исследований. Полученные результаты могут применяться при разработке норм проектирования и конструирования железобетонных конструкций, для решения задач по оценке огнестойкости строительных конструкций и элементов при проектировании и строительстве зданий и сооружений, в том числе в рамках действующих норм.

Ключевые слова: предел огнестойкости, железобетонные конструкции, стандартный температурный режим, температурное поле, огнезащита, плита гипсовая, огнестойкий подвесной потолок.

(Поступила в редакцию 10 апреля 2023 г.)

Введение

Рассмотренные в нормативных правовых актах теоретические и экспериментальные исследования огнестойкости позволяют решить задачу по определению пределов огнестойкости железобетонных конструкций. Вместе с тем с учетом активно развивающейся отрасли строительства существующие подходы по определению пределов огнестойкости не могут быть достоверно применены для ряда современных строительных конструкций из железобетона. Так, до недавнего времени в нормативных правовых актах и научной литературе отсутствовали обоснованные данные для расчета пределов огнестойкости железобетонных конструкций в части влияния прочности (класса бетона), состава бетонной смеси и технологий производства на поведение конструкций при пожаре. Для полых центрифугированных колонн дополнительно следует отметить отсутствие до недавнего времени обоснованных данных для расчета свойств бетона по сечению конструкции при пожаре и температурного поля в них, механизма разрушения при пожаре, а для железобетонных предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном – значений критической температуры и механизма разрушения при пожаре. При этом для вышеперечисленных конструкций также отсутствовали методы оценки хрупкого взрывообразного разрушения при пожаре и инженерные методы расчета пределов огнестойкости, позволяющие учесть, помимо особенностей современных железобетонных конструкций, влияние конструктивной огнезащиты на их огнестойкость. Наличие указанных проблем требовало

проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований с разработкой новых и дополнением существующих правил расчета пределов огнестойкости.

На основании результатов экспериментальных [1–8] и теоретических исследований [9–18], выполненных с 1998 по 2022 г., по огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона разработаны расчетные модели по оценке огнестойкости железобетонных конструкций, в том числе с учетом огнезащиты, позволившие решить тепло-техническую и прочностную задачи расчета их огнестойкости. В итоге разработана комплексная методика и рассчитаны пределы огнестойкости современных конструкций из железобетона, сведенные в табличные данные, которые положены в основу правил расчета предела огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона.

Основная часть

На сегодня в мировой практике оценки огнестойкости сложились единые подходы к аналитическому определению пределов огнестойкости, основанные на использовании инженерных методов, включающих применение табличной информации, упрощенных и общих расчетных методик. В настоящей статье приведены табличные данные, позволяющие определить параметры отдельных строительных конструкций из железобетона, обеспечивающие предел огнестойкости в диапазоне от 30 до 240 мин. Значения пределов огнестойкости определены на основе обработки результатов огневых, в том числе натурных, испытаний, лабораторных исследований и расчетов, полученных для типовых конструкций.

Следует отметить, что в таблицах 2, 3, 5–10, 13, 15, 17 настоящей статьи приведены некоторые данные технических нормативных правовых актов. Их указание необходимо с целью модификации размеров железобетонных конструкций с силикатным заполнителем под карбонатный заполнитель, а также определения заложенной в указанных таблицах критической температуры арматуры для оценки в дальнейшем эффективности применения конструктивной огнезащиты. Сопоставление табличных значений указанных таблиц с данными других таблиц настоящей статьи позволяет провести сравнительную оценку минимальных размеров железобетонных конструкций, приведенных в таблицах ТКП EN 1992-1-2, со значениями для конструкций, табличные значения для которых в нем не приведены, а также со значениями, полученными при использовании конструктивной огнезащиты.

В таблицах приведены минимальные размеры конструкций для обеспечения их огнестойкости. Допускается линейная интерполяция по значениям, приведенным в таблицах. Некоторые табличные значения расстояний до оси арматуры¹ менее требуемых для защиты арматуры от коррозии, их следует применять для интерполяции при определении предела огнестойкости конструкций промежуточных размеров и для модификации при использовании высокопрочных бетонов.

При использовании табличных данных не требуется производить дополнительные проверки: сопротивления срезу и кручению; анкеровки; на хрупкое взрывообразное разрушение, за исключением случаев, когда расстояние до оси арматуры 70 мм и более.

Для обеспечения предела огнестойкости по предельному состоянию R приведенные в таблицах минимальные требования по размерам поперечного сечения и расстоянию до оси арматуры определены с учетом выполнения условия: $E_{d,fi} / R_{d,fi} \leq 1$ (где $E_{d,fi}$ – расчетный результат воздействия при пожаре; $R_{d,fi}$ – расчетное сопротивление при пожаре).

Высокопрочный бетон. Стойкость бетона при пожаре как нормируемый показатель не рассматривается, а оценивается непосредственно по пределу огнестойкости строительных конструкций, выполненных из него. Однако для учета прочности бетона применяются поправочные коэффициенты.

¹ Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости: ТКП EN 1992-1-2-2009 (02250). – Введ. 01.01.10. – Минск: Минстройархитектуры, 2010. – 96 с.

Для обеспечения нормируемых пределов огнестойкости приведенные в таблицах минимальные расстояния от оси арматуры до поверхностей элемента для конструкций, изготавливаемых из бетонов классов $C^{55}/_{67} - C^{80}/_{95}$, следует умножать на поправочный коэффициент, приведенный в таблице 1.

Таблица 1. – Поправочные коэффициенты, учитывающие прочность бетона на сжатие²

| Вид конструкции | Поправочный коэффициент в зависимости от класса бетона | |
|--|--|-------------------------------|
| | $C^{55}/_{67} - C^{60}/_{75}$ | $C^{70}/_{85} - C^{80}/_{95}$ |
| Плоские конструкции с односторонним нагревом | 1,1 | 1,3 |
| В общем случае для всех конструкций | 1,2 | 1,6 |

Для бетона класса $C^{90}/_{105}$, а также для высокопрочного бетона независимо от класса с содержанием микрокремнезема более 6 % от массы цемента характерно хрупкое взрывообразное разрушение при пожаре. Для конструкций, изготовленных из указанного бетона, следует применять один из следующих способов защиты³:

- дополнительное конструктивное армирование поверхностного слоя бетона со стороны нагрева арматурной сеткой с ячейками размером не менее 50×50 мм и диаметром арматуры 2 мм (толщина защитного слоя для дополнительной арматуры не менее 40 мм);
- применение бетонов, обеспечивающих целостность железобетонной конструкции при пожаре (эффективность примененных составов бетонной смеси необходимо подтвердить экспериментально);
- дополнительное конструктивное армирование поверхностного слоя бетона со стороны нагрева арматурной сеткой с размерами ячеек от 25 до 70 мм и диаметром арматуры от 0,5 до 1,0 мм (толщина защитного слоя для дополнительной арматуры не менее 15 мм);
- добавление в бетонную смесь не менее 2 кг/м^3 полипропиленовых волокон;
- нанесение на нагреваемую поверхность бетона огнезащитного покрытия, при котором не происходит хрупкое разрушение (огнезащитную эффективность покрытия необходимо подтвердить экспериментально);
- применением конструктивной огнезащиты со стороны нагреваемой поверхности бетона.

При невозможности обеспечения перечисленных способов защиты от хрупкого взрывообразного разрушения использование данных, приведенных в статье, не допускается.

Огнестойкость железобетонных стен. Огнестойкость несущих железобетонных стен считается обеспеченной, если параметры конструкции соответствуют приведенным в таблице 2. При этом отношение высоты несущей стены к ее толщине не должно превышать 40, как и в случае с ненесущими стенами. Значения минимальной толщины, приведенные в таблице 2, применимы для бетонных стен в связевых конструктивных системах.

Таблица 2. – Минимальные параметры железобетонных стен, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости⁴

| Предел огнестойкости | Толщина δ_{\min}^* и расстояние до оси арматуры стен a , мм | Коэффициент расчетного уровня нагрузки при пожаре | | | |
|----------------------|--|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | $\eta_{fi} = 0,35$ | | $\eta_{fi} = 0,7$ | |
| | | односторонний обогрев | двухсторонний обогрев | односторонний обогрев | двухсторонний обогрев |
| REI 30 | δ_{\min} | 100 / 90 | 120 / 108 | 120 / 108 | 120 / 108 |
| | a | 10** | 10** | 10** | 10** |
| REI 60 | δ_{\min} | 110 / 108 | 120 / 108 | 130 / 117 | 140 / 126 |
| | a | 10** | 10** | 10** | 10** |
| REI 90 | δ_{\min} | 120 / 108 | 140 / 126 | 140 / 126 | 170 / 153 |
| | a | 20** | 10** | 25 | 25 |

² Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 (02250). – Взамен ПП-02 к СНБ 2.02.01-98. – Введ. 12.06.08. – Минск: Минсктипроект, 2008. – 126 с.

³ См. сноску 1.

⁴ См. сноску 1.

Продолжение таблицы 2

| Предел огнестойкости | Толщина δ_{\min} * и расстояние до оси арматуры стен a , мм | Коэффициент расчетного уровня нагрузки при пожаре | | | |
|----------------------|--|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | $\eta_{fi} = 0,35$ | | $\eta_{fi} = 0,7$ | |
| | | односторонний обогрев | двухсторонний обогрев | односторонний обогрев | двухсторонний обогрев |
| REI 120 | δ_{\min} | 150 / 135 | 160 / 144 | 160 / 144 | 220 / 198 |
| | a | 25 | 25 | 35 | 35 |
| REI 180 | δ_{\min} | 180 / 162 | 200 / 180 | 210 / 189 | 270 / 243 |
| | a | 40 | 45 | 50 | 55 |
| REI 240 | δ_{\min} | 230 / 207 | 250 / 225 | 270 / 243 | 350 / 315 |
| | a | 55 | 55 | 60 | 60 |

Примечание. * Толщина стен δ_{\min} указана для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Предел огнестойкости обеспечивается при выполнении требований СП 5.03.01⁵ по защите арматуры от коррозии.

Огнестойкость железобетонных колонн. Огнестойкость железобетонных колонн в связевых конструктивных системах считается обеспеченной, если параметры конструкции соответствуют приведенным: в таблице 3 – для колонн сплошного сечения с обычной арматурой; таблице 4 – для центрифугированных колонн, при выполнении следующих условий: армирование $A_s \leq 0,04A_c$; эксцентриситет по теории первого порядка $e \leq 0,15h$ (или $0,15b$); расчетная длина колонны $l_0 \leq 3$ м (где A_s – площадь сечения арматуры; A_c – площадь поперечного сечения конструкции; h – высота колонны; b – ширина колонны), принимаемая равной как для нормальных условий.

Таблица 3. – Минимальные параметры колонн сплошного сечения, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости⁶

| Предел огнестойкости | Ширина b_{\min} * и расстояние до оси арматуры a колонн, мм | Коэффициент расчетного уровня нагрузки при пожаре | | | |
|----------------------|---|---|-------------------|-------------------|------------------------|
| | | нагрев более чем с одной стороны | | | нагрев с одной стороны |
| | | $\eta_{fi} = 0,2$ | $\eta_{fi} = 0,5$ | $\eta_{fi} = 0,7$ | $\eta_{fi} = 0,7$ |
| R 30 | b_{\min} | 200 / 180 | 200 / 180 | 200 / 180 | 155 / 139,5 |
| | a | 25 | 25 | 32 | 25 |
| | b_{\min} | | | 300 / 270 | |
| | a | | | 27 | |
| R 60 | b_{\min} | 200 / 180 | 200 / 180 | 250 / 225 | 155 / 139,5 |
| | a | 25 | 36 | 46 | 25 |
| | b_{\min} | | 300 / 270 | 350 / 315 | |
| | a | | 31 | 40 | |
| R 90 | b_{\min} | 200 / 180 | 300 / 270 | 350 / 315 | 155 / 139,5 |
| | a | 31 | 45 | 53 | 25 |
| | b_{\min} | 300 / 270 | 400 / 360 | 450 / 405 | |
| | a | 25 | 38 | 40** | |
| R 120 | b_{\min} | 250 / 225 | 350 / 315 | 350 / 315 | 175 / 157,5 |
| | a | 40 | 45** | 57** | 35 |
| | b_{\min} | 350 / 315 | 450 / 405 | 450 / 405 | |
| | a | 35 | 40** | 51** | |
| R 180 | b_{\min} | 350 / 315 | 350 / 315 | 450 / 405 | 230 / 207 |
| | a | 45** | 63** | 70** | 55 |
| R 240 | b_{\min} | 350 / 315 | 450 / 405 | | 295 / 265,5 |
| | a | 61** | 75** | | 70 |

Примечание. * Ширина колонн b_{\min} указана для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Колонна должна иметь не менее 8 стержней.

⁵ 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.

⁶ См. сноску 1.

Огнестойкость полых центрифугированных железобетонных колонн считается обеспеченной, если параметры конструкции соответствуют приведенным в таблице 4. Данные, представленные в таблице 4, приведены для бетонов с силикатным заполнителем. При использовании карбонатного заполнителя толщина стенки колонны может быть уменьшена на 10 %. При этом минимальная толщина стенки не может быть меньше 50 мм⁷.

Таблица 4. – Минимальные параметры центрифугированных железобетонных колонн, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости [13]

| Пределы огнестойкости | Внешний диаметр колонны b / толщина стенки δ / расстояние до оси арматуры a , мм | | | |
|-----------------------|---|--|--|--|
| | Коэффициент расчетного уровня нагрузки при пожаре | | | |
| | $\eta_{fi} = 0,15$ | $\eta_{fi} = 0,3$ | $\eta_{fi} = 0,5$ | $\eta_{fi} = 0,7$ |
| R 45 | 300 / 50 / 20* | 300 / 50 / 20* | 300 / 50 / 20* | 300 / 50 / 22 |
| R 60 | 300 / 60 / 26* | 300 / 60 / 26* | 400 / 60 / 29 800 / 60 / 26* 400 / 70 / 26* | 400 / 70 / 33 400 / 80 / 28 |
| R 90 | 400 / 80 / 26* | 400 / 80 / 38 1000 / 80 / 33 600 / 90 / 34 1000 / 90 / 31 | 800 / 80 / 39 1000 / 80 / 37 600 / 90 / 38 1000 / 90 / 35 | 600 / 100 / 46 1000 / 90 / 39 |
| R 120 | 600 / 100 / 26* 700 / 90 / 26* | 600 / 100 / 47 1000 / 100 / 43 800 / 110 / 44 1000 / 110 / 41 | 800 / 100 / 50 1000 / 100 / 48 800 / 110 / 48 1000 / 110 / 46 | 1000 / 110 / 53 800 / 120 / 55 1000 / 120 / 51 |
| R 150 | 800 / 110 / 26* | 800 / 120 / 54 | 800 / 120 / 58 | —** |
| R 180 | 800 / 120 / 26* | —** | —** | —** |

Примечание. * Расположение арматуры обеспечивается выполнением положений по проектированию и изготовлению железобетонных колонн согласно СП 5.03.01⁸, в том числе центрифугированных кольцевого сечения⁹.

** Предел огнестойкости не достигается при всевозможных сочетаниях внешнего диаметра колонны (до 1000 мм), толщины стенки (до 120 мм) и расстояния до оси арматуры (до 60 мм)¹⁰.

Огнестойкость железобетонных балок. Огнестойкость железобетонных балок считается обеспеченной, если параметры конструкции и вид соответствуют приведенным в таблицах 5–9. Таблицы используются для балок, нагреваемых при пожаре с трех сторон. Теплоизолирующая способность плит или других элементов, изолирующих верхнюю сторону балки, должна быть обеспечена в течение времени, соответствующего требуемому пределу огнестойкости.

С учетом того что при пожаре нижние углы балок нагреваются наиболее интенсивно, при армировании в один ряд расстояние от боковой поверхности до оси углового стержня (каната или проволоки) a_{sd} (мм) определяется по формуле¹¹:

$$a_{sd} = a + 10 \text{ мм}, \quad (1)$$

где a – расстояние до оси арматуры, мм.

Если при проектировании предварительно напряженных элементов применяется арматура с критической температурой ниже 400 °С, то минимальную ширину растянутого элемента или растянутой зоны балки следует увеличить по формуле¹²:

$$b_{\text{mod}} \geq b_{\text{min}} + k \cdot (400 - \theta_{\text{cr}}), \quad (2)$$

где θ_{cr} – критическая температура, °С; $k = 0,8 \text{ мм/°С}$.

⁷ 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.

⁸ См. сноску 5.

⁹ См. сноску 7.

¹⁰ См. сноску 7.

¹¹ См. сноску 1.

¹² См. сноску 1.

Таблица 5. – Минимальные параметры свободно опертых железобетонных балок, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости¹³

| Предел огнестойкости | Толщина стенки балки b_w , мм | Ширина балки b_{min} и среднее расстояние до оси арматуры a , мм | Возможные комбинации ширины балки b_{min} (с силикатным / карбонатным заполнителем бетона) и среднего расстояния до оси арматуры a | | | |
|----------------------|---------------------------------|--|--|-----------|-----------|-----------|
| | | | | | | |
| R 30 | 80 | b_{min} | 80 / 72 | 120 / 108 | 160 / 144 | 200 / 180 |
| | | a | 25 | 20 | 15* | 15 |
| R 60 | 100 | b_{min} | 120 / 108 | 160 / 144 | 200 / 180 | 300 / 270 |
| | | a | 40 | 35 | 30* | 25 |
| R 90 | 110 | b_{min} | 150 / 135 | 200 / 180 | 300 / 270 | 400 / 360 |
| | | a | 55 | 45 | 40* | 35 |
| R 120 | 130 | b_{min} | 200 / 180 | 240 / 216 | 300 / 270 | 500 / 450 |
| | | a | 65 | 60 | 55* | 50 |
| R 180 | 150 | b_{min} | 240 / 216 | 300 / 270 | 400 / 360 | 600 / 540 |
| | | a | 80 | 70 | 65* | 60 |
| R 240 | 170 | b_{min} | 280 / 252 | 350 / 315 | 500 / 450 | 700 / 630 |
| | | a | 90 | 80 | 75* | 70 |

Примечание. * При армировании в один ряд для значений b_{min} , не превосходящих указанных, требуется пересчет расстояния до оси арматуры по формуле (1).

Таблица 6. – Минимальные параметры предварительно напряженных свободно опертых железобетонных балок, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости¹⁴

| Предел огнестойкости | Толщина стенки балки b_w^* , мм | Ширина балки b_{min}^* и среднее расстояние до оси арматуры a , мм | Возможные комбинации ширины балки b_{min}^* и среднего расстояния до оси арматуры (стержня / проволоки или каната) a , мм | | | |
|----------------------|-----------------------------------|--|---|-----------|-----------|-----------|
| | | | | | | |
| R 30 | 80 / 72 | b_{min} | 80 / 72 | 120 / 108 | 160 / 144 | 200 / 180 |
| | | a | 35 / 40 | 30 / 35 | 25 / 30** | 25 / 30 |
| R 60 | 100 / 90 | b_{min} | 120 / 108 | 160 / 144 | 200 / 180 | 300 / 270 |
| | | a | 50 / 55 | 45 / 50 | 40 / 45** | 35 / 40 |
| R 90 | 110 / 99 | b_{min} | 150 / 135 | 200 / 180 | 300 / 270 | 400 / 360 |
| | | a | 65 / 70 | 55 / 60 | 50 / 55** | 45 / 50 |
| R 120 | 130 / 107 | b_{min} | 200 / 180 | 240 / 216 | 300 / 270 | 500 / 450 |
| | | a | 75 / 80 | 70 / 75 | 65 / 70** | 60 / 65 |
| R 180 | 150 / 135 | b_{min} | 240 / 216 | 300 / 270 | 400 / 360 | 600 / 540 |
| | | a | 90 / 95 | 80 / 85 | 75 / 80** | 70 / 75 |
| R 240 | 170 / 153 | b_{min} | 280 / 252 | 350 / 315 | 500 / 450 | 700 / 630 |
| | | a | 100 / 105 | 90 / 95 | 85 / 90** | 80 / 85 |

Примечание. * Толщина стенки b_w и ширина b_{min} балки указаны для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** При армировании в один ряд для значений b_{min} , не превосходящих указанных, требуется пересчет расстояния до оси арматуры по формуле (1).

Неразрезные балки. Минимальные расстояния от нижней и боковых поверхностей до оси арматуры и ширина неразрезных балок приведены в таблицах 7–8 для пределов огнестойкости от R 30 до R 240 и используются при соблюдении одновременно требований по их конструированию согласно СП 5.03.01¹⁵ и по перераспределению изгибающего момента при нормальной температуре (не более 15 %). В противном случае балки рассматриваются как свободно опертые.

¹³ См. сноску 1.

¹⁴ См. сноску 1.

¹⁵ См. сноску 5.

Таблица 7. – Минимальные параметры неразрезных железобетонных балок, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости¹⁶

| Предел огнестойкости | Толщина стенки b_w^* , мм | Ширина балки b_{min}^* и среднее расстояние до оси арматуры a , мм | Возможные комбинации ширины балки b_{min}^* и среднего расстояния до оси арматуры a , мм | | | |
|----------------------|-----------------------------|--|--|--------------------|-----------|-----------|
| | | | | | | |
| R 30 | 80 / 72 | b_{min}^* | 80 / 72 | 160 / 144 | | |
| | | a | 15 ^{**} | 12 ^{**,1} | | |
| R 60 | 100 / 90 | b_{min}^* | 120 / 108 | 200 / 180 | | |
| | | a | 25 | 12 ^{**,1} | | |
| R 90 | 110 / 99 | b_{min}^* | 150 / 135 | 250 / 225 | | |
| | | a | 35 | 25 ¹ | | |
| R 120 | 130 / 107 | b_{min}^* | 200 / 180 | 300 / 270 | 450 / 405 | 500 / 450 |
| | | a | 45 | 35 ¹ | 35 | 30 |
| R 180 | 150 / 135 | b_{min}^* | 240 / 216 | 400 / 360 | 550 / 495 | 600 / 540 |
| | | a | 60 | 50 ¹ | 50 | 40 |
| R 240 | 170 / 153 | b_{min}^* | 280 / 252 | 500 / 450 | 650 / 585 | 700 / 630 |
| | | a | 75 | 60 ¹ | 60 | 50 |

Примечание. * Толщина стенки b_w и ширина b_{min} балки указаны для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Предел огнестойкости обеспечивается при выполнении требований СП 5.03.01¹⁷ по защите арматуры от коррозии.

¹ При армировании в один ряд для значений b_{min} , не превосходящих указанных, требуется пересчет расстояния до оси арматуры по формуле (1).

Следует отметить, что для конструкций с пределами огнестойкости R90 и выше следует обеспечить минимально необходимую площадь верхней арматуры вблизи опоры и в пролете согласно ТКП EN 1992-1-2 с учетом положений СП 5.03.01. В случае необеспечения необходимой площади поперечного сечения верхней арматуры требуемый предел огнестойкости не обеспечивается.

Таблица 8. – Минимальные параметры предварительно напряженных неразрезных железобетонных балок, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости

| Предел огнестойкости | Толщина стенки b_w^* , мм | Ширина балки b_{min}^* и среднее расстояние до оси арматуры a , мм | Возможные комбинации ширины балки b_{min}^* и среднего расстояния до оси арматуры (стержня / проволоки или каната) a | | | |
|----------------------|-----------------------------|--|--|---|-----------|-----------|
| | | | | | | |
| R 30 | 80 / 72 | b_{min} | 80 / 72 | 160 / 144 | | |
| | | a | 25 ^{**} / 30 ^{**} | 22 ^{**,1} / 27 ^{**,1} | | |
| R 60 | 100 / 90 | b_{min} | 120 / 108 | 200 / 180 | | |
| | | a | 35 / 40 | 22 ^{**,1} / 27 ^{**,1} | | |
| R 90 | 110 / 99 | b_{min} | 150 / 135 | 250 / 225 | | |
| | | a | 45 / 50 | 35 ¹ / 40 ¹ | | |
| R 120 | 130 / 107 | b_{min} | 200 / 180 | 300 / 270 | 450 / 405 | 500 / 450 |
| | | a | 55 / 60 | 45 ¹ / 50 ¹ | 45 / 50 | 40 / 55 |
| R 180 | 150 / 135 | b_{min} | 240 / 216 | 400 / 360 | 550 / 495 | 600 / 540 |
| | | a | 70 / 75 | 60 ¹ / 65 ¹ | 60 / 65 | 50 / 55 |
| R 240 | 170 / 153 | b_{min} | 280 / 252 | 500 / 450 | 650 / 585 | 700 / 630 |
| | | a | 85 / 90 | 70 ¹ / 75 ¹ | 70 / 75 | 60 / 65 |

Примечание. * Толщина стенки b_w и ширина b_{min} балки указаны для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Предел огнестойкости обеспечивается при выполнении требований СП 5.03.01 по защите арматуры от коррозии.

¹ При армировании в один ряд для значений b_{min} , не превосходящих указанных, требуется пересчет расстояния до оси арматуры по формуле (1).

¹⁶ См. сноску 1.

¹⁷ См. сноску 5.

Толщину стенок и ширину неразрезных балок с пределами огнестойкости от R 120 до R 240 необходимо увеличить в соответствии с таблицей 9 для предотвращения разрушения сжатого бетона или среза над первой промежуточной опорой, если не обеспечивается сопротивление балки и соединение изгибу на крайней опоре или на первой промежуточной опоре $V_{Ed} > 2/3 \cdot V_{Rd, max}$ (где V_{Ed} – расчетное поперечное усилие при нормальной температуре; $V_{Rd, max}$ – расчетное сопротивление срезу железобетонного элемента).

Таблица 9. – Предел огнестойкости неразрезных железобетонных балок двутаврового сечения (включая предварительно напряженные), для которых необходимо увеличивать ширину и толщину стенки¹⁸

| Предел огнестойкости | Минимальные ширина b_{min} и толщина стенки b_w балки (с силикатным / карбонатным заполнителем бетона), мм |
|----------------------|--|
| R 120 | 220 / 198 |
| R 180 | 380 / 342 |
| R 240 | 480 / 432 |

Балки, подверженные огневому воздействию со всех сторон при пожаре. Таблицы 5–8 могут применяться, только если высота балки не менее ширины, нормируемой для требуемого предела огнестойкости, а площадь ее поперечного сечения не менее $A_c = 2b_{min}^2$.

Огнестойкость железобетонных плит. Огнестойкость железобетонных плит считается обеспеченной, если параметры конструкции соответствуют приведенным в таблицах 10–18. В таблицах 10 и 11 l_x и l_y – размеры пролетов плит при армировании по двум перпендикулярным направлениям (l_y – больший пролет), расстояние до оси арматуры в графах 4 и 5 применяется для плит, армированных в двух направлениях, которые опираются по четырем сторонам. В противном случае плиту следует рассматривать армированной в одном направлении.

Таблица 10. – Минимальные параметры статически определимых сплошных железобетонных плит, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости¹⁹

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* , мм | Расстояние до оси арматуры a , мм | | |
|----------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| | | Армирование в одном направлении | Армирование в двух направлениях | |
| | | | $l_y / l_x < 1,5$ | $1,5 < l_y / l_x < 2$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| REI 30 | 60 / 54 | 10** | 10** | 10** |
| REI 60 | 80 / 72 | 20 | 10** | 15** |
| REI 90 | 100 / 90 | 30 | 15** | 20 |
| REI 120 | 120 / 108 | 40 | 20 | 25 |
| REI 180 | 150 / 135 | 55 | 30 | 40 |
| REI 240 | 175 / 158 | 65 | 40 | 50 |

Примечание. * Толщина плиты h_s^* указана для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Предел огнестойкости обеспечивается при выполнении требований СП 5.03.01²⁰ по защите арматуры от коррозии.

Таблица 11. – Минимальные параметры предварительно напряженных сплошных железобетонных плит, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости (критическая температура для предварительно напряженных стержней 400 °С, для проволоки и канатов – 350 °С)

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* , мм | Расстояние до оси арматуры (стержня / проволоки или каната) a , мм | | |
|----------------------|----------------------------|--|---------------------------------|-----------------------|
| | | Армирование в одном направлении | Армирование в двух направлениях | |
| | | | $l_y / l_x < 1,5$ | $1,5 < l_y / l_x < 2$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| REI 30 | 60 / 54 | 20 / 25 | 20 / 25 | 20 / 25 |
| REI 60 | 80 / 72 | 30 / 35 | 20 / 25 | 25 / 30 |

¹⁸ См. сноску 1.

¹⁹ См. сноску 1.

²⁰ См. сноску 5.

Продолжение таблицы 11

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* , мм | Расстояние до оси арматуры (стержня / проволоки или каната) a , мм | | |
|----------------------|----------------------------|--|---------------------------------|-----------------------|
| | | Армирование в одном направлении | Армирование в двух направлениях | |
| | | | $l_y / l_x < 1,5$ | $1,5 < l_y / l_x < 2$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| REI 90 | 100 / 90 | 40 / 45 | 25 / 30 | 30 / 35 |
| REI 120 | 120 / 108 | 50 / 55 | 30 / 35 | 35 / 40 |
| REI 180 | 150 / 135 | 60 / 65 | 40 / 45 | 50 / 55 |
| REI 240 | 175 / 158 | 75 / 80 | 50 / 55 | 60 / 65 |

Примечание. * Толщина плиты h_s^* указана для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

Таблица 12. – Минимальные параметры свободно опертых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры (критическая температура 230 °С) с бетоном, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости [11]

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* , мм | Расстояние до оси арматуры a (мм) при армировании в одном направлении | |
|----------------------|----------------------------|---|---|
| | | при отсутствии защиты обогреваемой поверхности | при наличии защиты обогреваемой поверхности ²¹ |
| | | | |
| REI 30 | 60 / 54 | 35 | 25 |
| REI 60 | 80 / 72 | 55 | 25 |
| REI 90 | 100 / 90 | 60 | 30 |

Примечание. * Толщина плиты h_s^* указана для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

Неразрезные плиты. Значения, приведенные в таблицах 10 и 11 (графы 2 и 4), также применимы для неразрезных плит, армированных по одному и двум направлениям.

Таблицы 10 и 11 могут быть использованы для неразрезных плит с перераспределением изгибающего момента при нормальной температуре не более 15 %. При перераспределении моментов более 15 % или несоблюдении требований по их конструированию согласно СП 5.03.01²² каждый пролет неразрезной плиты рассматривается как свободно опертая плита с использованием таблиц 10 и 11 (графы 2, 3, 4 или 5). Для неразрезных плит применимы подходы для неразрезных балок. При их несоблюдении каждый пролет следует рассматривать как свободно опертый.

Для пределов огнестойкости REI 90 и выше в опорных полосах конструкции необходимо выводить по всей длине пролетов не менее 20 % от общего количества арматуры, требуемой над промежуточными опорами.

Плоские плиты. Приведенные правила применимы для плоских плит, для которых перераспределение момента не превышает 15 %. В противном случае расстояние до оси арматуры определяется как для плит с армированием в одном направлении – по графе 3 таблиц 10 и 11, а минимальная толщина – по таблице 13. В качестве расстояния до оси арматуры a принимается расстояние до нижнего ряда арматуры.

Таблица 13. – Минимальные параметры плоских железобетонных плит, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости (критическая температура арматуры 500 °С)²³

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* , мм | Расстояние до оси арматуры a , мм |
|----------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| REI 30 | 150 / 135 | 10** |
| REI 60 | 180 / 162 | 15** |
| REI 90 | 200 / 180 | 25 |
| REI 120 | 200 / 180 | 35 |
| REI 180 | 200 / 180 | 45 |
| REI 240 | 200 / 180 | 50 |

Примечание. * Толщина плиты h_s^* указана для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Предел огнестойкости обеспечивается при выполнении требований СП 5.03.01 по защите арматуры от коррозии.

²¹ См. сноску 1.

²² См. сноску 5.

²³ См. сноску 1.

Таблица 14. – Минимальные параметры предварительно напряженных плоских железобетонных плит, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости (критическая температура для предварительно напряженных стержней 400 °С, для проволоки и канатов – 350 °С)

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* , мм | Расстояние до оси арматуры (стержня / проволоки или каната) a , мм |
|----------------------|----------------------------|--|
| REI 30 | 150 / 135 | 20 / 25 |
| REI 60 | 180 / 162 | 25 / 30 |
| REI 90 | 200 / 180 | 35 / 40 |
| REI 120 | 200 / 180 | 45 / 50 |
| REI 180 | 200 / 180 | 55 / 60 |
| REI 240 | 200 / 180 | 60 / 65 |

Примечание. * Толщина плиты h_s^* указана для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

Ребристые плиты. Для оценки огнестойкости армированных в одном направлении ребристых железобетонных плит (в том числе предварительно напряженных) необходимо применять:

- для ребер: требования, изложенные для свободно опертых и неразрезных балок.
- для полок: требования, изложенные для неразрезных плит, графы 2 и 5 таблиц 10 и 11.

Для армированных в двух направлениях железобетонных ребристых плит предел огнестойкости может быть определен с использованием таблиц 15–18. Данные, представленные в указанных таблицах, справедливы для ребристых плит с равномерно распределенной силовой нагрузкой.

Для ребристых плит с армированием в несколько рядов приведенное расстояние до оси арматуры должно быть не менее указанного в таблицах 15–18. В неразрезных ребристых плитах верхняя арматура должна быть расположена в верхней половине полки.

Таблицы 15 и 16 распространяются на свободно опертые армированные по двум направлениям ребристые плиты, а также на армированные в двух направлениях ребристые плиты как минимум с одним защемленным краем и пределом огнестойкости ниже REI 180.

Таблица 15. – Минимальные параметры армированных в двух направлениях свободно опертых ребристых железобетонных плит, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости²⁴

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* и расстояние до оси арматуры c в полке, мм | Ширина ребер b_{min}^* и расстояние до оси арматуры a , мм | Возможные комбинации ширины ребер b_{min} и расстояния до оси арматуры a , мм | | |
|----------------------|--|--|---|-----------------|-------------------------------|
| | | | | | |
| REI 30 | $h_s = 80 / 72$ $c = 10^{**}$ | b_{min} a | 80 / 72 15 ^{**} | – | – |
| REI 60 | $h_s = 80 / 72$ $c = 10^{**}$ | b_{min} a | 100 / 90 35 | 120 / 104 25 | 200 / 180 15 ^{**} |
| REI 90 | $h_s = 100 / 90$ $c = 15^{**}$ | b_{min} a | 120 / 108 45 | 160 / 144 40 | 250 / 215 30 |
| REI 120 | $h_s = 120 / 108$ $c = 20$ | b_{min} a | 160 / 144 60 | 190 / 171 55 | 300 / 270 40 |
| REI 180 | $h_s = 150 / 135$ $c = 30$ | b_{min} a | 220 / 198 75 | 260 / 234 70 | 410 / 369 60 |
| REI 240 | $h_s = 175 / 153$ $c = 40$ | b_{min} a | 280 / 252 90 | 350 / 315 75 | 500 / 450 70 |

Примечание. * Толщина плиты h_s и ширина ребер b_{min} указаны для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Предел огнестойкости обеспечивается при выполнении требований СП 5.03.01²⁵ по защите арматуры от коррозии.

²⁴ См. сноску 1.

²⁵ См. сноску 5.

Таблица 16. – Минимальные параметры армированных в двух направлениях предварительно напряженных свободно опертых ребристых железобетонных плит, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости (критическая температура для предварительно напряженных стержней 400 °С, для проволоки и канатов – 350 °С)

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* и расстояние до оси арматуры c^{**} в полке, мм | Ширина ребер b_{\min}^* и расстояния до оси арматуры a^{**} , мм | Возможные комбинации минимальных ширины ребер b_{\min} и расстояния до оси арматуры a , мм | | |
|----------------------|---|--|--|-----------|-----------|
| | | | | | |
| REI 30 | $h_s = 80 / 72$ $c = 20 / 25$ | b_{\min} | 80 / 72 | – | – |
| | | a | 25 / 30 | | |
| REI 60 | $h_s = 80 / 72$ $c = 20 / 25$ | b_{\min} | 100 / 90 | 120 / 104 | 200 / 180 |
| | | a | 45 / 50 | 35 / 40 | 25 / 30 |
| REI 90 | $h_s = 100 / 90$ $a = 25 / 30$ | b_{\min} | 120 / 108 | 160 / 144 | 250 / 215 |
| | | a | 55 / 60 | 50 / 55 | 40 / 45 |
| REI 120 | $h_s = 120 / 108$ $c = 30 / 35$ | b_{\min} | 160 / 144 | 190 / 171 | 300 / 270 |
| | | a | 70 / 75 | 65 / 70 | 50 / 55 |
| REI 180 | $h_s = 150 / 135$ $c = 40 / 45$ | b_{\min} | 220 / 198 | 260 / 234 | 410 / 369 |
| | | a | 85 / 90 | 80 / 85 | 70 / 75 |
| REI 240 | $h_s = 175 / 153$ $c = 50 / 55$ | b_{\min} | 280 / 252 | 350 / 315 | 500 / 450 |
| | | a | 100 / 105 | 85 / 90 | 80 / 85 |

Примечание. * Толщина плиты h_s и ширина ребер b_{\min} указаны для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Расстояния до оси арматуры a и до оси арматуры c в полке указаны для стержня / проволоки или каната.

Таблица 17. – Минимальные параметры армированных в двух направлениях ребристых железобетонных плит (критическая температура арматуры 500 °С) как минимум с одним защемленным краем, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости²⁶

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* и расстояние до оси арматуры c в полке, мм | Ширина ребер b_{\min}^* и расстояния до оси арматуры a , мм | Возможные комбинации ширины ребер b_{\min}^* и расстояния до оси арматуры a , мм | | |
|----------------------|--|---|--|------------------|------------------|
| | | | | | |
| REI 30 | $h_s = 80 / 72$ $c = 10^{**}$ | b_{\min} | 80 / 72 | – | – |
| | | a | 10 ^{**} | | |
| REI 60 | $h_s = 80 / 72$ $c = 10^{**}$ | b_{\min} | 100 / 90 | 120 / 108 | 200 / 180 |
| | | a | 25 | 15 ^{**} | 10 ^{**} |
| REI 90 | $h_s = 100 / 90$ $c = 15^{**}$ | b_{\min} | 120 / 108 | 160 / 144 | 250 / 225 |
| | | a | 35 | 25 | 15 ^{**} |
| REI 120 | $h_s = 120 / 108$ $c = 20$ | b_{\min} | 160 / 144 | 190 / 171 | 300 / 270 |
| | | a | 45 | 40 | 30 |
| REI 180 | $h_s = 150 / 135$ $c = 30$ | b_{\min} | 310 / 279 | 600 / 540 | – |
| | | a | 60 | 50 | – |
| REI 240 | $h_s = 175 / 153$ $c = 40$ | b_{\min} | 450 / 405 | 700 / 630 | – |
| | | a | 70 | 60 | – |

Примечание. * Толщина плиты h_s и ширина ребер b_{\min} указаны для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Предел огнестойкости обеспечивается при выполнении требований СП 5.03.01²⁷ по защите арматуры от коррозии.

²⁶ См. сноску 1.

²⁷ См. сноску 5.

Таблица 18. – Минимальные параметры предварительно напряженных армированных в двух направлениях ребристых железобетонных плит (критическая температура для предварительно напряженных стержней 400 °С, для проволоки и канатов – 350 °С) как минимум с одним заземленным краем, обеспечивающие требуемый предел огнестойкости

| Предел огнестойкости | Толщина плиты h_s^* и расстояние до оси арматуры c^{**} в полке, мм | Ширина ребер b_{\min}^* и расстояния до оси арматуры a^{**} , мм | Возможные комбинации минимальных размеров ширины ребер b_{\min}^* и расстояния до оси арматуры a^{**} , мм | | |
|----------------------|---|--|--|-----------|-----------|
| | | | | | |
| REI 30 | $h_s = 80 / 72$ $c = 20 / 25$ | b_{\min} | 80 / 72 | – | – |
| | | a | 20 / 25 | | |
| REI 60 | $h_s = 80 / 72$ $c = 20 / 25$ | b_{\min} | 100 / 90 | 120 / 108 | 200 / 180 |
| | | a | 35 / 40 | 25 / 30 | 20 / 25 |
| REI 90 | $h_s = 100 / 90$ $c = 25 / 30$ | b_{\min} | 120 / 108 | 160 / 144 | 250 / 225 |
| | | a | 45 / 50 | 35 / 40 | 25 / 30 |
| REI 120 | $h_s = 120 / 108$ $c = 30 / 35$ | b_{\min} | 160 / 144 | 190 / 171 | 300 / 270 |
| | | a | 55 / 60 | 50 / 55 | 40 / 45 |
| REI 180 | $h_s = 150 / 135$ $c = 40 / 45$ | b_{\min} | 310 / 279 | 600 / 540 | – |
| | | a | 70 / 75 | 60 / 65 | |
| REI 240 | $h_s = 175 / 153$ $c = 50 / 55$ | b_{\min} | 450 / 405 | 700 / 630 | – |
| | | a | 80 / 85 | 70 / 75 | |

Примечание. * Толщина плиты h_s и ширина ребер b_{\min} указаны для бетона с силикатным / карбонатным заполнителем.

** Расстояния до оси арматуры a и до оси арматуры c в полке указаны для стержня / проволоки или каната.

Огнестойкость железобетонных конструкций с конструктивной огнезащитой.

Для повышения пределов огнестойкости железобетонных колонн и плит перекрытия, в том числе предварительно напряженных, допускается использование конструктивных способов защиты, для железобетонных колонн – конструктивной огнезащиты в виде огнестойких гипсовых плит, для железобетонных перекрытий – огнестойких подвесных потолков.

На основе исследований [6; 7] был получен массив данных, на основании которых получены табличные данные для оценки огнестойкости железобетонных конструкций, защищенных огнестойкими гипсовыми плитами: железобетонных колонн, изготовленных методом центрифугирования с огнезащитой из гипсовых огнестойких плит (табл. 19); сплошных железобетонных колонн с огнезащитой из гипсовых огнестойких плит (табл. 20 и 21). Для сплошных железобетонных плит, защищенных огнестойким подвесным потолком, были решены следующие задачи:

1. Построены модели железобетонных плит, защищенных огнестойким подвесным потолком.
2. Определены теплофизические характеристики бетона, назначены начальные и граничные условия теплообмена.
3. Выполнено численное моделирование процессов теплообмена разработанных моделей в системе конечно-элементного анализа ANSYS.
4. Получено распределение температур по сечению железобетонной плиты.
5. Определены минимальные параметры, обеспечивающие предел огнестойкости железобетонных плит, защищенных огнестойкими подвесными потолками.

Решение *первой задачи* осуществлено в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Для этого разработаны расчетные модели железобетонных плит с огнестойкими подвесными потолками. Расчетные модели железобетонных плит имеют следующие геометрические размеры: ширина плиты 1000 мм, длина плиты принята равной ширине одной ячейки и составляет 5 мм, высота плит принята равной 80, 120, 150 и 200 мм. Огнестойкий подвесной потолок не моделировался, его влияние моделировалось заданием теплового потока на обогреваемую поверхность железобетонной плиты до момента его разрушения. Процесс теплообмена принят двумерным. Сечение конструкций разбивалось на элементы призматической формы с шириной грани не более 5 мм.

Для разработанных моделей были приняты следующие допущения:

- наступление предельного состояния огнестойкого подвесного потолка принято в момент достижения температуры на необогреваемой поверхности $200\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- момент времени достижения на необогреваемой поверхности температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ огнестойкого подвесного потолка принят равным времени наступления предела огнестойкости подвесного потолка с учетом приведения результатов огневых испытаний к стандартному ряду по огнестойкости 45, 60 и 90 мин;
- между материалами, составляющими конструкцию подвесного потолка, и защищаемой конструкцией принято наличие воздушного пространства;
- до момента наступления предела огнестойкости подвесного потолка теплообмен осуществляется между необогреваемой поверхностью огнестойкого подвесного потолка и обращенной к ней поверхностью железобетонной плиты.

При выполнении *второй задачи* свойства бетона и плит огнестойкого потолка, а также начальные условия теплообмена заданы аналогично колоннам сплошного сечения [7]. В качестве граничных условий установлено:

- теплообмен между огневой газовой средой пожара и наружной поверхностью конструкции, а также необогреваемой поверхностью конструкции и окружающей средой описан через граничные условия 3-го рода;
- для теплового воздействия на железобетонную плиту от начала пожара до момента наступления предела огнестойкости подвесного потолка температура необогреваемой поверхности подвесного потолка равна $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. После наступления предела огнестойкости подвесного потолка на поверхность железобетонной конструкции задается воздействие температуры в соответствии со стандартным температурным режимом²⁸, начиная с момента времени, при котором произошло наступление предела огнестойкости подвесного потолка;
- до момента наступления предела огнестойкости подвесного потолка коэффициент теплоотдачи конвекцией от необогреваемой поверхности подвесного потолка к поверхности конструкции не учитывается, после наступления предела огнестойкости подвесного потолка коэффициент теплоотдачи конвекцией от нагревающей среды к поверхности конструкции $\alpha_c = 25\text{ Вт/м}^2$ по СН 2.01.03²⁹;
- степень черноты поверхности принята равной 0,7 для бетона³⁰, 0,8 – для плит подвесного потолка³¹ и 1,0 – для пламени (греющей среды)³²;
- потерями теплоты по торцам конструкции (по длине) в запас безопасности пренебрегали (тепловой поток принят равным нулю).

В рамках выполнения *третьей задачи* для разработанных моделей выполнено численное моделирование нагрева сечения железобетонных плит с огнестойкими подвесными потолками. Время моделирования огневого воздействия принималось в диапазоне от 60 до 180 мин.

При выполнении *четвертой задачи* для рассматриваемых сечений определено температурное поле на заданных интервалах времени.

По результатам выполнения *пятой задачи* на заданный момент времени определялось расстояние от обогреваемой поверхности железобетонной плиты до точки, в которой была достигнута критическая температура арматуры. В качестве критических значений температуры приняты следующие значения: $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для ненапрягаемой арматуры; $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для предварительно напряженных стержней; $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для проволоки и канатов и $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для канатов без предварительного сцепления арматуры с бетоном. Указанное расстояние

²⁸ 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.

²⁹ См. сноску 28.

³⁰ См. сноску 1.

³¹ См. сноску 28.

³² См. сноску 28.

принимается минимально необходимым для обеспечения предела огнестойкости по предельному состоянию R железобетонной плиты, защищенной огнестойким подвесным потолком.

Таким образом, для сплошных железобетонных плит по предельному состоянию R применяются таблицы 22 и 23, а по предельным состояниям EI – таблица 24.

Центрифугированные колонны кольцевого сечения с конструктивной огнезащитой. Огнестойкость железобетонных колонн в связевых конструктивных системах с конструктивной огнезащитой считается обеспеченной, если параметры конструкции соответствуют приведенным в таблицах 19–21. При использовании конструктивной огнезащиты необходимо выполнить требования технической документации по ее устройству и монтажу. В противном случае табличными данными 19 и 20 пользоваться не допускается.

В таблицах 19 и 20 расстояния до оси арматуры определяются от поверхности железобетонной колонны до оси арматуры без учета толщины огнестойких гипсовых плит.

Таблица 19. – Минимальные параметры негорючих гипсовых плит, обеспечивающие заданные пределы железобетонных колонн [7]

| Предел огнестойкости | Толщина плит конструктивной огнезащиты, мм | | |
|---------------------------------------|--|----|----|
| | 12,5 | 20 | 40 |
| | Расстояние до оси арматуры <i>a</i> , мм | | |
| <i>Колонны шириной до 350 мм</i> | | | |
| R 30 | —* | —* | —* |
| R 60 | —* | —* | —* |
| R 90 | 32 | —* | —* |
| R 120 | 49 | 31 | —* |
| R 150 | —** | 47 | —* |
| R 180 | —** | 66 | 26 |
| <i>Колонны шириной 350 мм и более</i> | | | |
| R 30 | —* | —* | —* |
| R 60 | —* | —* | —* |
| R 90 | —* | —* | —* |
| R 120 | 30 | —* | —* |
| R 150 | —** | 25 | —* |
| R 180 | —** | 36 | —* |

Примечание. * Предел огнестойкости обеспечивается выполнением основных требований по проектированию и изготовлению железобетонных конструкций и минимальных требований по защите арматуры от коррозии согласно СП 5.03.01³³.

** Предел огнестойкости с учетом параметров, используемых в таблице, не обеспечивается.

Полученные табличные данные для сплошных железобетонных колонн, защищенных огнестойкими гипсовыми плитами, распространяются на конструкции, соответствующие разделу 5.3.2 ТКП EN 1992-1-2³⁴.

Таблица 20. – Минимальные размеры, расстояние до оси арматуры и толщина негорючих гипсовых плит для железобетонных центрифугированных колонн кольцевого сечения [7]

| Предел огнестойкости | Внешний диаметр колонны <i>D</i> , мм / толщина стенки <i>b</i> , мм / расстояние до оси арматуры <i>a</i> , мм | | |
|----------------------|---|----------------|----------------|
| | Толщина огнезащиты, мм | | |
| | 12,5 | 20 | 40 |
| R 120 | 300 / 50 / 20* | 300 / 50 / 20* | 300 / 50 / 20* |
| R 180 | 600 / 100 / 35 800 / 120 / 26* | 400 / 60 / 26* | 300 / 50 / 20* |

Примечание. * Предел огнестойкости обеспечивается выполнением основных требований по проектированию и изготовлению железобетонных конструкций³⁵, в том числе железобетонных центрифугированных колонн кольцевого сечения³⁶.

³³ См. сноску 5.

³⁴ См. сноску 1.

³⁵ См. сноску 5.

³⁶ См. сноску 7.

Огнезащита железобетонных плит. Огнестойкость железобетонных плит считается обеспеченной, если параметры конструкции соответствуют приведенным в таблицах 21 и 22. У огнестойких подвесных потолков предельное состояние по огнестойкости во время проведения огневых испытаний должно наступать при достижении температуры на его не обогреваемой поверхности не более 200 °С.

В таблице 21 расстояния до оси арматуры определяются от поверхности железобетонной плиты до оси арматуры без учета толщины огнестойкого подвесного потолка.

Таблица 21. – Предел огнестойкости (по предельному состоянию R) сплошных железобетонных плит, защищенных огнестойкими подвесными потолками

| Предел огнестойкости подвесных потолков по СТБ EN 1363-1 ³⁷ и СТБ EN 1364-2 ³⁸ | Критическая температура арматуры, θ_{cr} , °С | Минимальное расстояние до оси арматуры a (мм) для обоснования предела огнестойкости системы | | | | |
|--|--|---|------|-------|-------|-------|
| | | R 60 | R 90 | R 120 | R 150 | R 180 |
| <i>Сплошные железобетонные плиты толщиной от 80 до 120 мм</i> | | | | | | |
| EI 45 | 230 | 27 | 50 | —** | —** | —** |
| | 350 | 18* | 34 | 50 | 69 | —** |
| | 400 | 15* | 30 | 43 | 58 | 72 |
| | 500 | —* | 22* | 32 | 42 | 53 |
| EI 60 | 230 | —* | 40 | 65 | —** | —** |
| | 350 | —* | 28 | 43 | 60 | 79 |
| | 400 | —* | 24* | 37 | 51 | 66 |
| | 500 | —* | 18* | 28 | 38 | 48 |
| EI 90 | 230 | —* | —* | 43 | 69 | —** |
| | 350 | —* | —* | 30 | 46 | 65 |
| | 400 | —* | —* | 26 | 40 | 55 |
| | 500 | —* | —* | 20* | 30 | 41 |
| <i>Сплошные железобетонные плиты толщиной 120 мм и более</i> | | | | | | |
| EI 45 | 230 | 27 | 48 | 64 | 79 | 96 |
| | 350 | 18* | 34 | 46 | 56 | 67 |
| | 400 | 15* | 29 | 40 | 49 | 58 |
| | 500 | —* | 22* | 30 | 38 | 45 |
| EI 60 | 230 | —* | 40 | 58 | 73 | 89 |
| | 350 | —* | 28 | 41 | 52 | 63 |
| | 400 | —* | 24* | 36 | 46 | 55 |
| | 500 | —* | 18* | 27 | 35 | 43 |
| EI 90 | 230 | —* | —* | 42 | 61 | 77 |
| | 350 | —* | —* | 30 | 44 | 55 |
| | 400 | —* | —* | 26 | 38 | 48 |
| | 500 | —* | —* | 20* | 29 | 37 |

Примечание. * Предел огнестойкости обеспечивается выполнением основных требований по проектированию и изготовлению железобетонных конструкций, в том числе требований по защите арматуры от коррозии СП 5.03.01³⁹.

** Предел огнестойкости с учетом параметров, используемых в таблице, не обеспечивается.

Таблица 22. – Минимальная толщина сплошных железобетонных плит, обеспечивающая предел огнестойкости конструкций по предельным состояниям EI, защищенных огнестойкими подвесными потолками

| Предел огнестойкости подвесных потолков по СТБ EN 1363-1 и СТБ EN 1364-2 | Толщина железобетонной плиты h , мм | | |
|--|---------------------------------------|---------------|-------------|
| | от 80 до 100 | от 100 до 120 | 120 и более |
| EI 45–E I60 | EI 90 | EI 120 | EI 150 |
| EI 90 | EI 120 | EI 150 | EI 180 |

³⁷ Испытания на огнестойкость. Часть 1. Общие требования: СТБ EN 1363-1-2009. – Введ. 01.07.10. – Минск: Госстандарт, 2010. – 92 с.

³⁸ Испытания на огнестойкость. Элементы зданий, не несущие нагрузки. Часть 2. Подвесные потолки: СТБ EN 1364-2-2009. – Введ. 01.07.10. – Минск: Госстандарт, 2010. – 28 с.

³⁹ См. сноску 5.

Заключение

Полученные в работах [1–7; 11–18] результаты исследований позволили разработать комплексную методику расчета пределов огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона. С использованием разработанной на основе экспериментальных (лабораторные и огневые, в том числе натурные) и теоретических исследований комплексной методики расчета пределов огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона получен массив расчетных значений пределов огнестойкости указанных конструкций, в том числе с конструктивной огнезащитой. Анализ и обобщение результатов расчета позволили получить табличные данные по оценке огнестойкости железобетонных стен, колонн, балок и плит, учитывающие наличие воздушной полости, класс бетона, вид заполнителя, предварительное напряжение арматуры, а также наличие конструктивной огнезащиты на основе огнестойких гипсовых плит и огнестойких подвесных потолков. В табличных данных отражены минимальные требования к указанным конструкциям, позволяющие обеспечить необходимые пределы огнестойкости. Использование соответствующих таблиц позволяет подобрать параметры конструкций, обеспечивающие заданный предел огнестойкости, без проведения серии трудоемких расчетов и испытаний.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке на основе табличных данных правил определения пределов огнестойкости, исключающих пробелы в области нормирования огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона, что в конечном счете позволяет обеспечить устойчивость зданий и сооружений при пожаре путем выполнения существенных требований пожарной безопасности технического регламента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касперов, Г.И. Расчетно-экспериментальная методика оценки огнестойкости строительных конструкций из высокопрочного бетона / Г.И. Касперов, И.И. Полевода // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2003. – № 4 (14). – С. 24–32.
2. Касперов, Г.И. Оценка факторов, влияющих на прочность бетонов классов В20–В100 при пожаре / Г.И. Касперов, И.И. Полевода, М.Н. Рыскин // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2003. – № 2. – С. 17–21.
3. 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.
4. 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.
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. Экспериментальные исследования огнестойкости стальных каркасных конструкций с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, В.А. Кудряшов, С.М. Жамойдик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 13–27. – EDN: THFOXQ.
7. 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: OВMPXF.
8. Милованов, А.Ф. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций (к СТО 36554501-006-2006) / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 2008. – 131 с.
9. Милованов, А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.

10. Яковлев, А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Ширко, А.В. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием программной среды ANSYS / А.В. Ширко [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2 (18). – С. 260–269. – EDN: SNFAML.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Полевода, И.И. Моделирование огнестойкости стальных элементов с конструктивной огнезащитой / И.И. Полевода, А.Г. Иваницкий, С.М. Жамойдик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2010. – № 2 (12). – С. 39–46. – EDN: SMWNXV.

Нормирование огнестойкости современных строительных конструкций из железобетона

Regulation of the fire resistance of modern building structures of reinforced concrete

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
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: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: ip@ucp.by
ORCID: 0000-0003-2469-3553

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
пожарной безопасности, профессор
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Sergey M. Zhamoydik

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Зайнудинова Наталья Владимировна

кандидат технических наук
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
промышленной безопасности, доцент
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: Zainudzinava@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1848-1562

Natal'ya V. Zaynudinova

PhD in Technical Sciences
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Industrial Safety,
Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: Zainudzinava@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1848-1562

Нехань Денис Сергеевич

кандидат технических наук
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, доцент
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: denis_nechany@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7838-4663

Denis S. Nekhan'

PhD in Technical Sciences
State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: denis_nechany@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7838-4663

REGULATION OF THE FIRE RESISTANCE OF MODERN BUILDING STRUCTURES OF REINFORCED CONCRETE

Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Zaynudinova N.V., Nekhan' D.S.

Purpose. Based on the developed comprehensive methodology for calculating the fire resistance limits of modern building structures made of reinforced concrete, obtain tabular data on the assessment of the fire resistance of reinforced concrete walls, columns, beams and slabs, taking into account the presence of an air cavity, concrete class, type of aggregate, prestressing reinforcement, and also the presence of constructive fire protection based on fire-resistant gypsum boards and fire-resistant suspended ceilings.

Methods. Analysis and generalization of the results of calculating the fire resistance limits of reinforced concrete building structures according to the methodology developed on the basis of experimental (laboratory and fire, including full-scale) and theoretical studies.

Findings. The rules have been developed for determining the fire resistance limits of modern building structures made of reinforced concrete, based on the simplified use of tabular data, which make it possible to ensure the fire safety of buildings and structures by assessing the fire resistance limit of unprotected reinforced concrete building structures and selecting the parameters of structural fire protection to increase it.

Application field of research. The results obtained can be used in the development of standards for the design and construction of reinforced concrete structures, for solving problems of assessing the fire resistance of building structures and elements in the design and construction of buildings and structures, including within the framework of existing standards.

Keywords: fire resistance limits, reinforced concrete structures, standard temperature regime, temperature field, fire protection, gypsum board, fire-resistant suspended ceiling.

(The date of submitting: April 10, 2023)

REFERENCES

1. Kasperov G.I., Palevoda I.I. Raschetno-eksperimental'naya metodika otsenki ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy iz vysokoprochnogo betona [Calculation and experimental method of assessing the fire resistance of building structures made of high-strength concrete]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2003. No. 4 (14). Pp. 24–32. (rus)
2. Kasperov G.I., Palevoda I.I., Ryskin M.N. Otsenka faktorov, vliyayushchikh na prochnost' betonov klassov B20–B100 pri pozhare [Assessment of factors exerting effects on strength of C⁵/₈ – C⁹⁰/₁₀₅ concrete in the case of fire]. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*, 2003. No. 2. Pp. 17–21. (rus)
3. Palevoda I.I., Zaynudinova N.V., Chaychits N.I. Rezul'taty ispytaniya na ognestoykost' zhelezobetonnnykh 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-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 37–44. (rus). EDN: VKXNSJ.
4. 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. EDN: ASBKFB.
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., Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M. Eksperimental'nye issledovaniya ognestoykosti stal'nykh karkasnykh konstruksiy s konstruktivnoy ognezashchitoy [Experimental study of steel frame structures fire resistance with structural fire protection]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 13–27. (rus). EDN: THFOXQ.
7. Palevoda I.I., Zhamoydik S.M., Nekhan' D.S. Ognestoykost' zhelezobetonnnykh kolonn s konstruktivnoy ognezashchitoy [Fire resistance of reinforced concrete columns with structural fire retard-

- ance] *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2022. No. 2. Pp. 67–81. (rus). DOI: 10.25257/FE.2022.2.67-81. EDN: OBMPXF.
8. Milovanov A.F. Posobie po raschetu ognestoykosti i ognesokhrannosti zhelezobetonnykh konstruksiy (k STO 36554501-006-2006) [Manual for the calculation of fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures (to the Standard Organization 36554501-006-2006)]. Moscow: Stroyizdat, 2008. 131 p. (rus)
 9. Milovanov A.F. *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy pri pozhare* [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 304 p. (rus)
 10. Yakovlev A.I. *Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruksiy* [Calculation of fire resistance of building structures]. Moscow: Stroyizdat, 1988. 143 p. (rus)
 11. 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.
 12. 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 thermo-physical 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.
 13. 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.
 14. Shirko A.V., Kamlyuk A.N., Palevoda I.I., Zaynudinova N.V. Teplotekhnicheskii raschet ognestoykosti elementov zhelezobetonnykh konstruksiy s ispol'zovaniem programmnoy sredy ANSYS [Thermal engineering calculation of fire resistance of reinforced concrete structures using the ANSYS Software Environment]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2013. No. 2 (18). Pp. 260–269. (rus). EDN: SNFAML.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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 Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, 2021. No. 8. Pp. 94–106. (rus). EDN: FONZFL.
 18. Palevoda I.I., Ivanitskiy A.G., Zhamoydik S.M. Modelirovanie ognestoykosti stal'nykh elementov s konstruktivnoy ognezashchitoy [Modeling the fire resistance of steel elements with structural fire protection]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2010. No. 2. Pp. 39–46. (rus). EDN: SMWNXV.