

Научный руководитель:

Недвиг Е.С., старший преподаватель,
Высшей школы промышленно-гражданского и
дорожного строительства СПбПУ

Мартемьянова Анна Алексеевна, студент,
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого

Цыганенко Антонина Александровна, студент,
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого

ОГНЕСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ АРМИРОВАНИЯ ПЛИТЫ

Аннотация: статья посвящена изучению огнестойкости железобетонных перекрытий многоэтажных зданий при разных вариантах армирования и способах огнезащиты. Особое внимание уделяется сравнению уровней огнестойкости (R, RE, REI), достигаемых различными решениями. Рассматриваются плиты с увеличенной толщиной бетонного покрытия (25 и 35 мм), разным шагом арматурных стержней (200 и 100 мм), а также использование гипсокартонных панелей в качестве дополнительной огнезащиты.

Ключевые слова: железобетонные плиты перекрытия, огнестойкость, защитный слой бетона, гипсокартонные панели, предел огнестойкости, критические температуры

Огнестойкость железобетонной плиты перекрытия высотного здания при разных схемах армирования плиты

Введение

Железобетонные конструкции, такие как плиты перекрытия, выполняют функцию передачи нагрузок на вертикальные элементы. В условиях пожара критически важно, чтобы несущие элементы, в том числе плиты перекрытия, сохраняли необходимую прочность и устойчивость до полной эвакуации людей, так как их преждевременное разрушение под воздействием опасных факторов может привести к утрате целостности здания и гибели людей. С целью повышения долговечности конструкции в условиях пожара применяются различные методы, среди которых увеличение толщины защитного слоя арматуры в бетоне, процента армирования и использование огнезащитных покрытий. Существуют несколько наиболее распространённых методов защиты железобетонных перекрытий, например, оштукатуривание (нанесение слоя штукатурки на поверхность плиты увеличивает толщину защитного слоя бетона, который защищает арматуру от перегрева), нанесение огнезащитных составов (использование специальных пропиток или покрытий, повышающих стойкость бетона к огню путём проникновения в его структуру и образования защитного барьера), система водяного орошения (установка системы автоматического пожаротушения, которая направляет воду на плиту перекрытия), также использование облицовочные панели из гипсокартона.

Использование тех или иных огнезащитных мероприятий требует расчётного обоснования или подтверждения сертификатами соответствия, поэтому необходимо разрабатывать оптимальные решения, позволяющие минимизировать издержки строительства и применять современные методы защиты с повышенными характеристиками огнезащиты.

Основная цель настоящей работы заключается в определении предельных значений огнестойкости перекрытия уникального высотного здания при различных методах защиты



железобетонных перекрытий от термического воздействия с последующим сравнительным анализом. Особенность расчёта огнестойкости уникального высотного здания заключается в том, что к нему предъявляют повышенные требования, включая предел огнестойкости по несущей способности R180.

Для расчёта огнестойкости необходимо определить время, в течение которого конструкция может сопротивляться воздействию огня, сохраняя прочность и устойчивость. Согласно СП 477.1325800.2020 "Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности" противопожарные стены и перекрытия для деления здания на пожарные отсеки в зданиях высотой от 100 до 150 метров должны иметь предел огнестойкости REI 180, R – устойчивость или способность конструкции сохранять несущую способность при воздействии огня, E – целостность конструкции, то есть её способность предотвращать проникновение огня и продуктов горения через трещины или отверстия, I – теплоизоляция, то есть способность конструкции ограничивать передачу тепла через себя, чтобы не допустить нагрева с противоположной стороны до критических температур.

Расчет предела огнестойкости по потере несущей способности плиты будет производиться по СП 468.1325800.2019 "Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности".

Глава 1. Актуальность и цель работы

Актуальность работы обусловлена несколькими факторами.

Во-первых, железобетонные конструкции такие, как плиты перекрытия играют одну из ключевых ролей в обеспечении безопасности высотных зданий, так как они передают нагрузку. Так при возникновении пожара, для несущих частей здания необходимо как можно дольше сохранять прочность и устойчивость, ведь если произойдёт разрушение плиты перекрытия до устранения опасных факторов пожара, здание может потерять целостность, в следствии чего могут погибнуть люди. Для того, чтобы увеличить время, за которое конструкция утрачивает свои свойства, изменяют защитные слои арматуры в бетоне и используют огнезащиту.

Во-вторых, для застройщиков важно, чтобы здание было экономически выгодным, поэтому необходимо оптимизировать строительные процессы и использовать материалы, огнезащиту, с низкой стоимостью. Если рассмотреть обеспечение огнестойкости путём увеличения защитных слоёв арматуры, в таком случае будет увеличиваться количество бетона, а также нагрузка на здание, следовательно может быть увеличено армирование фундамента и его габариты. При использовании специальных вспененных материалов и ваты для огнезащиты, общий вес конструкции не будет значительно изменяться.

В результате данной работы должны быть получены пределы огнестойкости вышеописанных способов защиты железобетонных плит перекрытия от огня, которые покажут, что эффективнее использовать с физической и экономической точки зрения. Глава 2. Цели и задачи работы

Целью работы является сравнительный анализ огнестойкости конструкции балочного перекрытия с противопожарными гидрофобизированными плитами и с увеличенным защитным слоем.

В ходе работы решаются **следующие задачи**: анализ научных статей по вопросу огнезащиты железобетонных конструкций; анализ норм и требований по обеспечению необходимой огнестойкости в высотных зданиях; подбор защитных покрытий для железобетонных плит, выводы.

Глава 2. Обзор нормативной документации

Необходимо проанализировать воздействие опасных факторов пожара таких, как пламя, тепловой поток, повышенная температура окружающей среды, повышенная



концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения, на железобетонное перекрытие для деления здания на пожарные отсеки в здании высотой 108 м.

Для расчета огнестойкости железобетонной плиты перекрытия необходимо определить документы, регламентирующие характеристики сопротивления огню. "Градостроительный кодекс Российской Федерации" от 29.12.2004 N 190-ФЗ, глава 6, ст.48.1 говорит о том, что здания выше 100м являются уникальными, следовательно к ним применяются повышенный классы горючести и степени огнестойкости. Согласно Федеральному закону. Техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности, СП 267.1325800.2016 "Здания и комплексы высотные. Правила проектирования" и СНиП 21-01-97 "Пожарная безопасность зданий и сооружений" для высотных зданий вне зависимости от высоты класс конструктивной пожарной опасности должен быть СО. Также в своде правил уточняется, что все типы противопожарных преград должны быть класса К0, а также для противопожарных перекрытий первого класса предел огнестойкости составляет REI 150. Однако в своде правил СП 477.1325800.2020 "Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности" прописаны более строгие ограничения по пределу огнестойкости, табл.6.1 противопожарные стены и перекрытия для деления здания на пожарные отсеки в зданиях высотой от 100 до 150 метров имеют предел огнестойкости REI 180.

Для дальнейшего исследования железобетонной плиты необходимо определить защитные слои плиты. В таблице 5.1 документа СП 63.13330.2018 "Бетонные и железобетонные конструкции" описаны минимальные защитные слои бетона рабочей арматуры, так в закрытых помещениях при нормальной и пониженной влажности толщина составляет не менее 20 мм, принимаем для научно-исследовательской работы значение защитного слоя 20 мм.

Дальнейший расчет предела огнестойкости по потере несущей способности плиты и оценка предела огнестойкости плит по потере теплоизолирующей способности будет производиться по СП 468.1325800.2019 "Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности".

Проектирование уникальных зданий это сложный процесс, необходимо не только использование общих документов, но и рассмотрение СТУ, которые учитывают повышенные требования пожарной безопасности объектов, например

"Типовые мероприятия, разработанные на основе анализа решений, принятых в специальных технических условиях, согласованных главным государственным инспектором Российской Федерации по пожарному надзору либо одним из его заместителей". Специальные технические условия регламентируют, что применение самоклеящихся огнезащитных покрытий, фиксирующих огнезащитное покрытие самоклеящихся фольгированных лент, межфланцевых уплотнений и герметиков группы горючести Г1 и ниже в составе таких каналов не допускается.

Глава 4. Обзор научных статей и исследовательских работ

На сайте научной электронной библиотеки eLibrary.ru представлена статья "Расчет и проектирование железобетонных конструкций. Численное моделирование огнестойкости железобетонной плиты с помощью программного комплекса ANSYS". Цель работы построение и оценка конечно-элементной модели железобетонной плиты в программном комплексе для упрощения определения огнестойкости конструкции.

В данной статье предел огнестойкости определяется моментом достижения конструкцией предельного состояния. Предельным состоянием в этом расчете считается образование пластического шарнира в пролете. В статье приводятся формулы расчета, по которым происходит распределение температур по сечениям железобетонных конструкций. С точки зрения физического процесса: когда повышается температура, бетон меняет свои



прочностные и упругие свойства. Прочность бетона изначально падает из-за его адсорбционных свойств, а затем возрастает в диапазоне 200–400 °С из-за уплотнения структуры, вызванного испарением воды, и снова снижается при температуре свыше 400 °С из-за возникающих внутренних напряжений. Модуль упругости бетона, коэффициент температурного расширения бетона снижается при нагреве. Коэффициент температурного расширения арматуры увеличивается быстрее, чем у бетона, что ухудшает их сцепление. Испытания показали, что сцепление арматуры с бетоном остаётся стабильным до 200 °С, но затем начинает снижаться, достигая примерно 75% от первоначального значения при 450 °С. Для расчетной модели использовался метод конечных элементов, реализуемый в программе ANSYS. Для бетона применялся конечный элемент SOLID65 – специальный объёмный шестиугольный восьмиузловой элемент с тремя степенями свободы в каждом узле и дополнительными функциями формы для повышения точности. Арматурные стержни моделировались с помощью конечного элемента BEAM188 – пространственного линейного элемента с двумя содержательными узлами на концах и третьим узлом ориентации. Модель подвергалась одновременному действию собственного веса, температурного воздействия и нормативной нагрузки. Расчёты проводились в физически нелинейной постановке.

Анализ результатов включал сравнение данных, полученных в результате эксперимента, расчётов и численного моделирования в программном комплексе ANSYS. Получены совпадения по критической температуре (2-5%) и времени её достижения (3-10%), а также удовлетворительное совпадение по прогибу от совместного действия температурных и силовых факторов (17-37%). Программа ANSYS показала достаточно точные результаты, что подтверждает её пригодность для изучения вопросов огнестойкости железобетонных конструкций.

Также была проанализирована статья "Усовершенствование методики расчета огнестойкости плоской железобетонной плиты". Задачи, данной работы: создание тепловые математические модели, с целью определения распределения температуры по исследуемой плоской железобетонной плите в условиях пожара по истечению 30 мин, 45 мин, 60 мин, 90 мин, определить несущую способность исследуемой плоской железобетонной плиты в условиях воздействия пожара по истечению тех же промежутков времени, применяя упрощенную методику зонного метода, определить несущую способность исследуемой плоской железобетонной плиты при условиях воздействия пожара по истечению 30 – 90 мин, разделив половину сечения на 5 равных зон. Зонный метод – это метод расчета радиационного теплообмена, основанный на делении пространства на зоны и расчёте углового коэффициента излучения для каждой пары зон. Этот метод позволяет учесть взаимодействие излучаемых и поглощаемых потоков тепла между разными частями системы.

Полученные результаты по определению несущей способности железобетонной плиты при пожаре через 90 минут показывают максимальную погрешность до 8% по сравнению с зонным методом. Эти результаты позволяют использовать предложенную методику без необходимости уточнения, что существенно упрощает расчеты и повышает их точность.

Далее для обзора была выбрана статья "Сравнительный анализ огнестойкости железобетонных плит с покрытием пенококсовым слоем и без него". Работа рассматривает процессы вспучивания и коксообразования, происходящие в покрытии при высоких температурах, что приводит к снижению теплопотока через покрытие. Во время вспучивания и коксообразования покрытия происходят физико-химические процессы, которые снижают теплопоток через покрытие. Эти процессы требуют дальнейшего изучения, так как они протекают при высоких температурах (до 900 °С), что затрудняет моделирование и понимание механизмов вспучивания.

Теплоизоляционная способность пенококсовых покрытий подтверждается расчётами, в которых учитывается изменение температуры внутри помещения и сопротивление



теплопередаче отдельных слоёв конструкции. Расчёты показывают значительное снижение теплопотока через покрытие, что говорит о высоком потенциале использования таких материалов для увеличения огнестойкости железобетонных конструкций.

Для определения высоты деления здания на пожарные отсеки был использован каталог типовых решений Национального объединения изыскателей и проектировщиков НОПРИЗ, который подходит для здания класса Ф 1.3 по функциональной пожарной опасности (многоквартирные жилые дома). В нем указано, что высота пожарного отсека по вертикали не более 50 м. Также в документе прописана информация о пределах огнестойкости: увеличение пределов огнестойкости несущих конструкций в зданиях высотой до 100 м не менее REI 180 (R 180), в зданиях высотой более 100 м не менее REI 240 (R 240) (допускается расчетно-аналитическое обоснование).

Для данной работы важно определить огнестойкость отдельно противопожарных перекрытий, в данном каталоге утверждается: "Деление на пожарные отсеки по вертикали противопожарными перекрытиями с пределом огнестойкости в зданиях высотой до 100 м – REI 180, в зданиях высотой более 100 м – REI 240, или техническими этажами с пределами огнестойкости перекрытий REI 90 и REI 120 соответственно (допускается расчетно-аналитическое обоснование)".

В нормативных документах разнятся пределы огнестойкости и высота деления на пожарные отсеки по вертикали. В научной статье "Об особенностях проектирования уникальных, большепролётных и высотных зданий и сооружений" рассказывают о том, что в уникальном строительстве создают специальные технические решения, которое применимы для отдельных объектов.

В статье "Проектирование противопожарной защиты уникальных и технически сложных объектов при разработке специальных технических условий " рассматривается проблема проектирования противопожарной защиты уникальных и технически сложных объектов в России. Указывается, что при проектировании таких объектов часто возникают вынужденные отступления от действующих норм, что требует разработки индивидуальных технических условий. Описываются сложности, связанные с проектированием и строительством уникальных и технически сложных объектов, включая применение новых материалов, технологий и архитектурных решений.

Например, в российских нормах нет информации о защите уникальных зданий высотой более 150 метров, увеличенных пределов огнестойкости несущих конструкций здания, деление здания на пожарные отсеки, применение противопожарных норм и т.д. Также в научной работе подчёркивается необходимость внедрения методов гибкого нормирования в практику проектирования и строительства.

Глава 5. Расчет огнестойкости железобетонной плиты перекрытия уникального здания с защитным слоем арматуры 25 мм с арматурой 16 диаметра, шагом 200

Расчет по выполнен по методике СП 468.

Площадь ненапрягаемой сжатой арматуры (A_s) равна 390 мм², площадь ненапрягаемой растянутой арматуры (A_s) 1400 мм², расстояние от равнодействующей усилий в арматуре (S') до грани сечения ($a's$) 30 мм, расстояние от равнодействующей усилий в арматуре (S) до грани сечения (a_s) 33 мм, размеры сечения 1*0,2 м, длительность стандартного огневого воздействия (T_{fr}) 180 мин. Бетон взят тяжёлый на силикатном заполнителе класса В25, изгибающий момент от постоянной и длительной нормативной нагрузки (M_n), взят из модели, спроектированной и рассчитанной в Лира САПР рис.1 7,47 тс м;



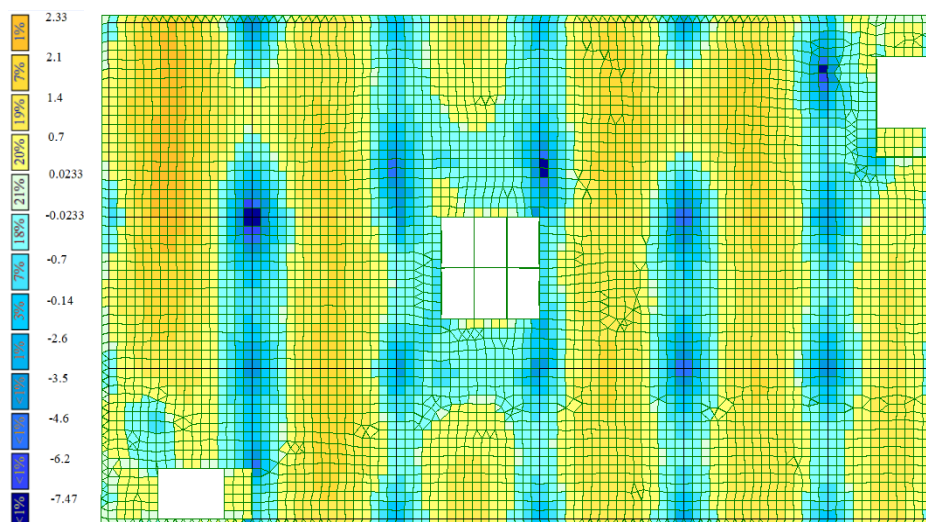


Рис.1. Мозаика напряжений по M_x

Предельное значение изгибающего момента по расчёту:

$$M_{ult, t} = R_{bn} b x_t (h_0 - 0,5 x_t) + R_{sct} A'_s (h_0 - a') = 18,5 \cdot 1000 \cdot 14,00138 \cdot (167 - 0,5 \cdot 14,00138) + 392,868 \cdot 390 \cdot (167 - 30) = 6,37 \text{ тс м.}$$

Сравнение предельного значения с требуемым:

$$M_n = 7,47 \text{ тс м} \geq M_{ult, t} = 6,36658 \text{ тс м.}$$

Предельное значение изгибающего момента больше требуемого, следовательно плита не обеспечивает предел огнестойкости по несущей способности R180. Необходимо увеличить защитный слой, также можно увеличить процент армирования или использовать дополнительные огнезащитные материалы и конструкции.

Глава 6. Расчет огнестойкости железобетонной плиты перекрытия уникального здания с защитным слоем арматуры 35 мм с арматурой 16 диаметра, шагом 200

Исходные данные остаются прежними, изменяется расстояние от равнодействующей усилий в арматуре (S') до грани сечения ($a's$) 40 мм и расстояние от равнодействующей усилий в арматуре S до грани сечения (as) 43 мм.

Предельное значение изгибающего момента:

$$M_{ult, t} = R_{bn} b x_t (h_0 - 0,5 x_t) + R_{sct} A'_s (h_0 - a') = 18,5 \cdot 1000 \cdot 21,22185 \cdot (157 - 0,5 \cdot 21,22185) + 392,156 \cdot 390 \cdot (157 - 40) = 7,69 \text{ тс м.}$$

Сравнение предельного значения с требуемым:

$$M_n = 7,47 \text{ тс м} \leq M_{ult, t} = 7,6853 \text{ тс м.}$$

Предельное значение изгибающего момента меньше требуемого, что обеспечивает предел огнестойкости по несущей способности R180, можно использовать плиту перекрытия без дополнительных огнезащитных материалов.

Глава 6.1. Расчет огнестойкости железобетонной плиты перекрытия высотного здания с защитным слоем арматуры 25 мм с арматурой 16 диаметра, шагом 100

Предельное значение изгибающего момента:

$$M_{ult, t} = R_{bn} b x_t (h_0 - 0,5 x_t) + R_{sct} A'_s (h_0 - a') = 18,5 \cdot 1000 \cdot 23,7106 \cdot (167 - 0,5 \cdot 23,7106) + 392,868 \cdot 390 \cdot (167 - 30) = 9,08 \text{ тс м.}$$

$$M_n = 7,47 \text{ тс м} < M_{ult, t} = 9,08002 \text{ тс м.}$$

Допускает использование плиты перекрытия без дополнительной огнезащиты. Стоит учитывать, что увеличение количества арматурных стержней, увеличивается расход материала и вес конструкции.



Использование облицовочные панели из гипсокартона

В случае, когда плита перекрытия не удовлетворяет требованиям огнестойкости можно использовать потолочные панели из гипсокартона. Такие конструкции изготавливают толщиной 225 мм из негорючих материалов, предел огнестойкости которых составляет R60/E45, а вес варьируется до 25 кг на м².

Пример огнезащитной конструкции П-1М-2 Оптима рис.2 на одноуровневом двухосном каркасе состоит из металлического каркаса, обшитого двумя слоями гипсовых плит Гуррос. Каркас состоит из основных и несущих профилей ГурросУльтра, которые крепятся к плитам перекрытия с помощью подвесов, и направляющих профилей Гуррос-Ультра.

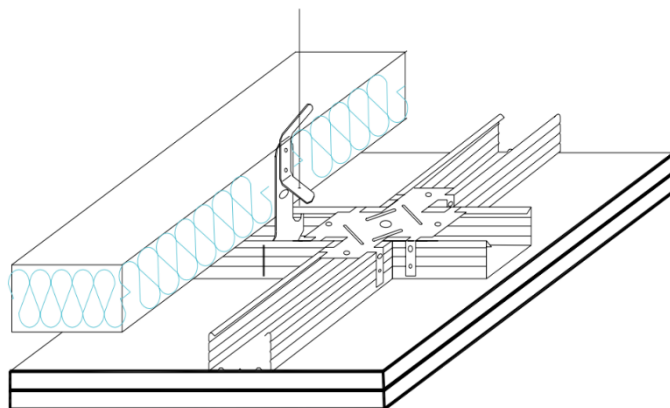


Рис.1 Пример подвесного потолка на стальном каркасе

Выводы

В статье проведен сравнительный анализ огнестойкости железобетонной плиты перекрытия с увеличенным защитным слоем и с использованием увеличенного процента армирования в высотном здании. Исследование показало, что увеличенный защитный слой: при использовании бетонного слоя толщиной 25 мм железобетонная плита не обеспечивала требуемый предел огнестойкости по несущей способности.

Увеличение защитного слоя до 35 мм и учащение шага арматуры до шага 100 мм позволило достичь требуемого предела огнестойкости. Однако при изменении защитного слоя происходит смещение арматуры дальше от внешней поверхности плиты, не изменяя количества используемого материала. При увеличении количества армирования, также увеличивается вес железобетонной плиты перекрытия и стоимость.

Использование железобетонных перекрытий с увеличенными защитными слоями арматуры является оптимальным решением для обеспечения пределов огнестойкости и экономически выгодным.

Список литературы:

1. [ГОРШКОВ А.С., НИКИФОРОВ Е.С., ВАТИН Н.И. ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОЗВЕДЕНИЯ СТЕН ИЗ ГАЗОБЕТОННЫХ БЛОКОВ НА ПОЛИУРЕТАНОВЫЙ КЛЕЙ]. Евразийский Журнал Аналитической Химии, 2015, т. 10, № 4, с. 301–308.
2. [ПРОНИН Р.А., ФЕДОРОВ А.А., СОКОЛОВ Ю.М. МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ТРАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ]. Вестник Московского университета. Серия 15. Вычислительная Математика и Кибернетика, 2015, т. 3, № 3, с. 107–114.



3. [ПОЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ]. Власть, 2015, т. 23, № 9, с. 5–12. URL:
4. [КУРБАТОВ А.П., СМОЛЕНЦЕВА Е.В. ПРОИЗВОДСТВО БИОЭТАНОЛА ИЗ ЗЕРНА РАПСА]. Аграрная наука Евро-Северо-Востока, 2015, т. 16, № 2, с. 68–74.
5. [БОГОМОЛОВА Л.А., ШАДРИНА Л.Н. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СПЕКАНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА]. Технология текстильной промышленности, 2015, т. 22, № 2, с. 127–133.
6. А. Иванов. "Сравнительный анализ огнестойкости железобетонных плит с покрытием пенококсовым слоем и без него".
7. Т.Ю. Еремина, С.А. Петренко. "Проектирование противопожарной защиты уникальных и технически сложных объектов при разработке специальных технических условий".
8. В.И. Шумейко, О.А. Кудинов. Научная статья "Об особенностях проектирования уникальных, большепролётных и высотных зданий и сооружений".
9. Гравит, М.В., Голуб, Е.В., Антонов, С.П. Огнезащитный штукатурный состав для конструкций в условиях углеводородного горения // Пожарная безопасность в строительстве
10. Д. А. Иванов "Сравнительный анализ огнестойкости железобетонных плит с покрытием пенококсовым слоем и без него"
11. А. К. Васильев "Усовершенствование методики расчета огнестойкости плоской железобетонной плиты"
12. Гравит, М.В., Голуб, Е.В., Григорьев, Д.М., Иванов, И.О. Огнезащитные подвесные потолки с высокими пределами огнестойкости // Пожарная безопасность в строительстве.

