

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.49>

УДК 614.841

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО МОНОЛИТНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ В СОСТАВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ФРАГМЕНТА КАРКАСНОГО ЗДАНИЯ

Кудряшов В.А., Жамойдик С.М., Кураченко И.Ю., Нгуен Т.К.

Цель. Разработать методики и провести силовые испытания при нагружении, натурные огневые испытания железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания, получить экспериментальные данные относительных деформаций и перемещений при силовых испытаниях, распределения температур в огневой камере, в сечениях конструкции, перемещений плиты в ходе огневого воздействия и оценить повреждения.

Методы. Силовые испытания железобетонного перекрытия с использованием инвентарных грузов, комплекса прогибомеров и измерителей деформаций; натурные огневые испытания железобетонного монолитного перекрытия под нагрузкой с использованием углеводородной пожарной нагрузки, комплекса термоэлектрических преобразователей и системы измерения перемещений.

Результаты. Разработана методика и проведены силовые испытания железобетонного монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания под нагрузкой 675 кг/м^2 . Прогиб перекрытия в пролете составил не более $1/1000$ пролета. Относительные деформации сжатия бетона в максимальных значениях не превышали $0,36 \%$, относительные деформации растяжения бетона в максимальных значениях – $0,89 \%$, что свидетельствует об упругопластической работе конструкции. Разработана методика и проведены натурные огневые испытания монолитного перекрытия в составе экспериментального фрагмента каркасного здания под нагрузкой 675 кг/м^2 . С использованием 2405 л отработанного моторного масла и $1,8 \text{ м}^3$ древесины создан тепловой режим пожара, близкий к стандартному. Температура на обогреваемой поверхности перекрытия достигала $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом на необогреваемой стороне температура была не выше $40 \text{ }^\circ\text{C}$, что привело к существенным деформациям перекрытия, суммарно между центром и консольными краями – около 300 мм , либо $1/30$ от геометрической длины плиты. В результате испытаний на 69 -й мин от начала объемного пожара произошло внезапное разрушение железобетонных центрифугированных колонн. После обрушения фрагмента в перекрытии зафиксировано два линейных пластических шарнира в пролете на расстоянии $1,5 \text{ м}$ от каждой опоры в месте обрыва дополнительной арматуры.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть применены для оценки огнестойкости железобетонных монолитных перекрытий, при разработке расчетных методик и в моделировании железобетонных монолитных конструкций при силовых воздействиях и пожаре, а также разработке методик натурных огневых испытаний железобетонных конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, предел огнестойкости, железобетонное монолитное перекрытие, эксперимент, каркасное здание, методика испытаний, силовые испытания, натурные огневые испытания, строительные конструкции, разрушение.

(Поступила в редакцию 28 января 2021 г.)

Введение

Обеспечение прочности и устойчивости строительных конструкций при любых видах воздействий является важной задачей при проектировании зданий. Одним из видов особой расчетной ситуации является пожар. Обеспечение несущей способности и устойчивости конструкций при пожаре характеризуется огнестойкостью (пределом огнестойкости). Пределы огнестойкости строительных конструкций могут быть определены расчетным методом, по результатам огневых испытаний либо их комбинацией. Расчетные методы широко применяются для строительных конструкций, огнестойкость которых изучена экспериментально и достоверно известны их схемы разрушения при пожаре, в том числе прочностные и теплофизические характеристики материалов в диапазоне температур пожара. В иных случаях проводят огневые испытания.

Огневые испытания, как правило, проводят на специальных огневых печах. Параметры испытуемых образцов при этом ограничены геометрическими размерами печей, что иногда затрудняет приложение нагрузок для создания в расчетных сечениях напряжений, соответствующих реальным условиям эксплуатации¹. Для железобетонных монолитных перекрытий, работающих как статически неопределимые системы, воссоздание напряжений, близких к реальным, возможно только при натуральных огневых испытаниях, когда полностью либо частично воспроизводятся рамный каркас здания и соответствующие нагрузки.

Данная статья является продолжением статьи [1], в которой подробно описаны проектирование и возведение, а также вопросы воссоздания реальных усилий и деформаций, возникающих в многократно статически неопределимых каркасах зданиях. В настоящей статье приведены методика и результаты силовых испытаний при нагружении, а также методика и результаты натуральных огневых испытаний экспериментального фрагмента каркасного здания.

Основная часть

Цель и задачи исследований. Цель исследований заключается в разработке и получении экспериментальных данных относительных деформаций и перемещений при силовых испытаниях, распределения температур в огневой камере, в сечениях конструкции, перемещений плиты в ходе огневого воздействия, оценке повреждений. Для достижения цели решены следующие задачи:

разработана методика и проведены силовые испытания экспериментального фрагмента нагружением;

разработана методика и проведены натурные огневые испытания в условиях совместного температурно-силового воздействия.

Как представлено в статье [1], для проведения испытаний был рассчитан, спроектирован и возведен фрагмент каркасного здания с железобетонным монолитным перекрытием размерами в плане 3,0×9,0 м, толщиной 200 мм, с пролетом между опорами 6,0 м, с консольными свесами 1,5 м.

В качестве поддерживающих опор применяли две центрифугированные колонны, изготовленные на ОАО «Светлогорский завод железобетонных изделий и конструкций» из бетона класса по прочности на сжатие C³²/40, наружным диаметром 560 мм с толщиной стенки 55 мм. Колонны были армированы пространственным каркасом из 7 рабочих стержней класса S500 диаметром 12 мм и поперечной спиральной проволоки В-1 диаметром 4 мм. Толщина защитного слоя бетона составляла 20 мм. Подробное описание колонн представлено в работе [2].

Огневая камера создавалась путем возведения по периметру фрагмента самонесущих стен до уровня перекрытия из газосиликатных блоков толщиной 200 мм. Для поддержания температурного режима при проведении огневых испытаний и удаления продуктов горения в середине торцевых стен на высоте 1000 мм от уровня фундамента устраивали по оконному проему размером 800×1250 мм; на расстоянии 1250 мм от торцевых стен в продольных стенах с двух сторон на высоте 1750 мм от уровня фундамента – проемы размером 500×500 мм; в середине одной из двух продольных стен на уровне фундамента – дверной проем размером 1000×2000 мм [1; 3]. Общий вид испытательного фрагмента каркасного здания представлен на рисунке 1. Стороны экспериментального фрагмента были условно обозначены как передний и задний фасад, левая и правая стороны со стороны переднего фасада, при этом дверной проем был выполнен со стороны заднего фасада.

Методика и результаты силовых испытаний. Методика силовых испытаний была тесно увязана с огневыми испытаниями и была нацелена на подробное изучение перемещений и относительных деформаций монолитной железобетонной плиты в ходе загрузки до уровня нагрузок, принятых для огневых испытаний. Указанные исследования обусловлены прежде всего тем, что при высоких температурах измерение деформаций железобетонных конструкций является сложно выполнимой задачей.

¹ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Взамен СТ СЭВ 1000-78, СТ СЭВ 5062-85; введ. 01.10.98. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 7 с.



а – передний фасад

б – задний фасад

Рисунок 1. – Общий вид испытательного фрагмента каркасного здания

В качестве основы для методики силовых испытаний была принята методика испытаний нагружением железобетонных конструкций заводского изготовления². Методика силовых испытаний включала:

разработку схемы измерения перемещений и относительных деформаций;

нагрузку фрагмента железобетонного монолитного перекрытия инвентарными грузами с фиксацией показаний на каждом этапе нагружения.

Ввиду ограниченного количества измерительного оборудования точки установки приборов были предусмотрены:

в середине пролета плиты – прогибомер 6-ПАО (ТУ 4273-095-59489947-2007), измерители деформаций ИЧ-10³ (по 2 в продольном и поперечном направлении в центре плиты снизу и сверху, а также 4 измерителя в середине продольной торцевой поверхности);

в приопорной зоне – по одному ИЧ-10 сверху и снизу в продольном направлении на расстоянии 100 мм от колонны;

на колоннах – 6 измерителей ИЧ-10 на уровне 2/3 высоты колонны (4 измерителя на одной колонне соответственно продольному и поперечному направлению плиты, 2 измерителя на другой колонне в продольном направлении перекрытия).

Индикаторы часового типа ИЧ-10 устанавливали на консольных кронштейнах с упором в неподвижный штифт, закрепленный также на кронштейне таким образом, чтобы штифт располагался параллельно плоскости конструкции на высоте кронштейна. Расстояние между кронштейнами по оси штифта применяли в качестве базы измерения. Схема установки измерителей И1, И2, И10 снизу перекрытия в продольном и поперечном направлениях, а также И3–И5 сверху перекрытия представлена на рисунке 2.

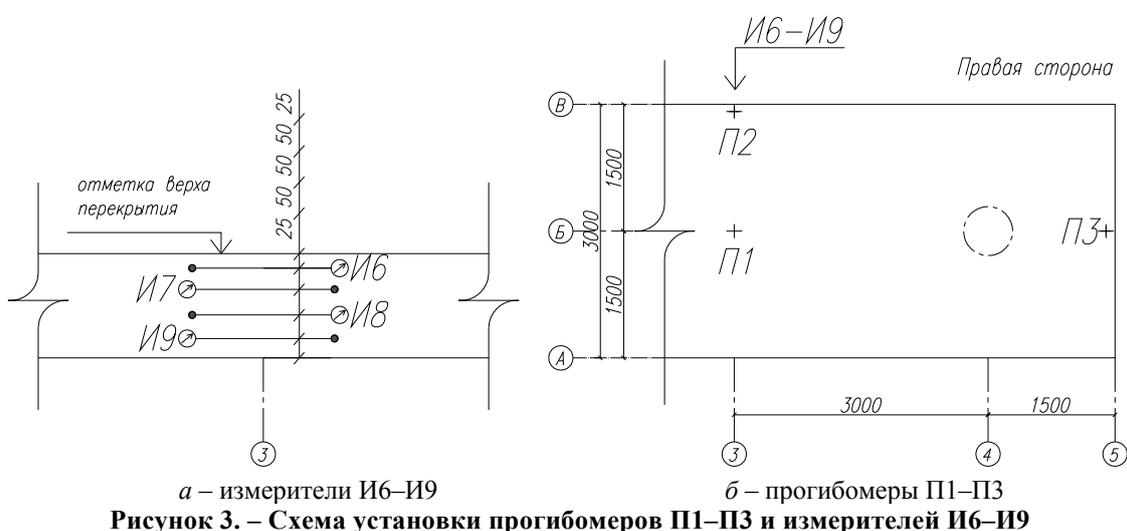
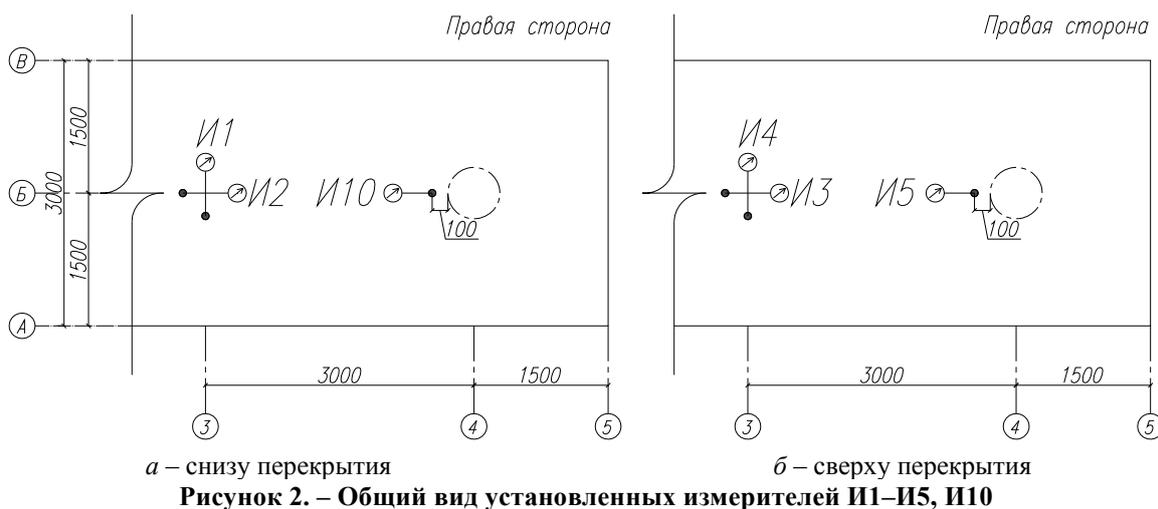
Прогибомеры 6-ПАО крепили с помощью струбцин к неподвижным опорам, размещаемым снизу перекрытия в местах контролируемых прогибов, а на нижней поверхности перекрытия устанавливали штифты перпендикулярно ведущему блоку прогибомеров. Измеряемое перемещение с помощью струны передавалось ведущему блоку прогибомера. Натяжение струны обеспечивали подвешиванием грузов массой 1 кг. Схема установки прогибомеров П1–П3, а также измерителей И6–9 в середине продольной торцевой поверхности перекрытия представлена на рисунке 3.

В качестве нагрузки на экспериментальный фрагмент использовали 50 блоков типа ФБС 9.4.6⁴ номинальной массой 480 кг каждый. Для распределения нагрузки по площади перекрытия под грузы использовали деревянные бруски 50×50×400 мм.

² Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости: ГОСТ 8829-2018. – Взамен ГОСТ 8829-94; введ. 29.11.18. – Минск: БелГИСС, 2019. – 16 с.

³ Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия: ГОСТ 577-68. – Взамен ГОСТ 577-60; введ. 01.07.68. – Минск: БелГИСС, 2013. – 12 с.

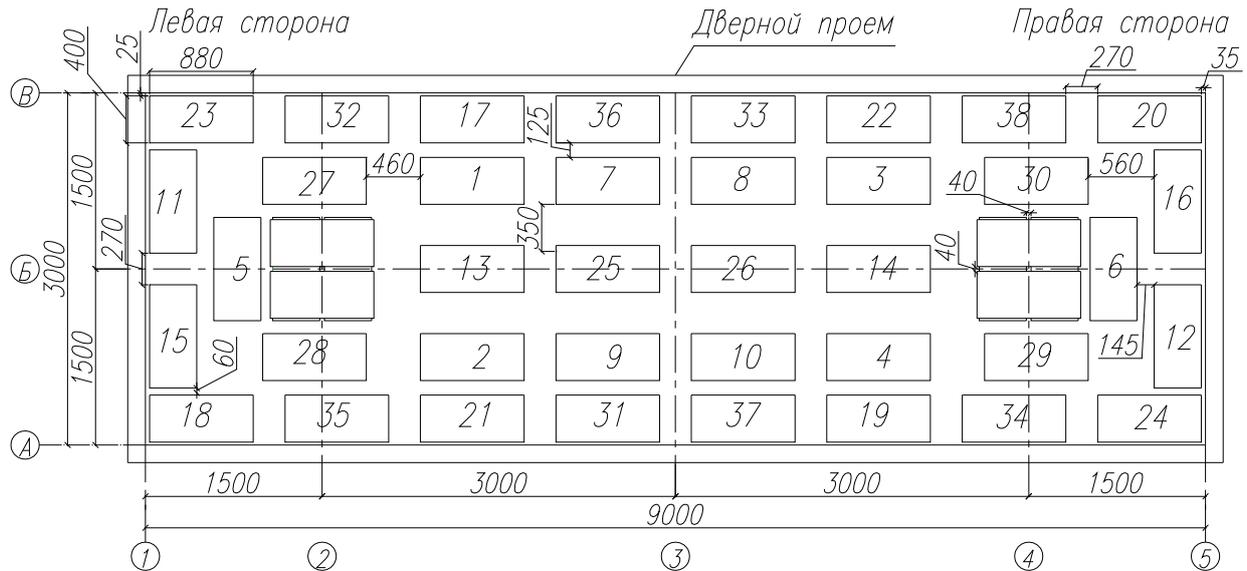
⁴ Блоки бетонные для стен подвалов. Технические условия: ГОСТ 13579-2018. – Взамен ГОСТ 13579-78; введ. 30.05.18. – Минск: БелГИСС, 2018. – 15 с.



Нагружение проводили поэтапно ступенями (долями по 4, 6 блоков) в направлении от опор (консолей) к середине, чтобы усилия в предполагаемом участке разрушения плиты прирастали равными долями. После приложения каждой доли нагрузки фрагмент выдерживали в течение 10 мин до следующего этапа нагружения. В течение указанного времени осуществляли съем показаний с прогибомеров и измерителей деформаций. После выдержки под нагрузкой проводили осмотр поверхности плиты и колонн на наличие трещин. После окончания нагружения фрагмент выдерживали 30 мин, после чего вновь фиксировали показания приборов.

С целью соблюдения требований безопасности и обеспечения неизменного положения фундаментных блоков при возможных деформациях плиты применяли канатный трос диаметром 6,0 мм, которым блоки скрепляли между собой. Плотность распределения нагрузки на перекрытие в среднем составляла 675 кг/м^2 , сосредоточенная нагрузка над колоннами – 2880 кг (что соответствует расчетным значениям нагрузки, принятым при моделировании [1]). Схема нагружения фрагмента показана на рисунке 4.

В ходе проведения силовых испытаний смещение арматуры относительно бетона на торцах плиты, видимые трещины, а также раздробление бетона сжатой зоны зафиксированы не были. Значения относительных деформаций в сечениях плиты, полученные по показаниям измерителей И1–И10 на этапах нагружения, представлены на рисунках 5 и 6.



Цифрами условно обозначен порядок установки грузов на перекрытие: этап 1 – нагружение колонн; этап 2 – грузы 1–6; этап 3 – грузы 7–10; этап 4 – грузы 11–16; этап 5 – грузы 17–20; этап 6 – грузы 21–24; этап 7 – грузы 25–30; этап 8 – грузы 31–34; этап 9 – грузы 35–38.

Рисунок 4. – Схема нагружения железобетонного монолитного перекрытия экспериментального фрагмента здания

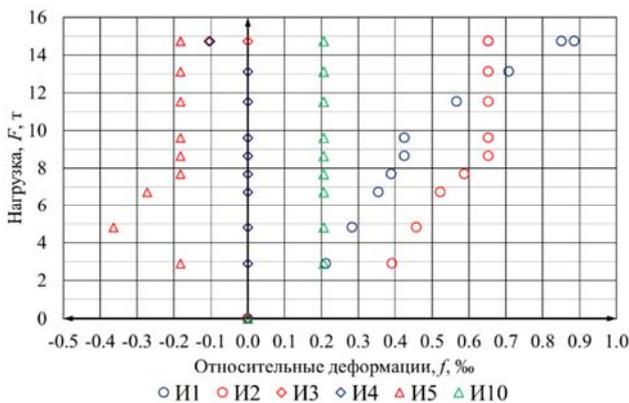


Рисунок 5. – Относительные деформации бетона верхней и нижней плоскости

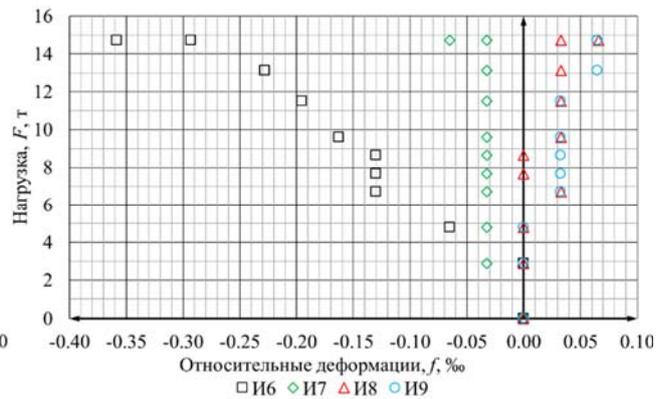


Рисунок 6. – Относительные деформации бетона в середине пролета на торце плиты

Относительные деформации сжатия бетона в максимальных значениях не превышали 0,36 % (в середине пролета на торце плиты, датчик И6), что свидетельствует об упругой работе бетона (на уровне 18...20 % от деформаций ε_{cl} согласно СП 5.03.01⁵). Относительные деформации растяжения бетона в максимальных значениях не превышали 0,89 % (в середине пролета в поперечном направлении снизу плиты, датчик И1), что свидетельствует о работе бетона с трещинами (деформации трещинообразования ε_{cr} согласно СП 5.03.01 составляют 0,053...0,067 %) и упругой работе арматуры (на уровне 40 % от деформаций ε_{sy} согласно СП 5.03.01).

Данные измерений перемещений отдельных точек перекрытия на каждом этапе нагружения представлены на рисунке 7.

После нагружения плиты максимальные значения перемещений составили: в середине пролета в центре плиты – 3,6 мм; в середине пролета у продольной торцевой грани – 3,7 мм; в свободной консоли – 2,5 мм. Полученные результаты перемещений и относительных деформаций не учитывают собственный вес плиты, но в целом свидетельствуют об упругопластической работе железобетона для примененных нагрузок.

⁵ Бетонные и железобетонные конструкции: СП 5.03.01-2020. – Взамен СНБ 5.03.01-02, СНИП 2.03.01-84; введ. 16.11.20. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 245 с.

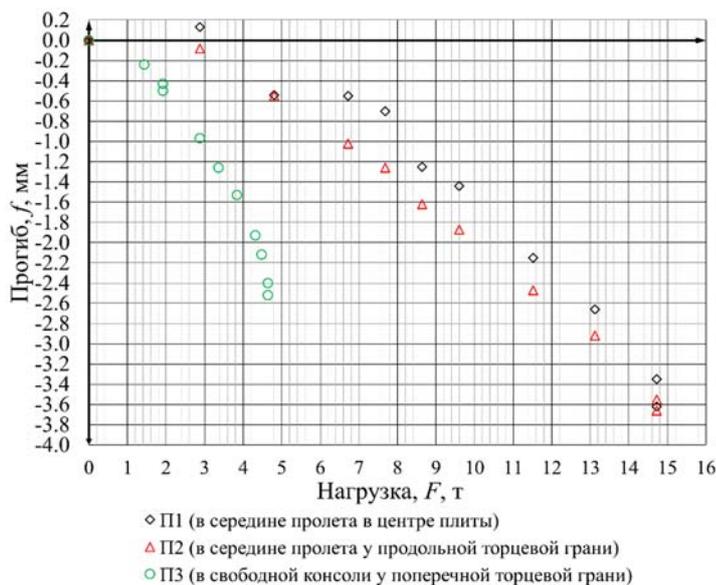


Рисунок 7. – Экспериментальные значения перемещений отдельных точек перекрытия в ходе силовых испытаний

нове опыта аналогичных исследований на территории Республики Беларусь [4–8]. Методика огневых испытаний предусматривала:

разработку схемы размещения термоэлектрических преобразователей (далее – ТП) в объеме камеры и в сечениях железобетонных конструкций;

расчет необходимого количества пожарной нагрузки для обеспечения огневого режима, соответствующего стандартному температурному режиму пожара (в настоящей статье не представлен, см. работу [3]);

разработку схемы измерения перемещений отдельных точек железобетонного монолитного перекрытия;

разработку схемы подключения и огнезащиты измерительных приборов.

Исследование поведения экспериментальной конструкции при пожаре требует оценки температурно-временных зависимостей у обогреваемой и необогреваемой граней плиты, а также на рабочей арматуре, для качественной формулировки граничных условий теплообмена. Схема расстановки ТП в объеме огневой камеры предусматривала измерение температуры внутри фрагмента в 27 точках, по 9 ТП на отметках 550 мм, 1375 мм и 2200 мм от уровня фундамента. Более подробно методика измерений приведена в статье [3].

Для измерения температуры на рабочей арматуре (нижней и верхней) как в середине пролета, так и в приопорных зонах со стороны пролета и консольных свесов вязальной проволокой к арматурным изделиям крепили ТП типа ТХА(К)-1199/51 2/500/3/3.5 (-40...+1000 °С) и КТНН 02.01-050-к1-И-Т740-3-100/11000 (-40...+800 °С) перед бетонированием перекрытия [1]. ТП крепили параллельно оси арматурных изделий. С целью оценки температуры обогреваемой и необогреваемой поверхности ТП крепили таким образом, чтобы горячий спай находился параллельно плоскости плиты. Схема расстановки ТП на арматуре, а также на обогреваемой и необогреваемой поверхности показана на рисунке 8.

Теоретическое перемещение центра плиты по данным моделирования [1] в середине пролета от собственного веса конструкции с коэффициентом надежности по нагрузке, равным 1,35, составило 4,75 мм, или суммарно с экспериментальными перемещениями от нагрузки – 8,35 мм. Таким образом, полученные значения перемещений позволяют предположить о близком соответствии экспериментальной конструкции перекрытия расчетной модели, прогиб которой составил 9,64 мм (разница составила 13,4 %) [1].

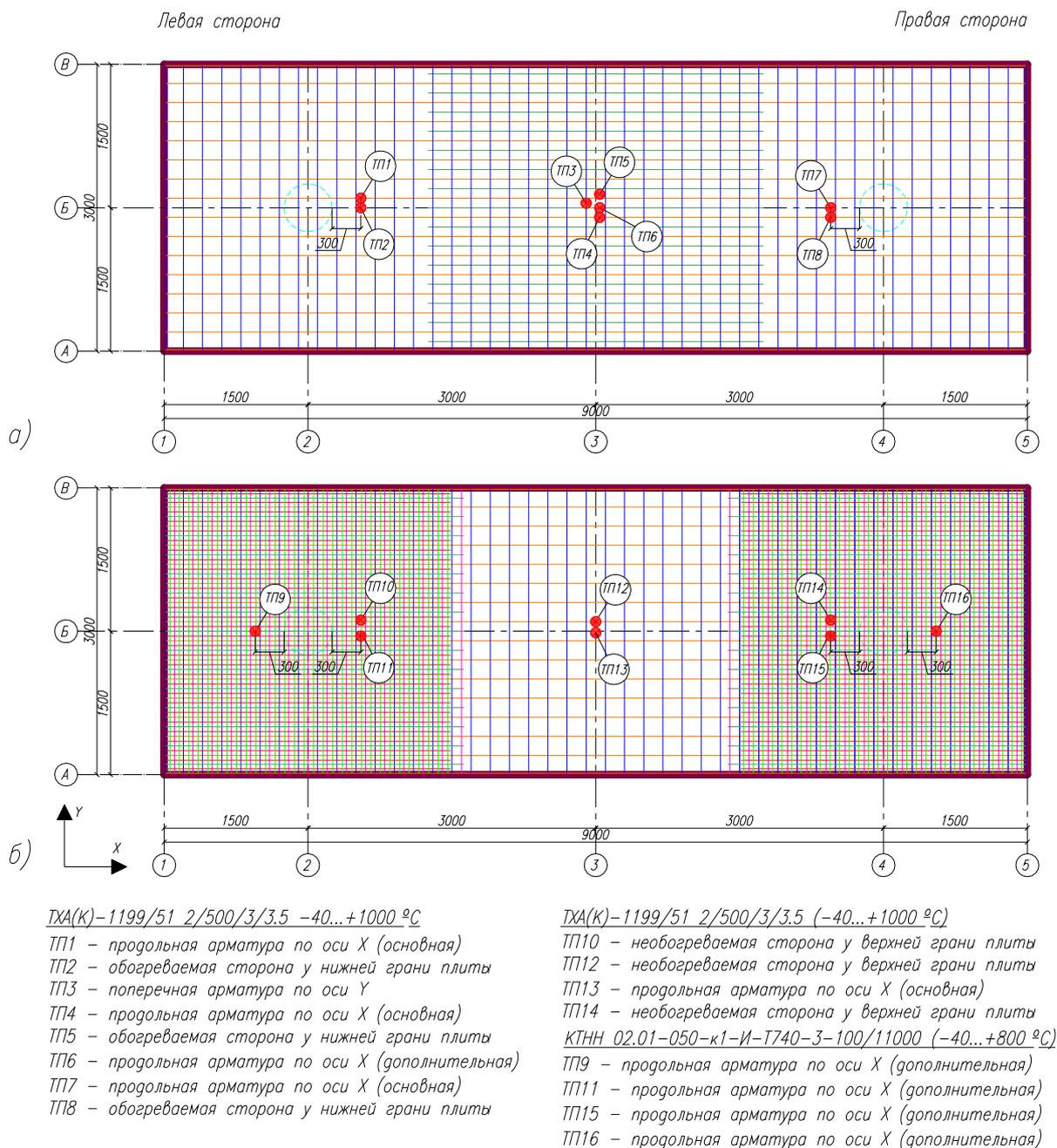
Методика огневых испытаний. Методика проведения огневых испытаний была разработана на основании стандартизованных методик^{6, 7}, опыта Российской Федерации в этой области^{8, 9}, а также на ос-

⁶ Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94 – Взамен СТ СЭВ 1000-78; введ. 01.10.98. – Минск: Минстройархитектуры, 1998. – 12 с.

⁷ См. сноску 1.

⁸ Здания и фрагменты зданий. Метод натуральных огневых испытаний. Общие требования [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 53309-2009. – Введ. 01.05.09. – М.: Стандартинформ, 2009. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200071873>. – Дата доступа: 13.11.2019.

⁹ Испытания на огнестойкость. Руководящие указания по планированию и проведению крупномасштабных испытаний и моделированию без использования печи [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 55994-2014/ISO/TR 15658:2009. – Введ. 01.01.15. – М.: Стандартинформ, 2014. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200110470>. – Дата доступа: 13.11.2019.



а) – арматура у нижней грани; б) – арматура у верхней грани

Рисунок 8. – Схема размещения термоэлектрических преобразователей для железобетонного монолитного перекрытия экспериментального фрагмента

В процессе огневых испытаний преобразование электрических сигналов от ТП осуществляли с применением универсальных измерителей-регуляторов ТРМ138-Р (ТУ 4217-015-46526536-2008) с передачей данных на персональные компьютеры посредством преобразователя интерфейсов АС4-М (ТУ-4218-003-46526536-2006). Также для оценки полной картины распределения температур в реальном времени бесконтактным методом применяли тепловизионную камеру FLIR T420bx.

Схема измерения перемещений отдельных точек перекрытия была обусловлена отсутствием возможности использовать измерители деформаций в условиях высоких температур. Поэтому предпочтение было отдано способам удаленного измерения перемещений посредством тахеометра и реперных точек над поверхностью плиты, а также (для дублирования) с использованием прогибомеров 6-ПАО с переносом данных перемещений за пределы фрагмента посредством стальной проволоки, пропущенной через систему блоков в импровизированной ферме (опертой шарнирно на ряд нагруженных блоков над колоннами).

В качестве реперных точек посредством анкеров жестко крепили к плите консольные стальные стойки квадратного сечения $25 \times 25 \times 1,5$ мм с шарнирно прикрепленными на высоте 1,0 м металлическими линейками Л1–Л4 с пределом измерений 500 мм. Для обеспечения вертикального положения линеек Л1–Л4 в ходе огневых испытаний снизу подвешивали грузы. Контроль величины перемещений контрольных точек на линейках при огневых испытаниях достигался с применением электронного тахеометра South NTS-362R на расстоянии 16,0 м от переднего фасада на уровне расположения линеек Л1–Л4.

Как отмечалось выше, для альтернативного способа измерения прогибов плиты был принят способ, основанный на применении прогибомеров 6-ПАО. Для этого была изготовлена треугольная ферма из алюминиевых профилей прямоугольного сечения $30 \times 15 \times 1,5$ мм, пролетом 6 м и высотой 1,11 м. Для исключения смещения фермы под воздействием размещенной на колоннах нагрузки одну из стоек с помощью металлических пластин и уголков крепили к этим грузам, а другую оставляли свободно опертой.

Общий вид стоек с прикрепленными линейками, а также изготовленная и размещенная на грузах ферма показаны на рисунке 9.



а – стойки с линейками



б – ферма, установленная на испытуемом фрагменте

Рисунок 9. – Приспособления для измерения перемещений в ходе огневых испытаний

Принцип измерения с помощью прогибомеров основывался на определении величины вертикального перемещения точки плиты во время проведения огневых испытаний. Измеряемое перемещение передавалось ведущему блоку прогибомера П1 с помощью натянутой струны, прикрепленной к средней трети плиты в середине пролета через анкер с ушком в форме кольца и перекинутой через блок-ролики, установленные в середине пролета верхнего пояса и в районе одной из опор фермы. Натяжение струны осуществлялось грузом, подвешенным к ее свободному концу. В качестве струны применяли трос для растяжки DIN3055 диаметром 1,5 мм с рабочей нагрузкой 0,25 кН, изготовленный из оцинкованной стали методом обвива высокопрочной проволоки вокруг сердечника.

Для измерения горизонтальных и вертикальных перемещений плиты на безопасных расстояниях устанавливали неподвижные опоры, к которым крепили прогибомеры П2 и П3. В правом торце плиты со стороны переднего фасада в углу у верхней грани устанавливали анкер с ушком в форме кольца. К анкеру крепили два троса DIN3055, которые под углом 90° натягивали к ведущим блокам прогибомеров П2 и П3. Схема установки тахеометра, прогибомеров, металлической фермы и стоек с линейками, предназначенных для измерения прогибов и горизонтальных перемещений плиты при проведении натурных огневых испытаний, показана на рисунке 10 (условно показана только статическая нагрузка на колонны).

Для предотвращения обрушения железобетонной плиты, а также возможности ее изучения после проведения огневых испытаний и после снятия статической нагрузки, с учетом ожидаемого прогиба в объеме фрагмента здания, были возведены 4 страховочные опоры из одинарного керамического кирпича размером $380 \times 380 \times 2400$ мм.

С целью защиты кабелей ТП в местах возможного температурного воздействия устанавливали металлический экран, а кабели в этих местах обматывали минеральной ватой.

В процессе проведения огневых испытаний непрерывно вели фото- и видеосъемку. Для измерения длительности испытаний применяли электронный секундомер «Интеграл С-01».

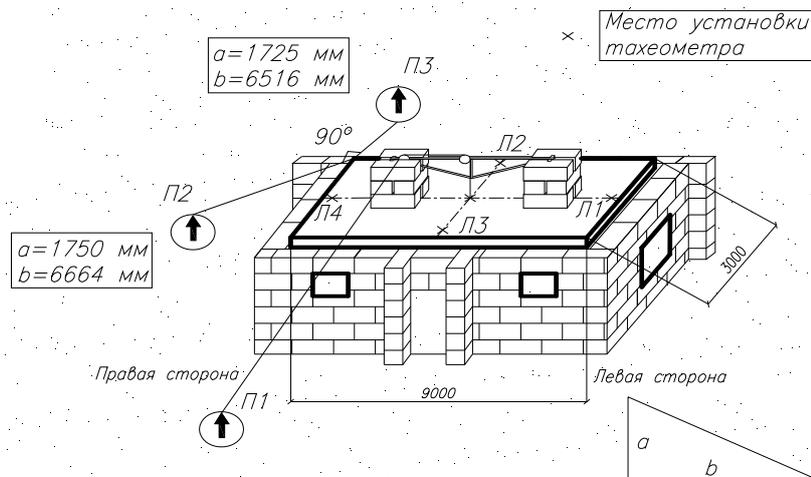


Рисунок 10. – Схема установки тахеометра, прогибомеров, металлической фермы и стоек с линейками на плите перед огневыми испытаниями

Результаты огневых испытаний. Огневые испытания проводили 04.01.2019. Температура окружающей среды перед проведением испытаний составляла 2°C , влажность воздуха – 87%. Согласно гидрометеорологическим данным скорость ветра могла достигать 7 м/с (фрагмент был окружен лесопосадками на расстоянии 50...100 м), направление ветра было изменчивым, осадки отсутствовали [3].

Как было указано выше, горючая нагрузка представляла собой 2,1 т отработанного масла и $1,8\text{ м}^3$ древесины влажностью 10,2%. Розжиг горючей нагрузки осуществляли одновременно тремя операторами с использованием факела с ветошью, смоченной ЛВЖ. От момента розжига до перехода в объемную стадию прошло 10 мин. В дальнейшем в качестве точки отсчета огневого воздействия принимали именно переход пожара в объемную стадию, которая характеризовалась температурой вспышки паров отработанного масла, равной 140°C . Результаты измерения температуры внутри огневой камеры в сопоставлении со стандартным температурным режимом пожара представлены на рисунке 11.

В целом изменение среднеобъемной температуры внутри экспериментального фрагмента было близко к стандартному огневому режиму, при этом до 10 мин пожара скорость нарастания температуры была ниже ввиду естественного режима сгорания пожарной нагрузки. Вплоть до 30-й мин среднеобъемная температура пожара была в допустимых пределах, однако с 30 по 45 мин рост температуры пожара начал ускоряться и выходить за пределы допустимых отклонений стандартного температурного режима, что вынудило ввести однократное пенное тушение вблизи дверного проема, что в течение 5 последующих минут позволило снизить температуру ближе к верхнему допустимому пределу для стандартной температурной кривой вплоть до 65-й мин огневой испытания. Однако вынужденное тушение привело к потере устойчивости страховочных опор из кирпича ввиду их резкого неравномерного охлаждения. В последние 3 мин эксперимента среднеобъемная температура была несколько выше допустимых отклонений. Результаты измерения температуры на обогреваемой, необогреваемой поверхности и рабочей арматуре железобетонного монолитного перекрытия представлены на рисунках 12 и 13.

Из рисунка 12 следует, что обогреваемая сторона перекрытия нагревалась близко к среднеобъемной температуре и составляла 0,7...0,9 долей от нее. Более плавный нагрев зафиксирован на нижней продольной арматуре, при этом условный критерий 500°C был превышен в среднем на 25 мин. Следует отметить, что нагрев арматуры сопровождался процессом хрупкого взрывообразного разрушения защитного слоя бетона, который прекратился лишь к 22-й мин объемного пожара. На необогреваемой стороне, в том числе на верхней арматуре, температура не превышала 40°C в ходе всей длительности огневого воздействия.

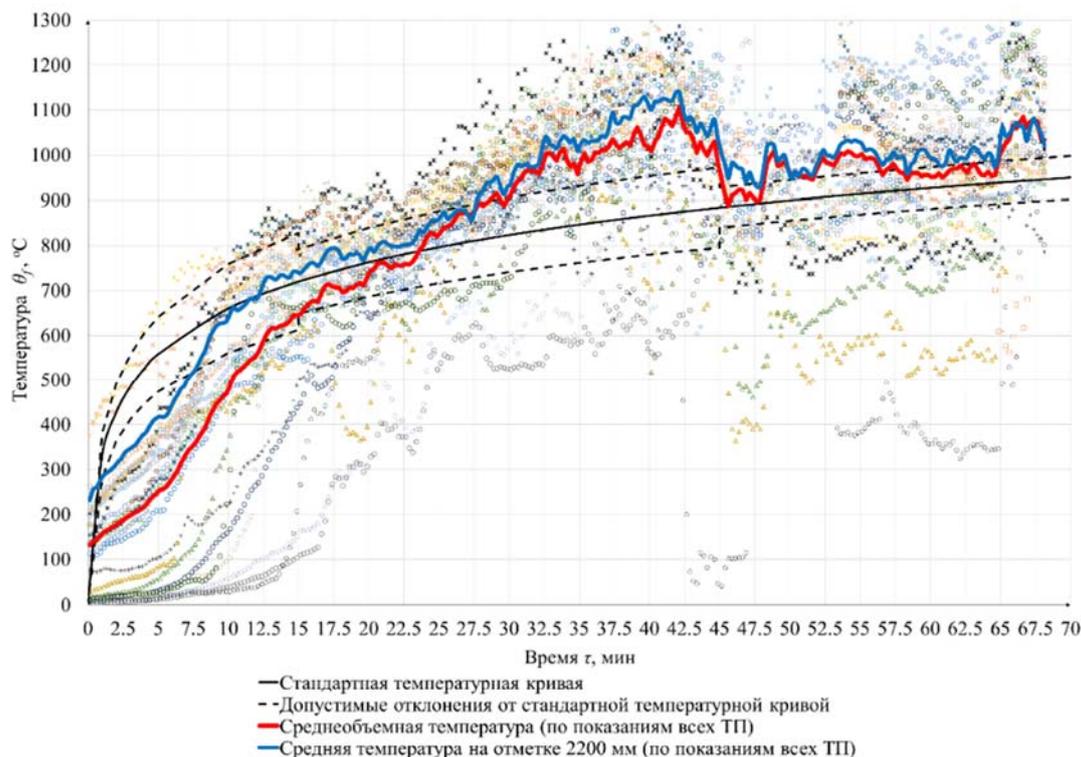


Рисунок 11. – Изменение температуры газовой среды внутри экспериментального фрагмента в ходе огневых испытаний

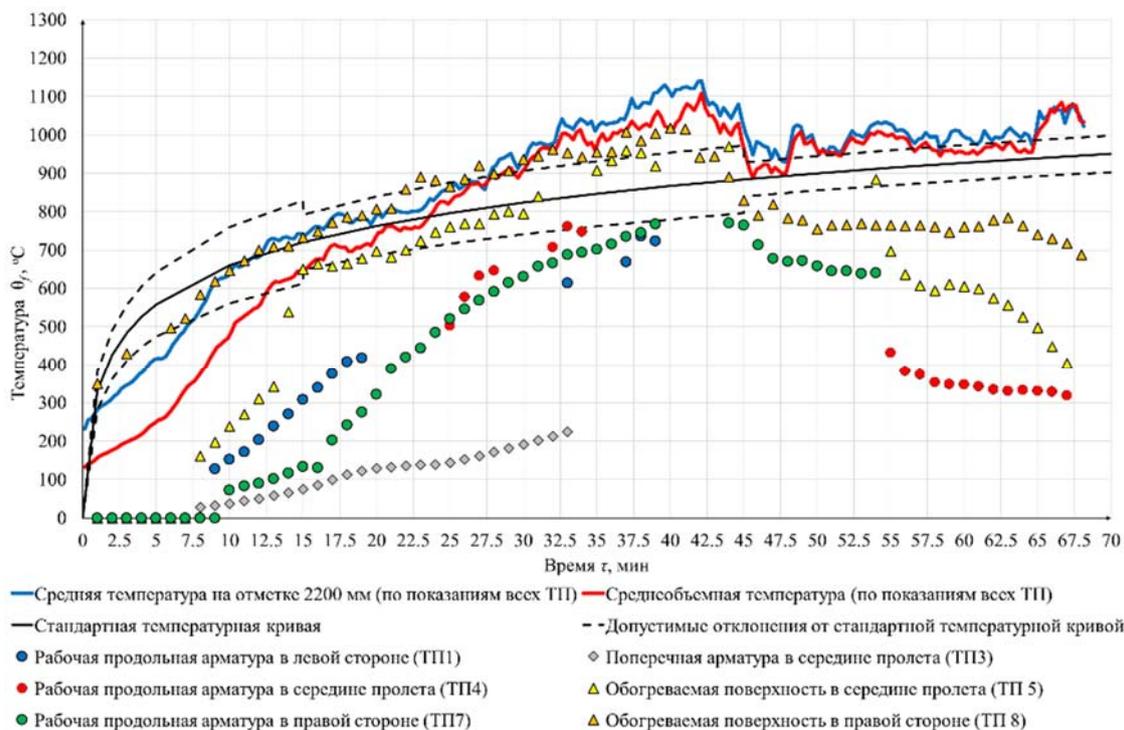


Рисунок 12. – Изменение температуры нижнего армирования и обогреваемой поверхности железобетонного перекрытия в сравнении со среднеобъемными температурами внутри экспериментального фрагмента

В ходе огневого воздействия для части ТП были зафиксированы электромагнитные помехи, часть данных была отнесена к грубым ошибкам измерения. Кроме того, часть ТП (ТП2 (обогреваемая поверхность с левой стороны), ТП6 (нижняя продольная арматура) и ТП10 (необогреваемая поверхность с левой стороны)) были признаны неработоспособными ввиду технических причин.

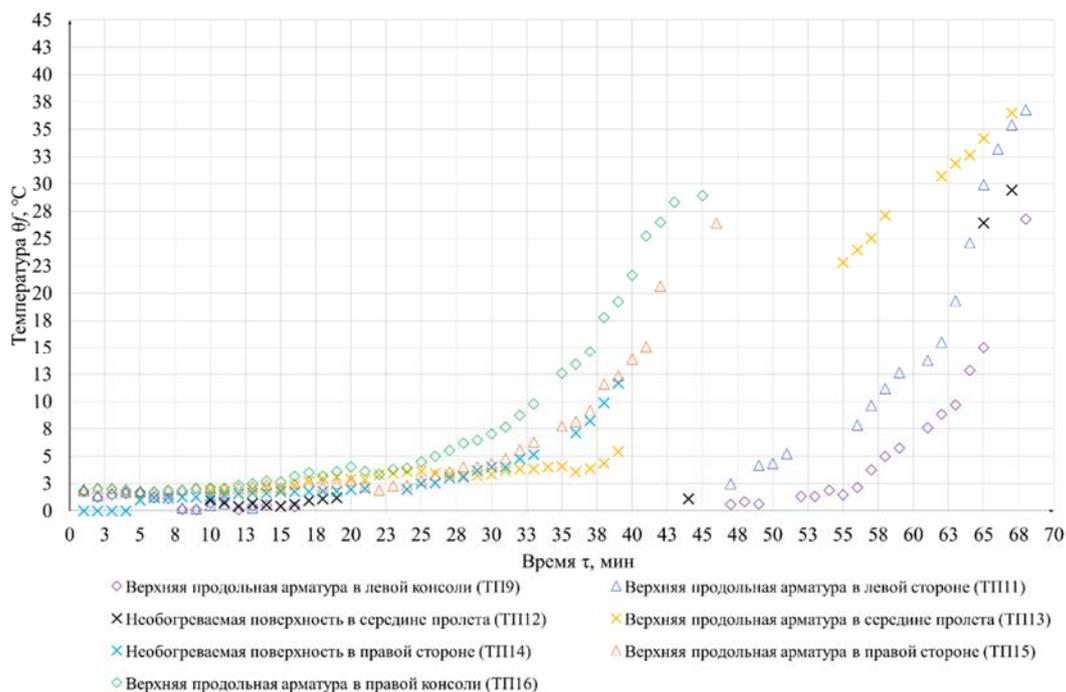


Рисунок 13. – Изменение температуры верхнего армирования и необогреваемой поверхности железобетонного перекрытия экспериментального фрагмента

Как отмечалось выше, в целях объективной оценки полученных от ТП данных применяли тепловизионную камеру FLIR T420bx. Картина распределения температур в отдельные моменты испытаний представлена на рисунках 14 и 15.

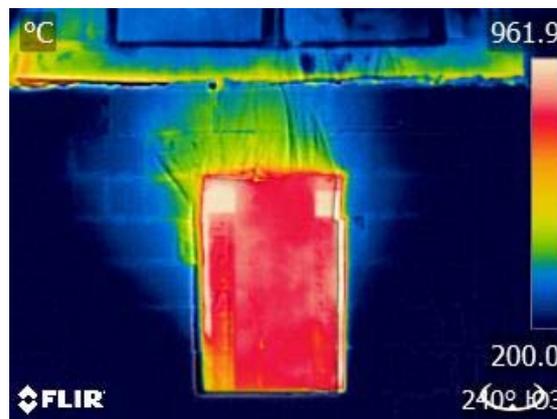


Рисунок 14. – Термограмма для 44-й мин огневого испытания (вид с левого фасада)

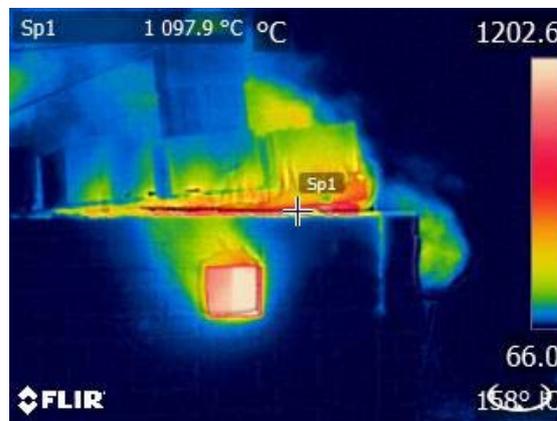


Рисунок 15. – Термограмма для 64-й мин огневого испытания (вид правой части переднего фасада)

Изменение вертикальных перемещений плиты, как было отмечено выше, осуществлялось оптическим и дистанционным методом посредством прогибомеров 6-ПАО. При этом ввиду плотного задымления результаты перемещений оптическим методом наиболее достоверно получены только для середины пролета железобетонной плиты и составили -90 мм к моменту разрушения колонн (рис. 16). При этом консольные участки железобетонного перекрытия перемещались в положительном направлении (вверх) с более высокой скоростью и составили +190 мм к 59-й мин пожара.

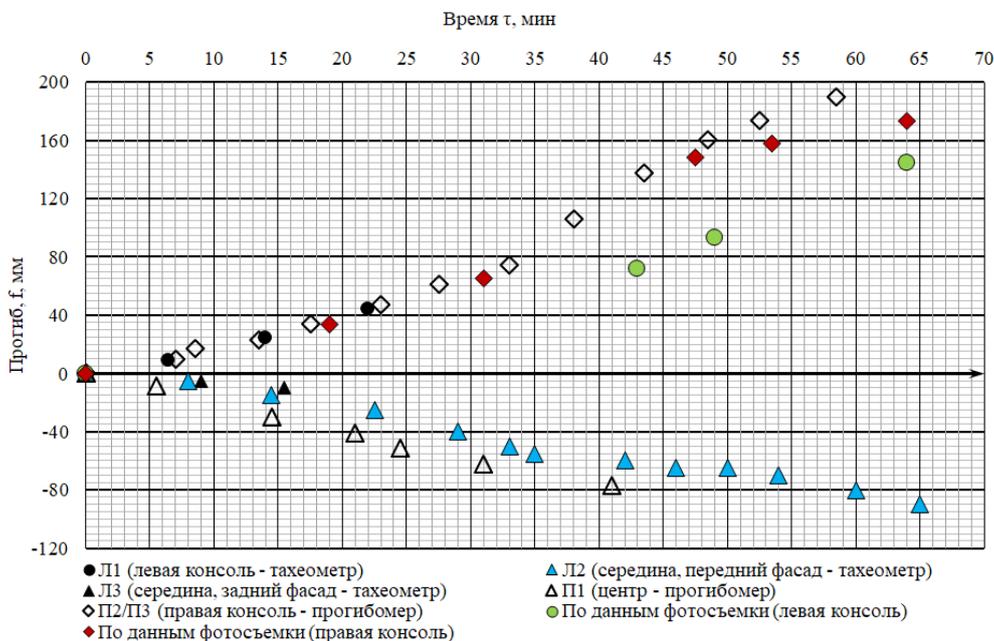


Рисунок 16. – Экспериментальные значения перемещений плиты при огневых испытаниях

В целом плоскость перекрытия была изогнута наподобие свободно опертой плиты по 4 углам, при этом отмечается более сильный поворот правой части консоли по сравнению с левой (рис. 17).



Рисунок 17. – Общий вид испытательного фрагмента перед разрушением колонн

На 69-й мин огневого воздействия от начала объемного пожара произошло внезапное разрушение центрифугированных колонн и разобщение арматуры колонн с бетоном, что привело к падению перекрытия практически на уровень +400 мм от уровня земли (высота падения составила 2,35 м). В ходе падения были разрушены ограждающие конструкции. Момент разрушения колонн и падения плиты показан на рисунке 18. После обрушения конструкций произвели пенное пожаротушение и в течение последующих 5 мин полностью остановили процессы горения.

Общий вид разрушенного фрагмента здания представлен на рисунке 19.

После исследования остывшего монолитного перекрытия было обнаружено 2 линейных пластических шарнира внутри пролета, каждый на расстоянии 1,5 м от опоры (по линии обрыва дополнительного армирования) (рис. 20). Момент образования пластических шарниров достоверно не известен и является предметом дальнейших исследований.



Рисунок 18. – Момент разрушения колонн и падения перекрытия



Рисунок 19. – Общий вид разрушенного фрагмента здания



a – с левой стороны



б – с левой стороны

Рисунок 20. – Линейные пластические шарниры железобетонного монолитного перекрытия

По результатам изучения повреждений плиты были зафиксированы значительные повреждения целостности железобетонного перекрытия в виде сколов бетона на глубину, превышающую толщину защитного слоя бетона, оголение и выход из плоскости рабочей арматуры, вызванные процессами хрупкого взрывообразного разрушения. При этом отмечено значительное оголение рабочей арматуры между пластическими шарнирами внутри пролета, в том числе оголение приопорного поперечного армирования [1] (рис. 21).



а – рабочая арматура
между пластическими шарнирами



б – арматурные изделия,
установленные на приопорных участках

Рисунок 21. – Вид нижней поверхности перекрытия после остывания

В местах консольных вылетов образовались локальные сколы бетона на глубину 10–15 мм площадью 1,5–2,5 м². Цвет на обогреваемой поверхности ввиду высокотемпературного воздействия изменился на темно-желтый. При этом сажа и копоть не наблюдались.

Предел огнестойкости экспериментального фрагмента, включающего железобетонное монолитное перекрытие, опертное на две железобетонные центрифугированные колонны, с распределенной нагрузкой 675 кг/м² и сосредоточенной нагрузкой над колоннами 2880 кг с учетом пересчета эквивалентной мощности стандартного пожара [1] составил REI 69 (либо REI 60 для стандартного ряда).

Заключение

1. Для спроектированного и возведенного фрагмента каркасного здания разработаны методики и проведены комплексные силовые и огневые испытания, позволившие установить деформированное состояние железобетонного монолитного перекрытия под нормативной нагрузкой, в том числе в условиях высокотемпературного огневого воздействия, близкого к стандартному огневому режиму.

2. Методика силовых испытаний предусматривала уточнение деформированного состояния монолитного железобетонного перекрытия толщиной 200 мм под нагрузкой 675 кг/м², соответствующей нормативному значению постоянных и временных длительно действующих нагрузок. Деформированное состояние определяли посредством 3 прогибόμεров 6-ПАО, установленных в середине пролета и на краю консольного вылета перекрытия, а также посредством измерителей деформаций часовых ИЧ-10, установленных в двух направлениях (продольном и поперечном) в нижней и верхней части пролетной и опорной части плиты, а также сбоку плиты в середине пролета.

3. Силовые испытания показали, что прогиб перекрытия в пролете составил не более 1/1000 пролета. Относительные деформации сжатия бетона в максимальных значениях не превышали 0,36 ‰ (в середине пролета на торце плиты, датчик И6), что свидетельствует об упругой работе бетона (на уровне 18...20 % от деформаций ϵ_{cl} согласно СП 5.03.01). Относительные деформации растяжения бетона в максимальных значениях не превышали 0,89 ‰ (в середине пролета в поперечном направлении снизу плиты, датчик И1), что свидетельствует о работе бетона с трещинами (деформации трещинообразования ϵ_{cr} согласно СП 5.03.01 составляют 0,053...0,067 ‰) и упругой работе арматуры (на уровне 40 % от деформаций ϵ_{sy} согласно СП 5.03.01). Полученные результаты перемещений и относительных деформаций не учитывают собственный вес плиты, но в целом свидетельствуют об упруго-пластической работе железобетона для примененных нагрузок.

4. Методика натуральных огневых испытаний предполагала проведение комплекса теплофизических измерений посредством ТП и тепловизионной камеры FLIR T420bx, а также измерений перемещений отдельных точек перекрытия преимущественно в вертикальном направлении.

5. В процессе натуральных огневых испытаний в ходе сжигания естественным образом пожарной нагрузки в виде отработанного моторного масла объемом 2405 л (2,1 т) и древесины объемом 1,8 м³ был получен огневой режим, в целом соответствующий стандартному температурному режиму. Температура на обогреваемой поверхности перекрытия достигала 1000 °С, при этом на необогреваемой стороне температура была не выше 40 °С, что привело к существенным деформациям перекрытия, суммарно между центром и консольными краями – около 300 мм, либо 1/30 от геометрической длины плиты.

6. Разрушение фрагмента произошло на 69-й мин от начала объемного пожара с внезапным разрушением центрифугированных колонн и падением железобетонного монолитного перекрытия до уровня +400 мм (высота монолитных шпонок [2]). После исследования остывшего монолитного перекрытия было обнаружено 2 линейных пластических шарнира внутри пролета, каждый на расстоянии 1,5 м от опоры (по линии обрыва дополнительного армирования). Момент образования пластических шарниров достоверно не известен и является предметом дальнейших исследований. В ходе изучения повреждений плиты были зафиксированы значительные повреждения защитного слоя бетона, вызванные процессами хрупкого взрывообразного разрушения.

Авторы выражают огромную признательность за помощь в организации и проведении моделирования, расчетов, конструирования и испытаний И.И. Полевода, Д.С. Неханю, Д.И. Навою, О. А. Трусу, М.М. Журову, Н.М. Олесиюку, Л.А. Крееру, Д.С. Игнатовичу, А.С. Дробышу, А.Е. Лупандину, А.М. Борейко, А.Н. Челаку, руководителю испытательно-исследовательского полигона учреждения «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» Ю.П. Ивлеву за предоставленные термоэлектрические преобразователи и тепловизионную камеру, специалистам РУП «БелНИИС» Д.А. Сокольчику и Н.Г. Бурсову за предоставленное оборудование для проведения силовых испытаний и Е.В. Бобруку за предоставленный тахеометр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов, В.А. Конструирование железобетонного монолитного перекрытия в составе фрагмента каркасного здания для исследований огнестойкости в рамках натуральных огневых испытаний / В.А. Кудряшов [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 5, № 1. – С. 33–48. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.5-1.33.
2. 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.
3. Нехань, Д.С. Исследования температуры газовой среды при проведении натуральных огневых испытаний строительных конструкций / Д.С. Нехань [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 130–141. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
4. Жовна, В.В. Огнестойкость железобетонных каркасов зданий с плоскими сборно-монолитными перекрытиями, образованными многопустотными плитами / В.В. Жовна [и др.] // Строительная наука и техника. – 2006. – № 4(7). – С. 42–51.
5. Жовна, В.В. Экспериментальные испытания железобетонных сборно-монолитных плоских перекрытий, образованных многопустотными плитами для определения фактических пределов огнестойкости конструкций / В.В. Жовна [и др.] // Строительная наука и техника. – 2007. – № 4(13). – С. 43–50.
6. Кудряшов, В.А. Оценка огнестойкости сборно-монолитного перекрытия со сборными многопустотными плитами / В.А. Кудряшов // Строительная наука и техника. – 2008. – № 4(19). – С. 37–42.
7. 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.
8. Кудряшов, В.А. Огневые испытания натурального фрагмента стального каркаса здания с конструктивной огнезащитой и ограждением из ячеистых стеновых блоков / В.А. Кудряшов [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2016. – № 1(39). – С. 113–131.

**Результаты натурных огневых испытаний железобетонного монолитного перекрытия
в составе экспериментального фрагмента каркасного здания**
**Results of full-scale fire tests of the monolithic reinforced concrete slab
as part of a fragment of a frame building**

Кудряшов Вадим Александрович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», отдел научной
и инновационной деятельности,
начальник отдела

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: vadmud@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»,
Department of Scientific and Innovation Activity,
Head of the Department

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: vadmud@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4889-1060

Жамойдик Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: 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, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
e-mail: zhamoidik.kii@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0407-5176

Кураченко Игорь Юрьевич

Учреждение «Научно-исследовательский
институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций» Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики
Беларусь, консультационный центр в области
обеспечения пожарной безопасности,
главный специалист

Адрес: ул. Солтыса, 183а,
220046, г. Минск, Беларусь
e-mail: i.kurachenko@yandex.by
ORCID: 0000-0002-2898-1811

Igor' Yu. Kurachenko

Research Institute of Fire Safety
and Emergencies of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus,
Fire Safety Advisory Center,
Chief Specialist

Address: Soltysa str., 183a,
220046, Minsk, Belarus
e-mail: i.kurachenko@yandex.by
ORCID: 0000-0002-2898-1811

Нгуен Тхань Киен

кандидат технических наук
Университет противопожарной безопасности
Министерства общественной безопасности
Вьетнама, факультет пожарной безопасности,
заместитель декана

Адрес: ул. Кхуат Зиу Тиен, 243,
район Тхань Суан, Ханой, Вьетнам
e-mail: thanhkienpcct34@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2710-0381

Nguyen Thanh Kien

PhD in Technical Sciences
University of Fire Fighting & Prevention
of the Ministry of Public Security of Vietnam,
Fire Safety Department, Deputy Dean

Address: Khuat Duy Tien, 243,
Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam
e-mail: thanhkienpcct34@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2710-0381

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-1.49>

RESULTS OF FULL-SCALE FIRE TESTS OF THE MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLAB AS PART OF A FRAGMENT OF A FRAME BUILDING

Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Nguyen T.K.

Purpose. To develop methods and conduct force tests under loading, full-scale fire tests of a reinforced concrete monolithic slab as part of an experimental fragment of a framing building, to obtain experimental data on relative deformations and displacements during force tests, temperature distribution in the fire chamber, in structural sections, slab displacements during fire exposure and to assess the damage.

Methods. Force tests of reinforced concrete slab using inventory loads, a set of deflection meters and strain gauges; full-scale fire tests of a reinforced concrete monolithic floor under load using a hydrocarbon fire load, a complex of thermoelectric converters and a displacement measurement system.

Findings. A methodology has been developed and strength tests of a reinforced concrete cast-in-place slab as part of an experimental fragment of a frame building under a load of 675 kg / m² have been carried out. The slab deflection in the span was no more than 1/1000. The relative compressive strains of concrete in the maximum values did not exceed 0.36 ‰, the relative tensile strains of concrete in the maximum values were 0.89 ‰, which indicates the elastoplastic work of the structure. A technique was developed and full-scale fire tests of a cast-in-place slab as part of an experimental fragment of a frame building under a load of 675 kg / m² were carried out. With the use of 2405 liters of waste engine oil and 1.8 m³ of wood, a thermal fire rate close to the standard was created. The temperature on the heated surface reached 1000 °C, while on the unheated side the temperature was not higher than 40 °C, which led to significant deformations of the slab, in total between the center and the console edges it was about 300 mm, or 1/30th of the slab geometric length. As a result of tests on the 69th minute from the beginning of the flashover fire, unexpected destruction of the reinforced concrete centrifuged columns occurred. After the fragment collapsed, two linear plastic hinges were found in the span at a distance of 1.5 m from each support at the point where additional reinforcement has been cut.

Application field of research. The research results can be used to assess the fire resistance of reinforced concrete cast-in-place flooring, in the development of design methods and in the modeling of reinforced concrete cast-in-place structures under force loading and at fire, as well as in the development of methods for full-scale fire tests of reinforced concrete structures.

Keywords: fire resistance, fire resistance limit, reinforced concrete cast-in-place slab, experiment, frame building, test procedure, force tests, full-scale fire tests, building structures, destruction.

(The date of submitting: January 28, 2021)

REFERENCES

1. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Kurachenko I.Yu., Mordich M.M. Konstruirovaniye zhelezobetonnoy monolitnoy perekrytiya v sostave fragmenta karkasnogo zdaniya dlya issledovaniya ognestoykosti v ramkakh naturnykh ognevnykh ispytaniy [Cast-in-place reinforced concrete plate construction as a part of a frame experimental building for fire resistance research]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 5, No. 1. Pp. 33–48. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.33.
2. Polevoda I.I., Nekhan' D.S. Rezul'taty naturnykh ognevnykh ispytaniy tsentrifugirovannykh zhelezobetonnykh kolonn kol'tsevoogo 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.
3. Nekhan' D.S., Kurachenko I.Yu., Olesiyuk N.M., Kreer L.A. Issledovaniya temperatury gazovoy sredy pri provedenii naturnykh ognevnykh ispytaniy stroitel'nykh konstruktsiy [Temperature studies of the gaseous medium during full-scale fire tests of building constructions]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 130–141. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.130.
4. Zhovna V.V., Shtykh A.A., Kudryashov V.A., Mordich A.I., Belevich V.N. Ognestoykost' zhelezobetonnykh karkasov zdaniy s ploskimi sborno-monolitnymi perekrytiyami, obrazovannymi mnogopustotnymi plitami [Fire resistance of reinforced concrete frame structures with precast hollowcore slab floors]. *Construction science & engineering*, 2006. No. 4(7). Pp. 42–51. (rus)

5. Zhovna V.V., Shtykh A.A., Kudryashov V.A., Mordich A.I., Belevich V.N. Eksperimental'nye ispytaniya zhelezobetonnykh sborno-monolitnykh ploskikh perekrytiy, obrazovannykh mnogopustotnymi plitami dlya opredeleniya fakticheskikh predelov ognestoykosti konstruktsiy [Experimental tests of reinforced concrete composite precast-cast-in-place floors formed with multiple hollow slabs for determining the actual fire resistance limits in structures]. *Construction science & engineering*, 2007. No. 4(13). Pp. 43–50.
6. Kudryashov V.A. Otsenka ognestoykosti sborno-monolitnogo perekrytiya so sbornymi mnogopustotnymi plitami [Fire resistance of semi-continuous hollow core slab elements in deck structures]. *Construction science & engineering*, 2008. No. 4(19). Pp. 37–42. (rus)
7. Polevoda I.I., Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M. Eksperimental'nye issledovaniya ognestoykosti stal'nykh karkasnykh konstruktsiy s konstruktivnoy ognezashchitoy [Experimental study of steel frame structures fire resistance with structural fire protection]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2016. No. 1 (23). Pp. 13–27. (rus)
8. Kudryashov V.A., Zhamoydik S.M., Lupandin A.E., Nguen T.K., Botyan S.S., Drobysh A.S. Ognevye ispytaniya naturnogo fragmenta stal'nogo karkasa zdaniya s konstruktivnoy ognezashchitoy i ograzhdeniem iz yacheistykh stenovykh blokov [Full-scale steel frame with structural fire protection and autoclaved aerated concrete blocks enclosure fire testing]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2016. No. 1(39). Pp. 113–131.