

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ ПОДВЕСНОГО ПОТОЛКА, ВЫПОЛНЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИПСОВЫХ НЕГОРЮЧИХ ПЛИТ

Кудряшов В.А., Ботян С.С., Коба С.С., Лойко Ю.Л., Королев А.В.

Цель. На основании анализа технических решений, применяемых для устройства огнестойких подвесных потолков с использованием гипсовых негорючих плит, разработать типовой образец фрагмента для натуральных испытаний с воздействием огня снизу (со стороны помещения). Провести огневые испытания и определить огнестойкость экспериментального образца, получить температурно-временные зависимости для локальных точек испытываемого фрагмента, наиболее подверженных разрушениям и деформациям в результате нагрева.

Методы. Анализ результатов существующих исследований и методов для достижения целей исследований. Разработка типового образца для испытаний согласно требованиям СТБ EN 1363-1-2009, СТБ EN 1364-2-2009. Разработка методики определения температурно-временных зависимостей при нагреве для локальных точек образца огнестойкого подвесного потолка. Экспериментальные огневые исследования.

Результаты. Огнестойкий подвесной потолок с применением гипсовых негорючих плит является наиболее простым и распространенным решением для увеличения предела огнестойкости горизонтальных элементов перекрытий и покрытий. Для подтверждения технических решений, применяемых для устройства огнестойких подвесных потолков с применением гипсовых негорючих плит, был разработан типовой экспериментальный образец. Огнестойкий подвесной потолок, сформированный двумя сплошными слоями гипсовых негорючих плит марки Gyproc Fire общей толщиной 25 мм и двумя слоями минеральной ваты марки ISOVER 50/E/K плотностью 14 ± 10 % кг/м³ общей толщиной 100 мм на несущем двухуровневом каркасе из тонкостенных профилей соответствует пределу огнестойкости EI 60 (a←b) согласно СТБ EN 1364-2-2009. Средняя температура на необогреваемой поверхности минераловатных плит составила 170 °С на 65-й минуте испытаний.

Область применения исследований. Полученные результаты огневых испытаний могут быть использованы в численном моделировании нагрева огнестойкого подвесного потолка при высокотемпературном воздействии, а также в практической деятельности как огнезащитное решение для строительных конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, огнезащита, огневые испытания, огнестойкий подвесной потолок, стандартный пожар, гипсовая плита, температурно-временная зависимость, разрушение.

(Поступила в редакцию 13 января 2023 г.)

Введение

При строительстве и реконструкции зданий и сооружений ключевым критерием является сохранение жизни и здоровья людей при пожаре, в том числе сохранность имущества и материальных ценностей. Для достижения этих целей нормативными правовыми актами системы противопожарного нормирования и стандартизации установлены требования к огнестойкости основных строительных конструкций: несущих стен и колонн, навесных элементов наружных стен, элементов перекрытий и покрытий, элементов лестничных клеток. Так, для горизонтальных строительных конструкций, перекрытий и покрытий согласно требованиям СН 2.02.05-2020¹ пределы огнестойкости варьируются от RE(I) 15 до RE(I) 60 (в зависимости от степени огнестойкости здания), а если перекрытие считается противо-

¹ Пожарная безопасность зданий и сооружений. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 2.02.05-2020. – Взамен СН 2.02.01-2019, ТКП 45-2.02-315-2018 (33020). – Введ. 04.04.21. – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 70 с.

пожарным (для разделения объемов помещения строительными конструкциями с нормируемым пределом огнестойкости), предел огнестойкости может составлять RE(I) 150. В особых случаях (для высотных зданий²) предел огнестойкости перекрытий может достигать RE(I) 180 и более.

На практике конструкции перекрытий и покрытий не всегда отвечают предъявляемым нормами требованиям (особенно часто при реконструкции и реставрации, технической модернизации объекта с учетом снижения эксплуатационно-прочностных свойств конструкции), вследствие чего возникает необходимость увеличения предела огнестойкости до требуемого значения. И если конструктивное решение либо его параметры изменить невозможно, применяют огнезащиту. В зависимости от вида защищаемых конструкций огнезащита может применяться в виде пропиток и вспучивающихся покрытий (соответственно, для деревянных и стальных конструкций), штукатурных составов и противопожарных экранов³ (для любых видов конструкций). Примечательно, что огнезащитные пропитки и противопожарные экраны являются наиболее старинными способами огнезащиты строительных конструкций^{4, 5, 6, 7}.

Огнестойкие подвесные потолки в ряде случаев являются наиболее простым техническим решением повышения огнестойкости и снижения пожарной опасности перекрытий и покрытий. Исторически первые огнестойкие подвесные потолки выполнялись с применением навесных керамических элементов, однако с развитием гипсовой промышленности и промышленности минераловатных утеплителей преимущество было отдано техническим решениям с применением указанных материалов.

Использование подвесных потолков во многом обусловлено эстетическими и практическими функциями. Эстетическая функция характеризуется стремлением создать необходимое архитектурное оформление помещения, скрыв за подвесным потолком конструкции и коммуникации. Практическая функция – это решение задач акустики и огнезащиты, реже – утепления.

Согласно определению СТБ EN 1364-2-2009⁸ [подвесной, независимый] потолок – это несущий элемент конструкции здания, предназначенный обеспечивать горизонтальное противопожарное разделение. Исходя из конструктивных особенностей он может быть закреплен к конструкции перекрытия с помощью подвесов либо может быть самонесущим. С точки зрения огневого воздействия такая конструкция должна выдержать достаточно высокие температуры пожара (в части нормирования – стандартного пожара согласно ГОСТ 30247.0-94⁹, СТБ EN 1363-1-2009¹⁰, ISO 834-1:1999¹¹), достигающие 1000 °С и более. При этом с необогреваемой стороны конструкции не должны быть достигнуты критические температуры, способные вызвать реакцию пиролиза либо потерю несущей способности элементов перекрытия и покрытия.

² Высотные здания. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 3.02.08-2020. – Взамен ТКП 45-3.02-108-2008 (02250); введ. 24.03.21. – Минск: Минстройархитектуры, 2021. – 69 с.

³ В настоящей статье принят термин «противопожарный экран» (англ. fire barrier) в качестве обобщающего термина различных видов конструктивной огнезащиты, выполняемой в виде облицовок, мембран/штор или подвесных потолков. Подобная терминология принята в серии европейских стандартов EN 13381 и ISO 13943.

⁴ Fire proof ceiling: pat. US322873A / P.B. Wight. – Publ. date 21.07.1885.

⁵ Suspended ceiling: pat. US1470728A / E.E. Hall. – Publ. date 16.10.1923.

⁶ Ceiling: pat. US1878812A / L.A. Berger. – Publ. date 20.09.1932.

⁷ Replaceable unit ceiling construction: pat. US2059483A / R.V. Parsons. – Publ. date 03.11.1936.

⁸ Испытания на огнестойкость. Элементы зданий, не несущие нагрузки. Часть 2. Подвесные потолки: СТБ EN 1364-2-2009; введ. 01.01.11. – Минск: Госстандарт, 2010. – 12 с.

⁹ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Взамен СТ СЭВ 1000-78; введ. 01.01.96. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 7 с.

¹⁰ Испытание на огнестойкость. Часть 1. Общие требования: СТБ EN 1363-1-2009; введ. 01.07.10. – Минск: Госстандарт, 2010. – 38 с.

¹¹ Fire-resistance tests. Elements of building construction. Part 1: General requirements: ISO 834-1:1999. – Replaced ISO 834:1975; effect. 15.09.1999. – 25 p.

В соответствии с положениями стандарта EN 13381-1:2014¹² в общем случае критические температуры для различных материалов перекрытия составляют (для воздушного пространства подвесного потолка):

- 600 °С для железобетонных элементов;
- 530 °С для железобетонных элементов по стальным балкам;
- 450 °С для предварительно напряженных железобетонных элементов;
- 400 °С для сталебетонных элементов;
- 370 °С для тонкостенных холоднокатаных элементов;
- 300 °С для деревянных элементов.

Для поверхности, граничащей с пространством подвесного потолка:

- 510 °С для железобетонных элементов по стальным балкам;
- 350 °С для тонкостенных холоднокатаных элементов;
- 350 °С для сталебетонных элементов.

Очевидно, что указанные температуры при проведении испытаний совместно с защищаемым перекрытием под нагрузкой могут быть уточнены в каждом индивидуальном случае. При этом следует отметить, что указанный перечень не является исчерпывающим. Например, известно, что некоторые виды стеклопластиковых конструкций могут существенно терять несущую способность уже при 150 °С, как описано в статье В.А. Кудряшова, А.С. Дробыша [1], и применение различных синтетических материалов в нишах над потолком, имеющих температуру размягчения еще ниже, значительно ограничивает использование данных конструктивных решений. Поэтому при испытании огнестойкого подвесного потолка с неопределенной областью применения (что означает возможность применения в сочетании с любыми конструкциями, в том числе содержащими легковоспламеняемые компоненты, такие как пароизоляция, ветрозащита, гидроизоляция и т.д.) критическая температура может быть значительно ниже той, которая установлена требованиями стандарта СТБ EN 1364-2-2009¹³, критерий наступления предельного состояния по теплоизолирующей способности ограждающих конструкций I – повышение в среднем не более 140 °С либо в любой из точек не более 180 °С, а также требованиями по целостности E.

Таким образом, конструкция подвесного огнестойкого потолка должна отвечать установленным требованиям при пожаре в условиях экстремального перепада температур – 600–900 °С, при этом должна быть достаточно легкой, технологичной и выразительной в эстетическом плане.

Исторически конструкцию огнестойкого подвесного потолка выполняли с использованием стального каркаса на подвесах с огнестойким заполнением пространства между несущими элементами. При этом известно, что стальные элементы при нагреве до высоких температур подвержены тепловому изгибу, а в некоторых случаях и высокотемпературной текучести. По этой причине одной из самых сложных задач при разработке огнестойкого подвесного потолка была разработка стального опорного каркаса и его защита от высокотемпературных воздействий.

В конструкции одного из первых огнестойких подвесных потолков, запатентованных в 1885 г. Wight P.¹⁴, были использованы керамические плитки-изразцы с выступами-замками, закрывающими и защищающими элементы стального крепления. Плитки-изразцы при установке требовалось оштукатурить с целью дополнительной защиты их поверхности, а также швов и стыковых соединений, как показано на рисунке 1.

¹² Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 1: Horizontal protective membranes: EN 13381-1:2014; replaced CEN/TS 13381-1:2005; effect. 24.09.2014. – 47 p.

¹³ См. сноску 8.

¹⁴ См. сноску 4.

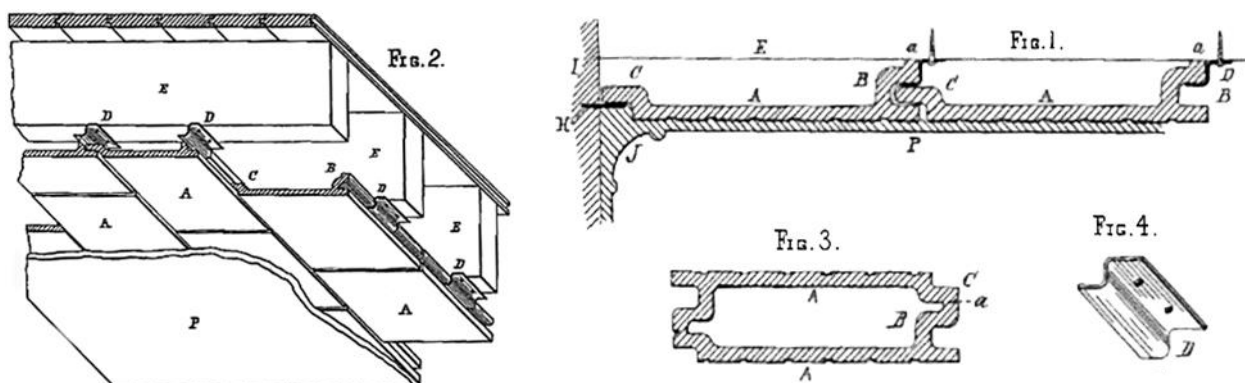


Рисунок 1. – Конструкция огнестойкого подвесного потолка Р.В. Wight, 1885 г.

Однако такое решение было достаточно трудоемким, подвесной потолок подобной конструкции обладал значительным весом. К концу XIX в. были разработаны технологии по изготовлению негорючих прессованных плит из волокнистых материалов (асбест, шлаковолокно, известняковое и базальтовое волокно, позже – стекловолокно), способных за счет своей низкой плотности и инертности к высоким температурам стать основным элементом огнестойкого подвесного потолка, как описано в статье D. Vozsaky [2]. Несмотря на применение инновационных материалов, все еще оставалась проблема температурного расширения и текучести элементов стального каркаса. Поэтому достаточно длительное время исследователи экспериментировали с тепловыми замками и тепловыми компенсаторами. Ряд таких решений дошел и до наших дней ввиду основного достоинства – возможности легкого демонтажа любой из панелей для доступа во внутреннее пространство потолка. Наряду с этим, в первой половине XX в. широкое распространение получил гипсокартон – материал, используемый прежде всего для сухого монтажа легких перегородок¹⁵. Развитие в промышленности гипсокартона постепенно позволило увеличить его прочность на изгиб (в том числе при нагреве – путем добавления стекловолокна в состав сердечника), но одним из ключевых моментов в переходе на гипсовые подвесные потолки стало изобретение огнестойких гипсовых плит на основе стеклополотна¹⁶ – тем самым был исключен наиболее слабый в составе с точки зрения горючести элемент – картон. В итоге проблема теплового нагрева стального каркаса была решена подшивкой огнестойких гипсовых плит снизу, а требуемая теплоизолирующая способность была обеспечена дополнительной теплоизоляцией в виде минераловатных плит низкой плотности. Впервые конструкция такого потолка была запатентована Orals D.L. в 1981 г.¹⁷ и с небольшими доработками успешно применяется и сегодня.

Несмотря на долгую историю развития, значимость и востребованность таких решений, в современной литературе практически не представлены результаты огневых испытаний подобных огнестойких потолков. В статьях J.O. Dirisu и M. Kaftanowicz [3–4] рассмотрена лишь возможность применения подвесных потолков в качестве огнезащиты, а статьи M. Rusinova и А.Ф. Жаркова [5–6] посвящены преимущественно расчетной оценке огнестойких подвесных потолков без проведения сравнительного анализа с экспериментальными данными. В практических руководствах по огнезащите строительных конструкций также упоминаются огнестойкие подвесные потолки [7–9], а в руководстве [10] и сопутствующей научной работе [11] предложена универсальная методика их теплового расчета.

¹⁵ Inside wall covering: pat. US520123A / A. Sackett. – Publ. date 22.05.1894.

¹⁶ Fibre glass covered gypsum board: pat. DE2049603A1 / Gebr. Knauf Westdeutachw Gipswerke. – Publ. date 08.06.1972.

¹⁷ Fire resistant ceiling furring system: pat. US4266384A / D.L. Orals, A. Heights, J.D. Laffoon, D. Plaines. – Publ. date 12.05.1981.

Лишь в статье [12] представлены достаточно подробные данные экспериментальных исследований огнезащитных подвесных потолков при стандартном и углеводородном режимах пожаров, однако без применения гипсовых плит. Так, огнестойкие плиты на основе силикатов кальция марки PROMATECT при стандартном огневом режиме согласно требованиям ГОСТ 30247.0-94¹⁸ и ГОСТ Р 53298-2009¹⁹ показали огнезащитную эффективность (достижение 500 °С на защищаемых стальных балках):

- 2 слоя суммарной толщиной 16 мм – 136–142 мин;
- 2 слоя суммарной толщиной 20 мм – 172–175 мин.

При углеводородном огневом режиме согласно требованиям EN 1363-2:1999²⁰ и ГОСТ Р 53298-2009 огнестойкие плиты показали огнезащитную эффективность: 2 слоя суммарной толщиной 30 мм и дополнительный слой минераловатных плит толщиной 200 мм плотностью 60 кг/м³ – более 155 мин (испытания были остановлены без достижения критической температуры 500 °С на защищаемых стальных балках).

Исходя из данных по температурно-временным зависимостям, рассмотренным в статье, огнестойкость представленных решений – подвесных потолков для любых видов конструкций (в соответствии с принятыми предельными состояниями по теплоизолирующей способности стандарта СТБ EN 1364-2-2009²¹) составляет порядка 30 мин без минераловатной изоляции и 150 мин с ее наличием (принимая во внимание, что углеводородный режим значительно жестче стандартного). Также следует отметить более высокую стоимость плит на основе силикатов кальция по сравнению с гипсовыми плитами.

В ряде других работ [13–15] рассматривают устройство подвесного потолка как инструмент для ограничения распространения опасных факторов пожара и противоподымной защиты помещений. Достаточно много работ по подвесным потолкам посвящены их устойчивости при землетрясениях [16–17].

Таким образом, экспериментальное исследование огнестойких подвесных потолков с использованием гипсовых негорючих плит и минераловатных утеплителей является актуальной задачей.

Основная часть

Как было отмечено ранее, основным стандартным методом испытаний огнестойких подвесных потолков является метод согласно СТБ EN 1364-2-2009²² с использованием установки и огневого режима в соответствии с СТБ EN 1363-1-2009²³. Методика проведения испытаний устанавливает режимы огневого воздействия для огнестойких потолков (с огневым воздействием со стороны помещения и в пространстве над потолком), а также виды предельных состояний для оценки их пределов огнестойкости:

- предельное состояние по теплоизолирующей способности *I* характеризуется превышением температуры с необогреваемой стороны фрагмента образца в среднем более чем на 140 °С или локально (включая передвижную термопару) более чем на 180 °С в сравнении со средней температурой образца до испытаний;
- предельное состояние по потере целостности *E* характеризуется выходом продуктов горения на необогреваемую сторону образца с последующим воспламенением хлопчатобумажного тампона либо образованием на необогреваемой стороне конструкции фрагмента устойчивого пламенного горения.

¹⁸ См. сноску 9.

¹⁹ Потолки подвесные. Метод испытания на огнестойкость: ГОСТ Р 53298-2009. – Введ. 01.01.10. – М.: Стандартинформ, 2009. – 7 с.

²⁰ Fire resistance tests. Part 2: Alternative and additional procedures: EN 1363-2:1999. – Effect. 18.08.1999. – 16 p.

²¹ См. сноску 8.

²² См. сноску 8.

²³ См. сноску 20.

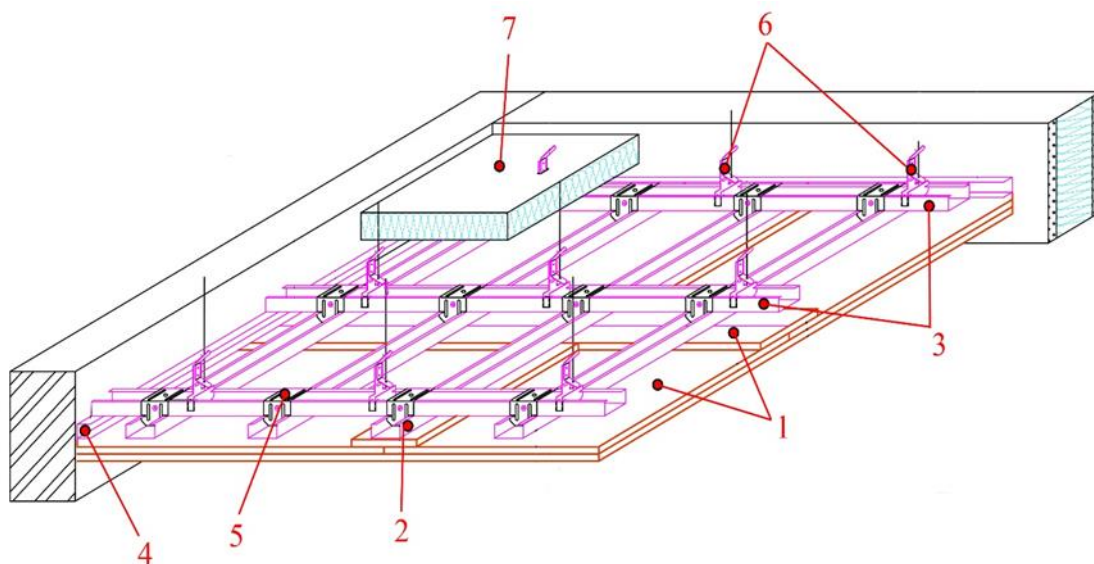
Для проведения испытаний опытный образец монтируют на испытательной печи с дополнительно возведенными ограждающими конструкциями в виде стен для крепления подвесного потолка. Размер фрагмента огнестойкого потолка должен составлять не менее 3000×4000 мм. Технология монтажа подвесного потолка должна полностью воспроизводить технологию на реальных объектах строительства: монтаж несущего каркаса конструкции, укладка теплоизоляционного минераловатного слоя, после чего зашивка гипсовыми негорючими плитами с заделкой швов и стыков.

Несущий каркас фрагмента исходя из конструктивных особенностей может крепиться к имитируемому перекрытию посредством подвесов, высота которых также должна соответствовать реальному проектированию.

Имитацией перекрытия, к которому крепится каркас подвесного потолка, служат двутавровые балки № 14 либо их аналоги, позволяющие в ходе проведения испытаний, а также нагрева образца обеспечить крепление испытываемого фрагмента. В испытательный образец должны быть включены элементы освещения и ревизионные люки доступа в ниши над потолком для планового осмотра и обслуживания инженерных коммуникаций, если таковые применяются на практике.

Огневое воздействие на испытательный образец может осуществляться как со стороны помещения (а←b), так и со стороны пространства над потолком (а→b). В настоящей работе рассмотрен только один случай – пожар со стороны помещения (а←b). Экспериментальная оценка огнестойкости подвесного потолка при пожаре в пространстве над потолком (а→b) является предметом отдельного исследования. Следует отметить, что в такой ситуации применение горючих материалов в нише над потолком должно быть ограничено.

Экспериментальный образец для испытаний был разработан в соответствии с требованиями СТБ EN 1364-2-2009²⁴ (воздействие огня со стороны помещения), принципиальная схема устройства фрагмента представлена на рисунке 2.



1 – гипсовые негорючие плиты; 2 – потолочный профиль первого уровня; 3 – потолочный профиль второго уровня; 4 – направляющий профиль; 5 – двухуровневый соединитель; 6 – подвес; 7 – теплозвукоизоляционная минеральная вата

Рисунок 2. – Принципиальная схема устройства фрагмента огнестойкого подвесного потолка с применением гипсовых негорючих плит марки Gyproc Fire

Фрагмент огнестойкого подвесного потолка размером 3500×4000 мм состоял из направляющего потолочного профиля для гипсокартона UD (ППН) 28-0,6-3000, установленного по периметру проема испытательной печи размером в сечении 27×28×0,6 мм,

²⁴ См. сноску 8.

прикрепленного к кладке из газосиликатных блоков с помощью дюбеля для пенобетона марки ПБ 8х55. Шаг крепления направляющего профиля 400 мм.

На направляющий профиль была уложена обрешетка, состоящая из двух уровней: первый уровень выполнен из основных профилей, расположенных с шагом 750 мм, второй уровень устроен перпендикулярно первому и выполнен из несущих профилей, установленных с шагом 400 мм. Основной и несущий профили выполнены из профиля для гипсокартона CD (ПП) 60-0,6-3000 размером в сечении 60×27×0,6 мм. Первый уровень из основных профилей CD (ПП) 60-0,6-3000 к несущему перекрытию (имитация перекрытия выполнена двутавровыми балками 20 Б1) был закреплен с помощью кронштейна, состоящего из подвесов прямых универсальных марки ППУ 60/27 и профиля CD (ПП) 60-0,6-3000, Республика Беларусь. Шаг установки кронштейнов – 650 мм.

Кронштейн крепился к несущему основанию, представленному балками двутавровыми 20 Б1, с использованием саморезов кровельных размером 5,5х19 мм, крепление кронштейна к основному профилю выполнено с использованием саморезов с цилиндрической головкой со сверлом размером 3,5×9,5 мм. Второй уровень из несущих профилей CD (ПП) 60-0,6-3000 крепился к первому уровню с использованием соединителей двухуровневых с шагом крепления 400 мм с помощью винтов самонарезающих со сверлом размером 3,5×9,5 мм. Наравивание основных профилей было выполнено с помощью продольных соединителей СП 60/27-0,5 мм.

К обрешетке из основных профилей саморезами по гипсокартону размером 3,5×35 мм с шагом 200 мм крепилась полоса размером в сечении 150×12,5 мм. По периметру к направляющему профилю саморезами по гипсокартону размером 3,5×35 мм с шагом 200 мм крепилась полоса размером 50×12,5 мм. Закрепленные полосы выполнены из плиты Гуркос Fire плотностью 890 кг/м³.

После монтажа полос с помощью саморезов по гипсокартону размером 3,5×35 мм с шагом 200 мм закреплен первый слой плит Гуркос Fire (размер листа 2500×1200×12,5). На стыковые швы соединения плит Гуркос Fire, а также на шляпки самонарезающих винтов нанесена шпатлевка гипсовая FB 203 с использованием по стыкам сетки самоклеящейся, армированной ССС шириной 45 мм. Схемы основных узлов монтажа представлены на рисунке 3.

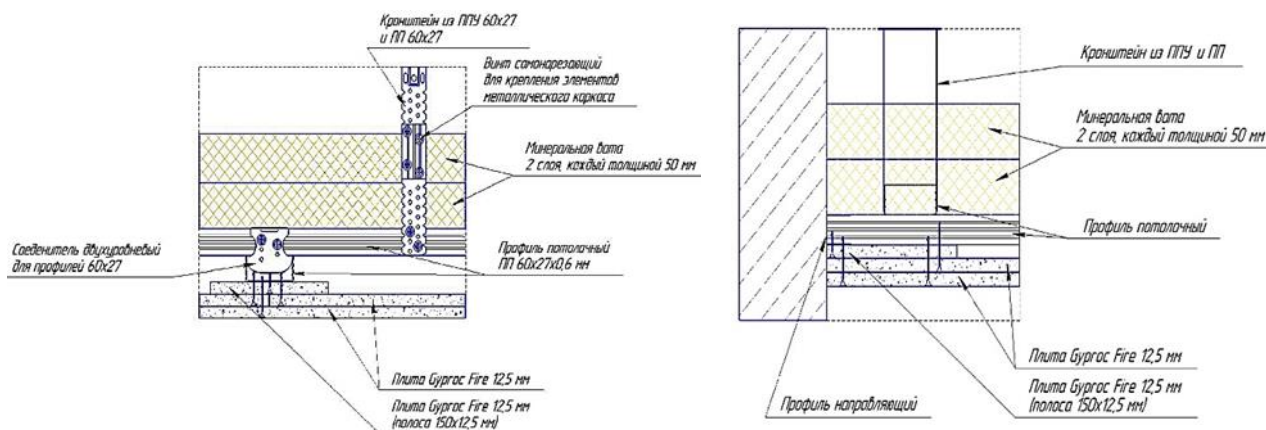


Рисунок 3. – Основные узлы фрагмента огнестойкого подвесного потолка с применением гипсовых негорючих плит марки Гуркос Fire

Поверх первого слоя облицовки каркаса с помощью саморезов по гипсокартону размером 3,5×35 мм с шагом 200 мм крепится второй слой плит Гуркос Fire 12,5 мм. Аналогично первому слою стыковые швы соединения плит, а также на шляпки самонарезающих винтов заделываются шпатлевкой гипсовой FB 203.

На несущий профиль каркаса марки CD (ПП) 60-0.6-3000 мм укладывается тепло-звукоизоляционная плита марки ISOVER, звукозащита 50/Е/К, плотностью 14±10 % кг/м³,

толщиной 50 мм. Теплозвукоизоляционный материал укладывается в 2 слоя, второй слой теплозвукоизоляционного материала укладывается перпендикулярно первому, с разбежкой стыковых соединений, общая толщина звукоизоляционного слоя – 100 мм.

Высота подвеса огнезащитного подвесного потолка (от верхних направляющих двухуровневой обрешетки до стальных опор) составляет 242 мм. Монтаж фрагмента выполнен к кладке из газосиликатных блоков размером 600×250×400, уложенных на клеювом составе, с закладкой армирующего пояса по периметру проема, выполненного из стальной арматуры диаметром 12 мм.

Ввиду того что стандартной методикой предусматривается измерение температуры в 5 точках на необогреваемой поверхности потолка (одна в центре, другие – в четвертях диагоналей), для получения более подробных данных прогрева элементов подвесного потолка и получения температурно-временных зависимостей нагрева наиболее ответственных узлов была разработана методика определения зависимости роста температуры от времени в локальных точках фрагмента огнестойкого подвесного потолка с применением гипсовых негорючих плит Гуркос Fire 12,5 мм при огневом воздействии с нижней стороны (далее – Методика).

Согласно разработанной Методике места установки дополнительных температурных датчиков были определены с учетом особенностей монтажа, расположения стыковых соединений и швов гипсовых негорючих плит, устройства удлиняющих соединителей несущего каркаса и включенных ребер жесткости.

Указанные места в конструкции фрагмента являются наиболее значимыми при огневом воздействии, т.к. позволяют объяснить особенности его функционирования при высокотемпературном воздействии. В ходе огневого воздействия ожидается дегидратация гипсовых негорючих плит, способствующая их сокращению и соответственно раскрытию швов (а также локальному разрушению и выпадению), возможны тепловые деформации несущего стального каркаса и подвесов, способствующие достижению предельных состояний по огнестойкости.

Послойные схемы установки термоэлектрических преобразователей представлены на рисунках 4–6.

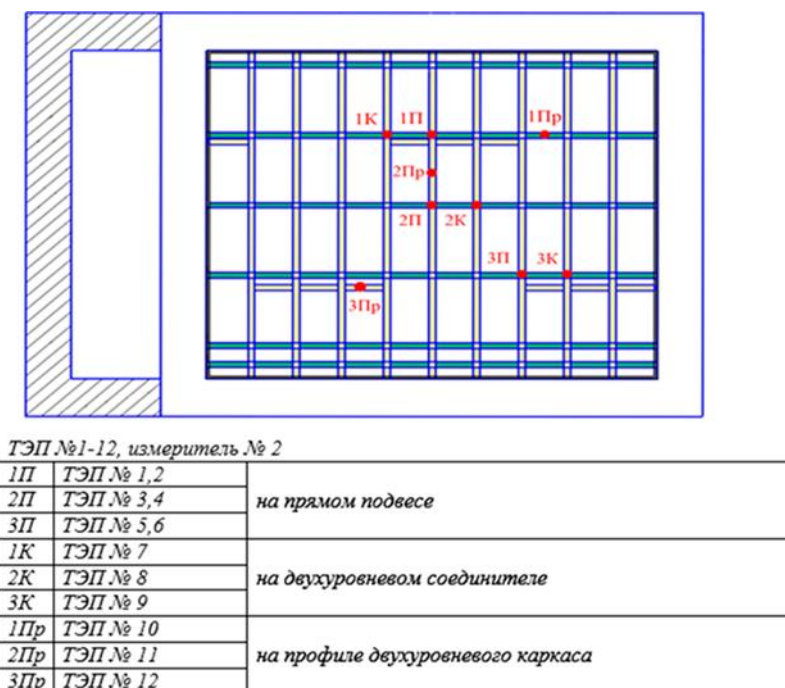
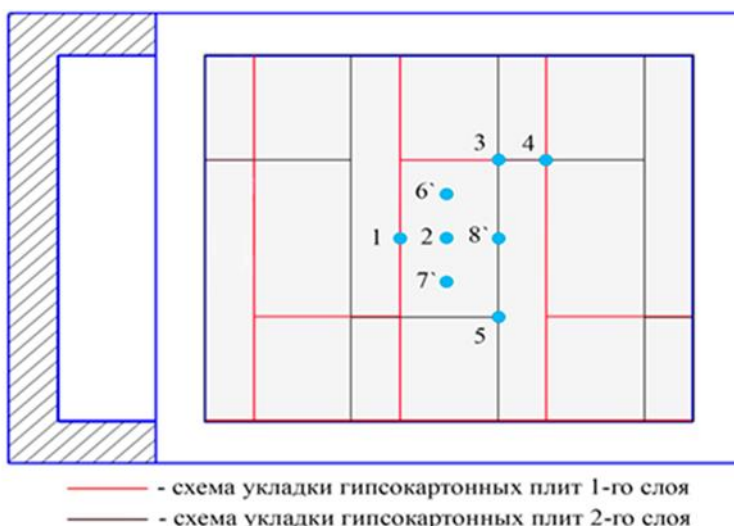


Рисунок 4. – Схема расстановки термоэлектрических преобразователей на подвесах и профилях двухуровневого каркаса



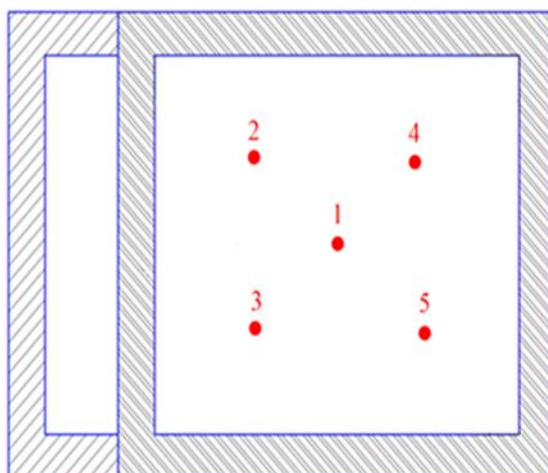
ТЭП №1-13, измеритель № 1

1	ТЭП № 1*	2	ТЭП № 2*	3	ТЭП № 3*	4	ТЭП № 4*
	ТЭП № 9**		ТЭП № 10**		ТЭП № 11**		ТЭП № 12**
5	ТЭП № 5*	6'	ТЭП № 6**	7'	ТЭП № 7**	8'	ТЭП № 8**
	ТЭП № 13**						

* – со стороны огневого воздействия

** – с необогреваемой стороны

Рисунок 5. – Схема расстановки термоэлектрических преобразователей на гипсовых негорючих плитах



ТЭП №14-26, измеритель № 1

1	ТЭП № 14	на поверхности верхнего слоя минеральной ваты*
	ТЭП № 25	между слоями минеральной ваты
	ТЭП № 26	на поверхности гипсовой плиты
2	ТЭП № 15	на поверхности минеральной ваты*
3	ТЭП № 16	
4	ТЭП № 17	
5	ТЭП № 18	

* – без груза для ТЭП

Рисунок 6. – Схема расстановки термоэлектрических преобразователей на минеральной вате с необогреваемой стороны фрагмента (в том числе между слоев минеральной ваты)

Температурный режим при проведении огневых испытаний фрагмента огнестойкого подвесного потолка с учетом допустимых отклонений соответствовал стандартному и представлен на рисунке 7. Температурные отклонения от стандартных значений в объеме испытательной печи, зафиксированные в первые 14 мин испытаний, были вызваны

вследствие интенсивного выделения влаги с обогреваемой стороны испытываемого фрагмента с одновременным значительным поглощением теплового потока гипсовыми негорючими плитами, что привело к снижению измеряемых температур.

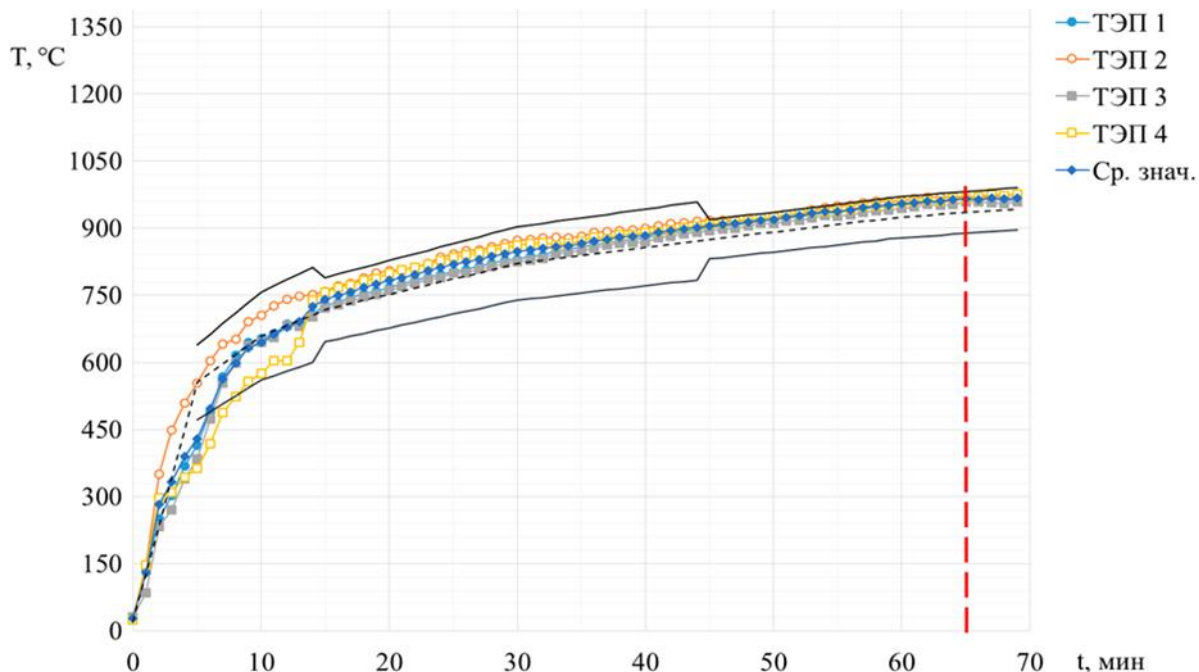


Рисунок 7. – График изменения температурно-временного режима в объеме испытательной печи

Стены для крепления имитации перекрытия и сопряжения подвесного потолка были выполнены ячеисто-бетонной кладкой на клеевом составе. Имитация перекрытия была выполнена 6 стальными двутавровыми балками 20 Б1, уложенными по длинной стороне фрагмента с шарнирным креплением на опорах стены (рис. 8).



Рисунок 8. – Промежуточные результаты монтажа фрагмента огнестойкого подвесного потолка с применением гипсовых негорючих плит

В ходе огневого воздействия на образец, на 12-й минуте испытаний было зафиксировано выделение пара (дыма) с необогреваемой стороны фрагмента в месте сопряжения с ячеисто-бетонной стеной, а после – конденсация пара на несущих двутавровых балках и верхнем слое минеральной ваты (рис. 9).

Полученные графики температурно-временных зависимостей в ходе проведения испытания представлены на рисунках 10–13. На рисунке 10 приведены показания термоэлектрических преобразователей, установленных на обогреваемой поверхности гипсовых негорючих плит. Указанные датчики были закреплены согласно схеме расстановки, представленной на рисунке 5. Спай датчиков крепился к обогреваемой поверхности гипсовых негорючих плит механическим способом через паронитовую прокладку. Представленные на рисунке данные «Ср. значение печных ТЭП» отражают среднеобъемную температуру в огневой камере испытательной печи.

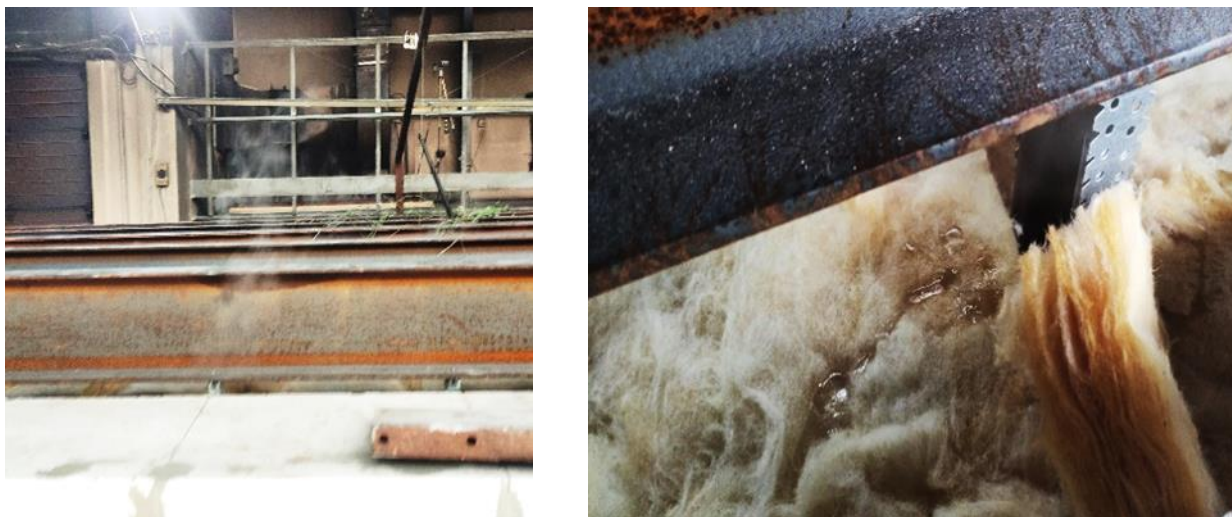


Рисунок 9. – Выход дыма (пара) при испытании фрагмента огнестойкого подвесного потолка, конденсация пара

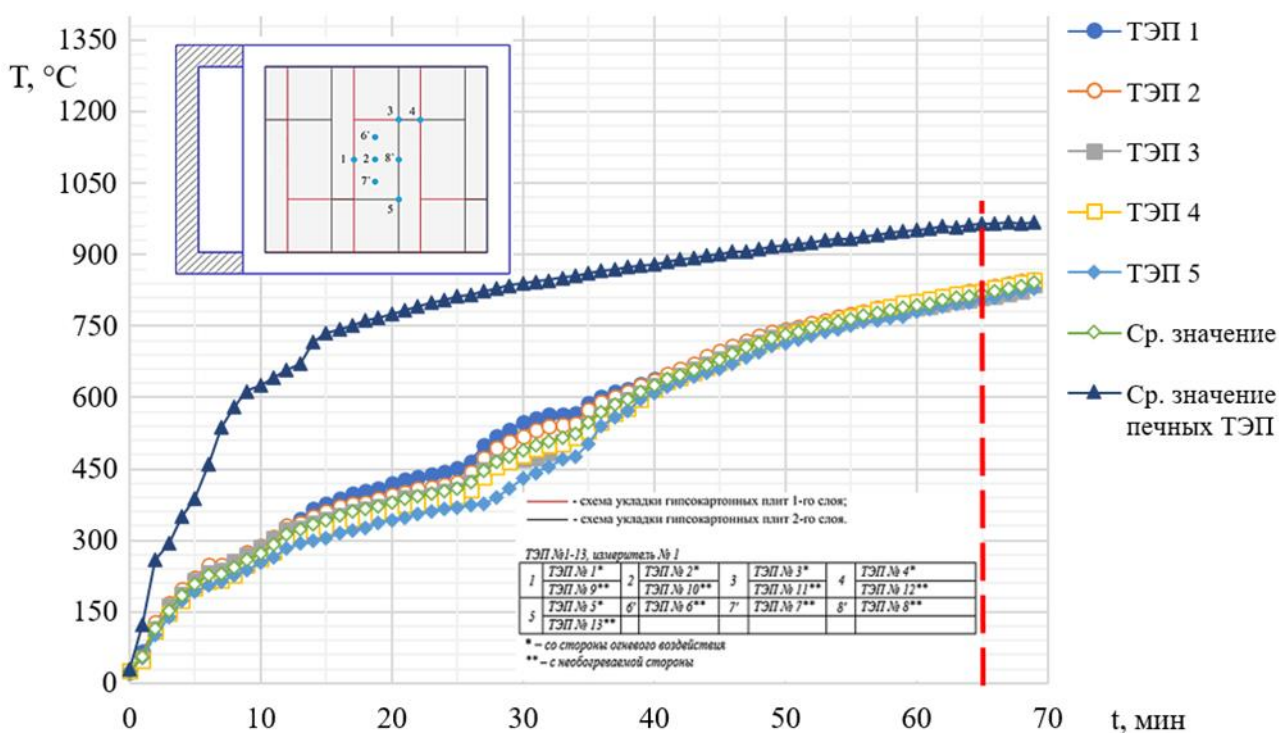


Рисунок 10. – График изменения температурно-временных зависимостей для точек на обогреваемой поверхности гипсовых негорючих плит

График температурно-временных зависимостей, полученный в ходе проведения испытаний (рис. 11), отражает данные с термоэлектрических преобразователей, установленных согласно схеме расстановки, представленной на рисунке 5. Датчики измерения температур были механически закреплены на необогреваемой поверхности гипсовых негорючих плит (под слоем теплоизоляции).

Температурно-временные зависимости для точек на необогреваемой поверхности гипсовых негорючих плит (рис. 11) свидетельствуют о наличии так называемой площадки кипения воды, при которой была зафиксирована практически идентичная температура 80–100 °С. Указанный факт свидетельствует об испарении химически не связанной (свободной) воды, входящей в состав гипса, и о выполнении его основной функции по теплоизоляции. Данное явление наблюдалось вплоть до 40-й мин испытаний, после чего температуры стали резко возрастать.

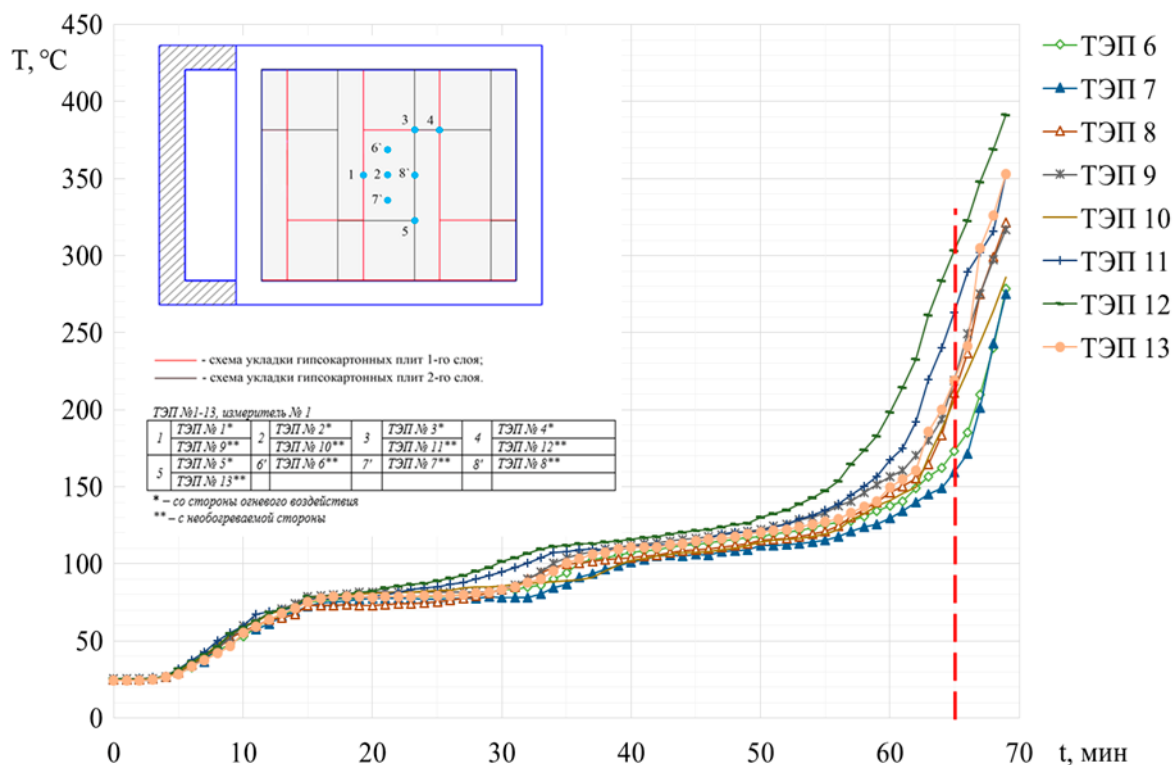


Рисунок 11. – График изменения температурно-временных зависимостей для точек на необогреваемой поверхности гипсовых негорючих плит

О наличии площадки кипения воды также свидетельствуют полученные данные с датчиков, установленных на поверхности теплоизоляции (в том числе в слоях между теплоизоляционными плитами) и элементах каркаса (под теплоизоляционным слоем), представленных на рисунках 12–13. Датчики измерения температур, установленные на теплоизоляционном слое, не имели механического крепления, были свободно уложены на слой теплоизоляции без дополнительного изолирования спаев (концов термопар).

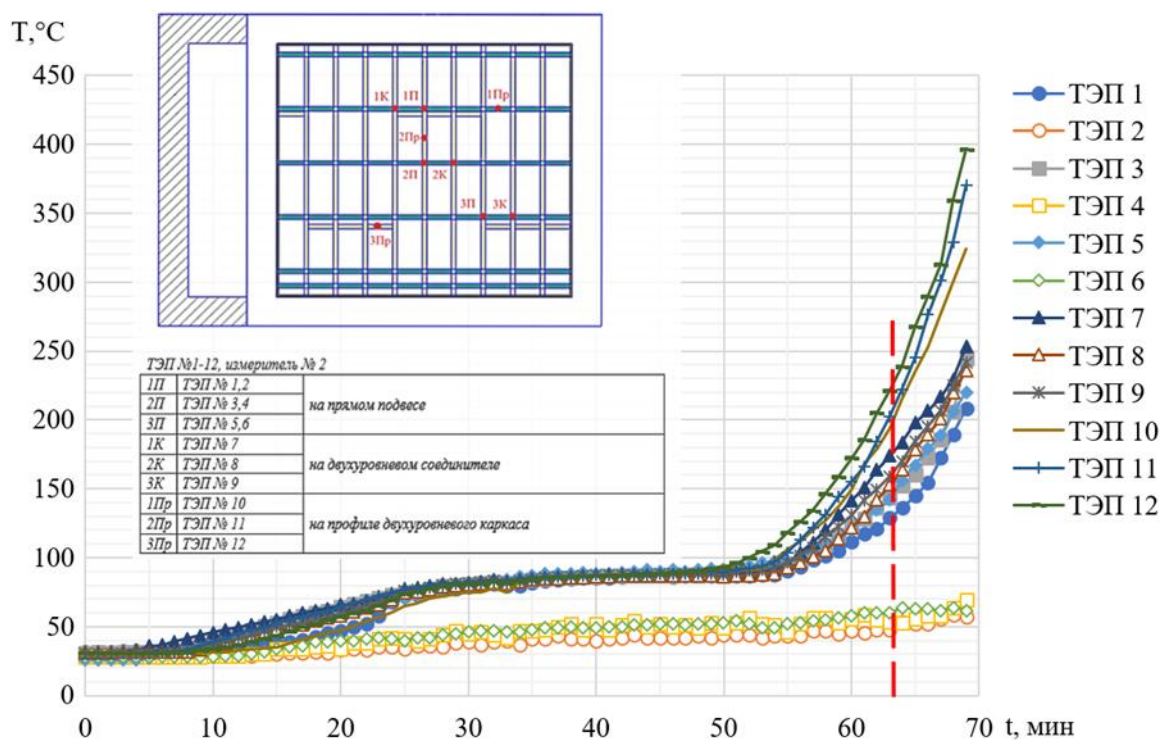


Рисунок 12. – График изменения температурно-временных зависимостей для точек на необогреваемой поверхности элементов каркаса

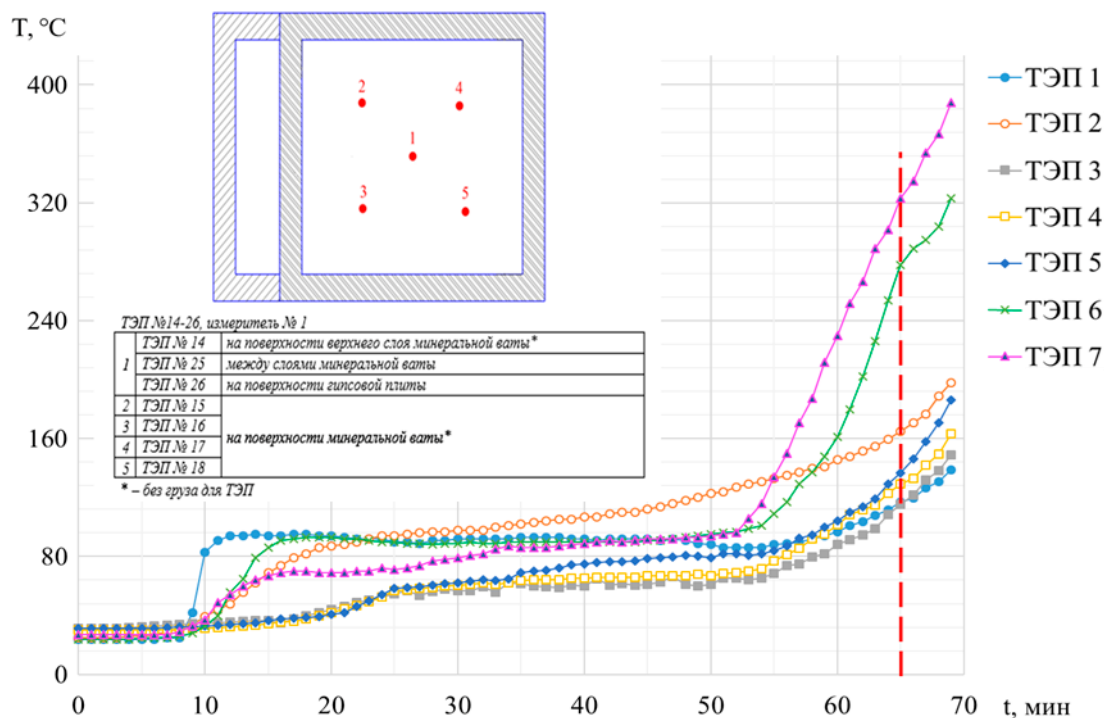


Рисунок 13. – График изменения температурно-временных зависимостей для точек на необогреваемой минеральной вате

К 61-й мин испытаний было зафиксировано изменение цвета верхнего минераловатного слоя в центральной части испытываемого образца; на 69-й мин испытаний – выход продуктов горения на необогреваемой стороне с последующим воспламенением хлопчатобумажного тампона, что свидетельствует о наступлении предельного состояния по потере целостности Е.

Предельное состояние по потере теплоизолирующей способности (достижение критических температур) согласно требованиям СТБ EN 1364-2-2009²⁵ зафиксировано:

- в среднем более 140 °С по сравнению с исходной – на 65-й минуте испытаний;
- одной из локальных точек более 180 °С по сравнению с исходной – на 69-й мин испытаний.

Опыт остановлен по достижении предельных состояний Е1, фактический предел огнестойкости испытываемого фрагмента составляет Е1 60 (а←b).

После остывания технологического оборудования, по истечении 10 ч 30 мин, был проведен осмотр испытанного образца, проведена разборка отдельных узлов фрагмента. По результатам осмотра установлена полная дегидратация и повсеместное растрескивание (разрушение) гипсовых негорючих плит, а также локальная деформация, смятие направляющего профиля, закрепленного к ячеисто-бетонной кладке (рис. 14). Установлено, что смятие направляющего профиля произошло в центральной части, в месте контакта с двухуровневой обрешеткой. Детально осмотрев поврежденный участок, а также узлы крепления профиля к кладке из ячеистых блоков, можно сделать вывод, что в результате нагрева конструкции и ее прогиба, преимущественно в центральной части фрагмента, сопровождающегося тепловым расширением стальных элементов, включенных в образец, произошло точечное механическое воздействие, которое и повлияло на структуру направляющего профиля.

²⁵ См. сноску 8.



Рисунок 14. – Огневая камера печи после проведения испытаний. Локальное разрушение гипсовых негорючих плит, деформация направляющего профиля

Заключение

Огнестойкий подвесной потолок с применением гипсовых негорючих плит является наиболее простым и распространенным решением для увеличения предела огнестойкости горизонтальных элементов перекрытий и покрытий. Для подтверждения технических решений, применяемых для устройства огнестойких подвесных потолков с применением гипсовых негорючих плит, был разработан типовой экспериментальный образец и проведены его натурные испытания с воздействием огня снизу. Огнестойкий подвесной потолок, сформированный двумя сплошными слоями гипсовых негорючих плит марки Gyproc Fire суммарной толщиной 25 мм и двумя слоями минеральной ваты марки ISOVER 50/E/K плотностью 14 кг/м³ суммарной толщиной 100 мм на несущем двухуровневом каркасе из тонкостенных профилей, соответствует пределу огнестойкости EI 60 (а←b) согласно СТБ EN 1364-2-2009²⁶. Средняя температура на необогреваемой поверхности минераловатных плит составила 170 °С на 65-й минуте испытаний. Полученные результаты огневых испытаний могут быть использованы для численного моделирования огнестойкого подвесного потолка при высокотемпературном воздействии, а также в практической деятельности как огнезащитное решение строительных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов, В.А. Результаты экспериментальных исследований огнестойкости полимерных композитных материалов, армированных стекловолокном / В.А. Кудряшов, А.С. Дробыш, А.М. Соловьяничик // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 1 (21). – С. 17–24. – EDN: ТКPYGP.

²⁶ См. сноску 8.

2. Bozsaky, D. The historical development of thermal insulation materials / D. Bozsaky // *Periodica Polytechnica Architecture*. – 2010. – Vol. 41, No. 2. – P. 49–56. – DOI: 10.3311/pp.ar.2010-2.02.
3. Dirisu, J. Thermal emission and transfer characteristics of ceiling materials: a necessity / J.O. Dirisu, O.S.I. Fayomi, S.O. Oyedepo // *Energy Procedia*. – 2019. – Vol. 157. – P. 331–342. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.198.
4. Kaftanowicz, M. Multiple-criteria analysis of plasterboard systems / M. Kaftanowicz, M. Krzeminski // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 111. – P. 364–370. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.102.
5. Rusinová, M. Behaviour of timber beam structures with suspended ceiling when exposed to fire / M. Rusinová, M. Kalousek, M. Lavický // *International Review of Applied Sciences and Engineering*. – 2019. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 71–77. – DOI: 10.1556/1848.2019.0011.
6. Жарков, А.Ф. Огнестойкость покрытий из профлистов с подвесными потолками с воздушной прослойкой / А.Ф. Жарков, Ф.А. Жарков, О.Г. Чеснокова // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. – 2015. – Вып. 4 (40). – Ст. 10. – 17 с. – EDN: VJKEPF.
7. Fire protection for structural steel in buildings. – Association of Specialist Fire Protection Contractors and Manufacturers, Steel Construction Institute, Fire Test Study Group, 2004. – 162 p.
8. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / Ed. M.J. Hurley [et al.] – USA, New York: Springer, 2016. – 3493 p. – DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
9. Structural fire protection. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 78. / Edited by T.T. Lie. – New York, American Society of Civil Engineers, 1992. – 241 p.
10. Performance-based design of structural steel for fire conditions: a calculation methodology. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 114 / Edited by D.L. Parkinson, V. Kodur, P.D. Sullivan. – USA, American Society of Civil Engineers, 2009. – 124 p. – DOI: 10.1061/9780784409633.
11. Parkinson, D. Performance based design of structural steel for fire conditions / D.L. Parkinson, V. Kodur // *Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety*. – USA, American Society of Civil Engineers, 2009. – P. 1–10. – DOI: 10.1061/40889(201)36.
12. Гравит, М. Огнезащитные подвесные потолки с высокими пределами огнестойкости / М.В. Гравит [и др.] // *Инженерно-строительный журнал*. – 2018. – № 8 (84). – С. 75–85. – DOI: 10.18720/MCE.84.8. – EDN: ZMSPTM.
13. Chou, T-L. Study on Smoke Leakage Performance of Suspended Ceiling System / T-L. Chou, C-H. Tang, Y-J. Chuang, C-Y. Lin // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, Iss. 18. – Article 7244. – 13 p. – DOI: 10.3390/su12187244.
14. Zhou, X. Time-resolved fire heat release rate under a ceiling based on ceiling layer measurements / X. Zhou // *Fire Safety Journal*. – 2020. – Vol. 111. – 9 p. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102923.
15. Калинин, Е.С. Влияние исполнения подвесного потолка на динамику распространения опасных факторов пожара / Е.С. Калинин // *Сб. материалов VIII науч.-практ. конф. «Ройтмановские чтения»*, Москва, 5 марта 2020 г. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 35–38.
16. Enoki, S. Research on Strength Design of Channel Clips for Suspended Ceilings / S. Enoki [et al.] // *Key Engineering Materials*. – 2018. – Vol. 774. – P. 223–228. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.774.223.
17. Jiang, H. Numerical modeling and experimental validation for suspended ceiling system with free boundary condition / H. Jiang [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – Vol. 61. – 17 p. – DOI: 10.1016/j.job.2022.105285.

**Экспериментальное исследование огнестойкости подвесного потолка,
выполненного с применением негорючих гипсовых плит**

**Experimental study of fire resistance of suspended ceiling
made with application of gypsum non-combustible boards**

Кудряшов Вадим Александрович

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, Беларусь, г. Минск

Email: vadkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Vadim A. Kudryashov

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, Belarus, Minsk

Email: vadkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

Ботян Сергей Сергеевич

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС
Беларуси», кафедра пожарной безопасности,
начальник кафедры

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

Email: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Sergey S. Botyan

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, Head of Chair

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

Email: aseckis@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8593-4413

Коба Станислав Сергеевич

Учреждение «Научно-исследовательский
институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций» Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики
Беларусь, отдел полигонных испытаний,
главный специалист

Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь

Email: kobastanislav31@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0236-9349

Stanislav S. Koba

Research Institute for Fire Safety and Problems
of Emergencies of the Ministry of Emergency
Situations of the Republic of Belarus,
Field Testing Department,
Chief Specialist

Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus

Email: kobastanislav31@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0236-9349

Королев Александр Владимирович

Иностранное общество с ограниченной
ответственностью «Сен-Гобен Строительная
Продукция Белрус», руководитель
направления проектных продаж

Адрес: ул. Левкова, 41/2, оф. 402,
220007, г. Минск, Беларусь

Email: Aliaksandr.Karaliou@sgcp.by

Aleksandr V. Korolev

Foreign Limited Liability Company
«Saint-Gobain Construction Products Belarus»
Head of Project Sales

Address: Levkova str., 41/2, of. 402,
220007, Minsk, Belarus

Email: Aliaksandr.Karaliou@sgcp.by

Лойко Юрий Леонидович

Иностранное общество с ограниченной
ответственностью «Сен-Гобен Строительная
Продукция Белрус», генеральный директор

Адрес: ул. Левкова, 41/2, оф. 402,
220007, г. Минск, Беларусь

Email: Yury.Loika@sgcp.by

Yuriy L. Loyko

Foreign Limited Liability Company
«Saint-Gobain Construction Products Belarus»
General Director

Address: Levkova str., 41/2, of. 402,
220007, Minsk, Belarus

Email: Aliaksandr.Karaliou@sgcp.by

EXPERIMENTAL STUDY OF FIRE RESISTANCE OF SUSPENDED CEILING MADE WITH APPLICATION OF GYPSUM NON-COMBUSTIBLE BOARDS

Kudryashov V.A., Botyan S.S., Koba S.S., Korolev A.V., Loyko Yu.L.

Purpose. To develop a typical sample of a fragment for full-scale tests with fire from below (from the side of the room) based on the analysis of technical solutions used for the installation of fire-resistant suspended ceilings using gypsum boards. To carry out fire tests and determine the fire resistance of the experimental sample, to obtain temperature-time dependences for local points of the tested fragment, which are most susceptible to destruction and deformation as a result of heating.

Methods. The analysis of the results of existing research and methods to achieve research goals. The development of a type sample for testing in accordance with the requirements of STB EN 1363-1-2009, STB EN 1364-2-2009. The development of a methodology for determining the temperature-time dependences during heating for local points of a sample of a fire-resistant suspended ceiling. Experimental fire research.

Findings. A fire-resistant suspended ceiling using non-combustible gypsum boards is the simplest and most common solution for increasing the fire resistance of horizontal floor and roof elements. To confirm the technical solutions used for the installation of fire-resistant suspended ceilings using gypsum boards, a typical experimental sample was developed.

Fire-resistant suspended ceiling formed by two continuous layers of non-combustible gypsum boards Gyproc Fire brand with a total thickness of 25 mm, and two layers of mineral wool ISOVER 50/E/K brand having the density of 14 kg/m³ and total thickness of 100 mm on a supporting two-level frame from thin-walled profiles corresponds to the fire resistance limit EI 60 (a←b) according to STB EN 1364-2-2009. The average temperature on the unheated surface of mineral wool boards was 170 °C at 65th minute of testing.

Application field of research. The results of fire tests can be used in numerical simulation of the heating of a fire-resistant suspended ceiling under high-temperature exposure, as well as in practice as a fire protection solution for building structures.

Keywords: fire resistance, fire protection, fire tests, fire-resistant suspended ceiling, standard fire, gypsum board, temperature-time dependence, destruction.

(The date of submitting: January 13, 2023)

REFERENCES

1. Kudryashov V.A., Drobysh A.S., Solovyanchik A.M. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy ognestoykosti polimernykh kompozitnykh materialov, armirovannykh steklovoloknom [Results of experimental researches fire resistance of polymer composite materials reinforced with fiberglass]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2015. No. 1 (21). Pp. 17–24. (rus). EDN: TKPYGP.
2. Bozsaky D. The historical development of thermal insulation materials. *Periodica Polytechnica Architecture*, 2010. Vol. 41, No. 2. Pp. 49–56. DOI: 10.3311/pp.ar.2010-2.02.
3. Dirisu J.O., Fayomi O.S.I., Oyedepo S.O. Thermal emission and transfer characteristics of ceiling materials: a necessity. *Energy Procedia*, 2019. Pp. 331–342. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.11.198.
4. Kaftanowicz M., Krzeminski M. Multiple-criteria analysis of plasterboard systems. *Procedia Engineering*, 2015. Vol. 111. Pp. 364–370. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.102.
5. Rusinová M., Kalousek M., Lavický M. Behavior of timber beam structures with suspended ceiling when exposed to fire. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 2019. Vol. 10, Iss. 1. Pp. 71–77. DOI: 10.1556/1848.2019.0011.
6. Zharkov A.F., Zharkov F.A., Chesnokova O.G. Ognestoykost' pokrytiy iz proflistov s podvesnymi potolkami s vozduшной прослойкой [Fire resistance of coatings from profiled sheeting with suspended ceiling with air gap]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015. Iss. 4 (40). Article 10. 17 p. (rus). EDN: VJKEPF.
7. *Fire protection for structural steel in buildings*. Association of Specialist Fire Protection Contractors and Manufacturers, Steel Construction Institute, Fire Test Study Group, 2004. 162 p.

8. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Ed. M.J. Hurley et al. USA, New York: Springer, 2016. 3493 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
9. *Structural fire protection*: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 78. Edited by T.T. Lie. New York, American Society of Civil Engineers, 1992. 241 p.
10. *Performance-based design of structural steel for fire conditions: a calculation methodology*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 114. Edited by D.L. Parkinson, V. Kodur, P.D. Sullivan. USA, American Society of Civil Engineers, 2009. 124 p. DOI: 10.1061/9780784409633.
11. Parkinson D.L., Kodur V. Performance based design of structural steel for fire conditions. In *Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety*. USA, American Society of Civil Engineers, 2009. Pp. 1–10. DOI: 10.1061/40889(201)36.
12. Gravit M.V., Golub E.V., Grigoriev D.M., Ivanov I.O. Ognezashchitnye podvesnye potolki s vysokimi predelami ognestoykosti [Fireproof suspended ceilings with high fire resistance limits]. *Magazine of Civil Engineering*, 2018. No. 8 (84). Pp. 75–85. (rus). DOI: 10.18720/MCE.84.8. EDN: ZMSPTM.
13. Chou T-L., Tang C-H., Chuang Y-J., Lin C-Y. Study on Smoke Leakage Performance of Suspended Ceiling System. *Sustainability*, 2020. Vol. 12, Iss. 18. Article 7244. 13 p. DOI: 10.3390/su12187244.
14. Zhou X. Time-resolved fire heat release rate under a ceiling based on ceiling layer measurements. *Fire Safety Journal*, 2020. Vol. 111. 9 p. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102923.
15. Kalinin E.S. Vliyanie ispolneniya podvesnogo potolka na dinamiku rasprostraneniya opasnykh faktorov pozhara [Influence of the performance of a suspended ceiling on the dynamics of the spread of fire hazards]. *Proc. VIII Scientific-practical conf. «Roitman Readings», Moscow, March 5, 2020*. Moscow: SFA of EMERCOM of Russia, 2020. – Pp. 35–38
16. Enoki S., Shibayama Y., Saito M., Ito J., Nakamura Y., Ohata T. Research on Strength Design of Channel Clips for Suspended Ceilings. *Key Engineering Materials*, 2018. Vol. 774. Pp. 223–228. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.774.223.
17. Jiang H., Huang Y., He L., Wang Y., Wang H. Numerical modeling and experimental validation for suspended ceiling system with free boundary condition. *Journal of Building Engineering*, 2022. Vol. 61. 17 p. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105285.