

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ПРОДАВЛИВАНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ

Фомин С.Л., Астахов А.А., Резник П.А.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
г. Харьков, Украина

АНОТАЦІЯ: Розроблено методику проведення експериментальних досліджень залізобетонних плит на продавлювання при нагріванні. Виявлено нові особливості впливу температури на напружено-деформований стан, розроблені основні положення методики розрахунку вогнестійкості.

АННОТАЦИЯ: Разработана методика проведения экспериментальных исследований железобетонных плит на продавливание при нагреве. Выявлены новые особенности влияния температуры на напряженно-деформированное состояние, разработаны основные положения методики расчета огнестойкости.

ABSTRACT: A technique for experimental studies on concrete slabs punching when heated. And revealed new features of the effect of temperature on the stress-strain state, has developed guidelines calculation method of fire resistance.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Продавливание железобетонных плит, высокотемпературный нагрев, метод оценки наступления предельного состояния.

В Украине и за рубежом в последние годы получили широкое распространение монолитные здания с безригельными каркасами. Важной проблемой, связанной с конструкциями несущих элементов многоэтажных зданий, является обеспечение их огнестойкости, требование к которым резко повышается с увеличением их высоты.

Огнестойкость определяется как способность конструктивной системы, части конструктивной системы или отдельной конструкции

соответствовать обязательным требованиям (несущая способность и/или ограждающая способность) для определенного уровня нагрузки, определенного огневого воздействия и определенного промежутка времени.

Наиболее уязвимым местом в железобетонных безригельных перекрытиях является узел опирания плиты на колонну, в котором возникают усилия среза и которые могут привести к обрушению в результате продавливания плиты колонной. В нормах разных стран, в том числе в новых нормах Украины ДБН [1] и ДСТУ [2], разработаны рекомендации по проектированию при нормальной температуре; при высоких температурах пожарной среды нормативные указания по расчету отсутствуют. Не имеется так же экспериментальных данных по изучению процессов среза в опорной зоне плиты при нагреве.

Целью исследования ставилось выявление особенностей работы монолитных железобетонных зданий с безригельными каркасами при воздействии высокой температуры. Проведенные численные исследования фрагмента безригельного каркасного монолитного железобетонного здания при совместном воздействии статической нагрузки и нагрева по режиму стандартного пожара выявили новые особенности напряженно-деформированного состояния. Значительно увеличилось поперечные силы при воздействии пожара, увеличилась опасность возникновения предельного состояния в плите от среза при ее продавливании колонной [3].

При пожаре в зонах стыка плит и колонн возникают трехмерные температурные поля, которые оказывают существенное влияние, как на напряженно-деформированное состояние локальных зон элементов, так и всей конструкцию в целом [4].

Разработана и изготовлена установка для испытания железобетонных плит на продавливание при нагреве, которая содержит опытный образец в виде фрагмента узла монолитного соединения железобетонных плит с железобетонными колоннами, примыкающими к плите сверху и снизу [5]. Плита армируется нижней и верхней арматурой, а для некоторых образцов специальной поперечной вертикальной арматурой, предназначенной для восприятия усилий среза при продавливании, колонны имеют арматурные каркасы. Особенностью образцов является наличие сквозного отверстия расположенного в центре сечения колонны диаметром $\varnothing 36$ мм для колонн сечением 200×200 мм и диаметром $\varnothing 60$ мм для колонн сечением 400×400 мм. В колоннах и плите предусмотрены отверстия для термопар.

Установка состоит из двух частей: верхней силовой и нижней – нагревательной (рис. 1). Верхняя часть представляет собой пространственную силовую раму, выполненную из металла в виде усеченной

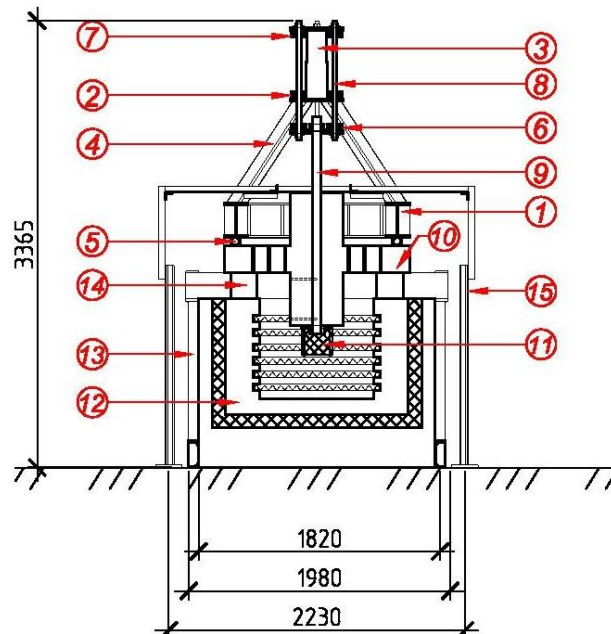
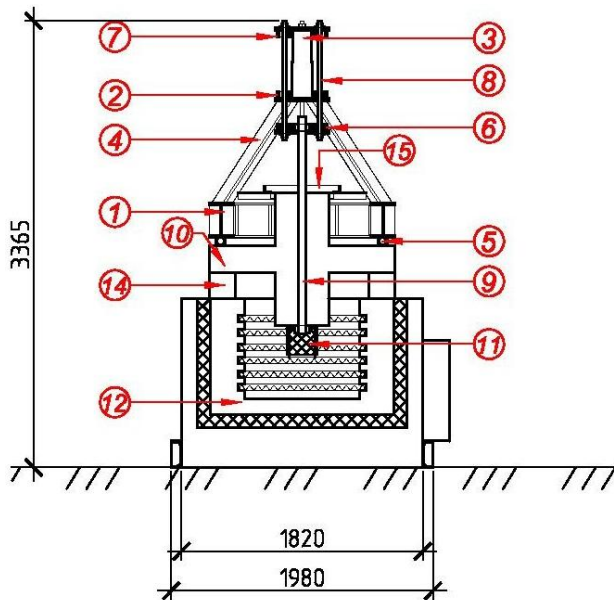


Рис. 1. Вид установки в разрезе: 1 – нижнее основание верхней рамы из двутавра; 2 – пластина верхнего основания рамы; 3 – домкрат; 4 – наклонные раскосы; 5 – фторопластовые прокладки; 6 – нижняя пластина реверса; 7 – верхняя пластина реверса; 8 – тяжести реверса; 9 – главный тяж; 10 – образец; 11 – теплоизоляционный короб; 12 – электрическая печь; 13 – стойки нижней рамы; 14 – ригельная конструкция нижней рамы; 15 – рама для измерительных приборов

пирамиды, нижним основанием которой является замкнутый пояс 1 из двутавра квадратный в плане по размеру плиты образца. Верхним основанием служит ребристая металлическая пластина 2, на которую устанавливается домкрат 3. Верхнее и нижнее основания связаны на сварке четырьмя наклонными раскосами коробчатого сечения 4, образуя пространственную раму.

Верхняя часть установки размещается на образце и передает усилия по контуру плиты через фторопластовые прокладки 5.

В верхней части рама имеет реверсивное устройство, состоящее из двух пластин – нижней 6 и верхней 7, связанных друг с другом четырьмя тяжами 8 на резьбовом соединении. Тяжи пропущены через отверстия в пластине верхнего основания 2. Верхняя пластина реверса устанавливается на домкрат, к нижней пластине реверса 6 через отверстие в ее центре закрепляется главный тяж 9 с помощью гайки, который проходит через отверстие в колонне образца 10 и закрепляется к ее нижнему торцу посредством гайки. Между бетонным торцом колонны и гайкой устанавливается распределительная металлическая пластина. Узел сопряжения нижней части тяжа с колонной снабжается холодильником с водяным охлаждением и теплоизоляционным коробом от лучистого нагрева 11.

Применение реверсивного устройства позволяет решить одну из поставленных задач - увеличение точности определения параметров среза при продавливании посредством опирания плиты по контуру с верхней стороны и приложения усилия на колонну снизу.

Вторая нижняя нагревательная часть установки состоит из электрической печи 12, силовой пространственной рамы, состоящей из металлических стоек 13 и верхней железобетонной рамной ригельной конструкции из монолитного конструкционного керамзитобетона 14, состоящей из продольных и поперечных ригелей, окаймляющих верхнюю открытую часть печи. Применение керамзитобетона позволяет существенно снизить потери тепла в месте стыка образца с печью. Измерение температуры в печи, в сечениях плиты и колонны производится по термопарам, выведенным на внешний измерительный прибор. Измерение деформаций проводится с помощью прогибомеров и индикаторов закрепленных на отдельной рамной конструкции 15.

Испытания проводятся следующим образом. Железобетонный образец предварительно подготавливается к опыту: в предусмотренные при бетонировании отверстия в плите и нижней колонне устанавливаются термопары на быстротвердеющем жаростойком цементном растворе, холодные концы которых выводятся на верхнюю поверхность плиты; в центральное отверстие колонн вставляется тяж 9, на верхнюю часть которого навинчивается гайка, предназначенная для фиксации тяжа в

вертикальном направлении, а на нижнюю часть одевается распределительная металлическая пластина, имеющая по центру отверстие, и закрепляется гайкой. Затем надевается холодильник в виде спирали из медной трубки, по которой циркулирует проточная вода. Нижняя торцевая часть колонны дополнительно утепляется минераловатными плитами и фольгой для отражения лучистой составляющей теплового потока. Как показал опыт испытания на протяжении 6 часов нагрева при температуре воздуха в печи 1200°С температура распределительной плиты и гайки не превышала 65°С.

После подготовки образец помещается на железобетонную рамную ригельную конструкции из конструкционного керамзитобетона 14 со слоем теплоизоляции так, чтобы нижняя колонна находилась в печи, не доходя до ее низа, а нижняя поверхность плиты и колонна подвергалась нагреву.

Затем по верхнему контуру плиты укладывается прокладка из фторопласта в специально подготовленные и закрепленные на плите образца направляющие, на которую устанавливается верхняя силовая рама, реверс и домкрат 3. Верхняя часть тяжа закрепляется в нижней пластине реверса 6 гайкой. При закачивании масла в домкрат он давит на верхнюю пластину реверса, который передает перемещение нижней пластине и, тем самым, трансформирует сжимающее усилие домкрата в растягивающее усилие тяжа и, следовательно, в давление нижней колонны на плиту образца. Плита оказывается опертой по контуру на нижнее основание силовой верхней рамы и продавливается снизу вверх нижней колонной. Возникающие при этом усилия полностью замкнуты в верхней части установки и не передаются на нижнюю часть. В установке моделируется реальная картина продавливания плиты снизу вверх при ее нагреве снизу и четырехстороннем нагреве продавливающей нижней колонны.

В процессе нагружения и нагрева производится замер деформаций верхней поверхности плиты, усилия на домкрате, температуры в печи и в сечениях плиты и колонн по всем термопарам, фиксирование картины образования и раскрытия трещин.

Испытания могут проводиться в различной последовательности: колонна сначала нагружается, а затем нагревается; колонна и плита сначала нагревается, а затем нагружаются; нагрев и нагружение производятся одновременно.

На рис. 2 а) показана схема приложения нагрузки и нагрева, на рис. 2 б) размещение индикаторов и прогибомеров.

По результатам измерений температуры во времени определяются нестационарные температурные поля в плите и колонне, по индикаторам и прогибомерам - перемещения и деформации при нагружении и нагреве.

Фиксируется образование и развитие трещин, формирование пирамиды продавливания, предельное состояние и дальнейшее разрушение узла соединения колонны с плитой, что в конечном итоге позволяет оценить огнестойкость наиболее распространенных в настоящее время монолитных железобетонных конструкций зданий с безригельными каркасами.

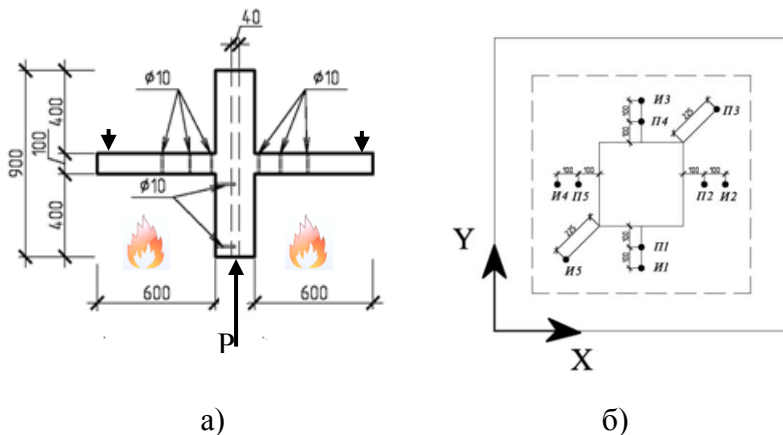


Рис. 2. Экспериментальные образцы первой серии: а) схема приложения нагрузки и нагрева, б) размещение индикаторов и прогибомеров

Изготовлено 2 серии образцов из бетона класса С20/25. Образцы представляют собой фрагменты монолитного безригельного каркаса (сопряжение плиты перекрытия с колоннами нижнего и верхнего этажей).

В центре сечения колонн выполнены сквозные отверстия для пропуска троса, создающего загрузку торца нижней колонны.

Первая серия из 4 образцов состояла из железобетонных плит с размерами 1400 x 1400 мм и высотой сечения 100 мм и железобетонных колонн по центру плиты размером сечения 200x200 мм и высотой 400 мм. Верхняя и нижняя продольная арматура плиты $\varnothing 10$ А400С, шаг 150 мм, защитный слой бетона 20 мм; колонны армированы 4 $\varnothing 10$ А400С, поперечная арматура $\varnothing 5$ Вр-1. Два образца имеют в плите поперечную арматуру 64 $\varnothing 5$ Вр-1 для восприятия среза при продавливании. Два образца без поперечной арматуры **1-ПК100** и с поперечной арматурой **2-ПК100А** в плите испытывались при нормальной температуре. Аналогичные образцы **3-ПК100⊙** (без поперечной арматуры) и **4-ПК100⊙А** (с поперечной арматурой) испытывались при нагреве.

Вторая серия из 4 образцов состояла из железобетонных плит с высотой сечения 200 мм и железобетонных колонн размером сечения 400x400 мм. Продольное армирование плит и колонн такое же, как и в первой серии. Поперечное армирование в плитах двух образцов принято - 48Ø5 Вр-1. Два образца без поперечной арматуры **5-ПК200** и с поперечной арматурой **6-ПК200А** в плите испытывались при нормальной температуре. Образцы **7-ПК100©** (без поперечной арматуры) и **8-ПК100©А** (с поперечной арматурой) испытывались при нагреве.

Рассмотрим результаты испытания образцов второй серии. Испытание образца **5-ПК200** проведено путем нагружения колонны с помощью домкрата и реверса ступенями величиной 1 т до разрушения. На рис. 3 показана установка, размещение приборов и этапы продавливания в процессе загрузки.



Рис. 3. Этапы продавливания при увеличении нагрузки

Зависимость перемещения 4 точек, расположенных на оси симметрии поверхности плиты Y (рис. 2б) по индикаторам И1,И3 и прогибомерам П1,П4 от уровня нагрузки в образце 5-ПК200 показаны на рис. 4. Такие же зависимости представлены на рис.5 для образца 6-ПК200А для температуры $\theta=20^{\circ}\text{C}$.

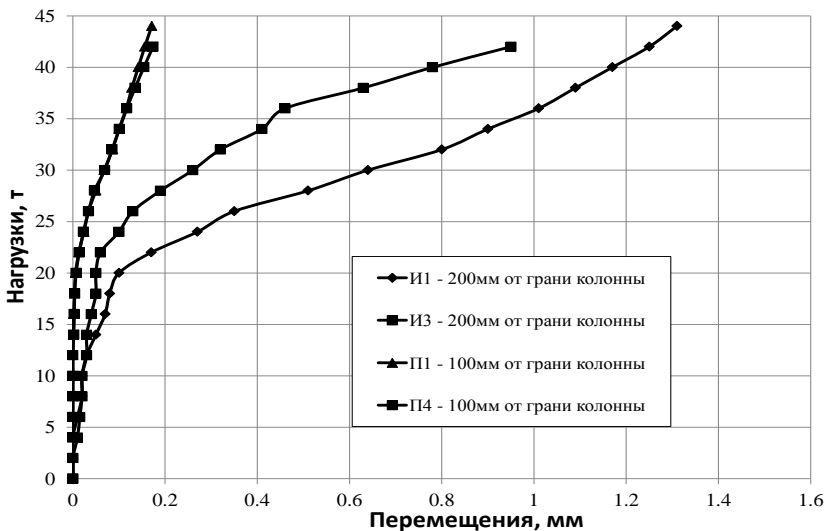


Рис. 4. Зависимость перемещения 4 точек поверхности плиты от уровня нагрузки в образце 5-ПК200 (без поперечной арматуры) при $\theta=20^\circ\text{C}$

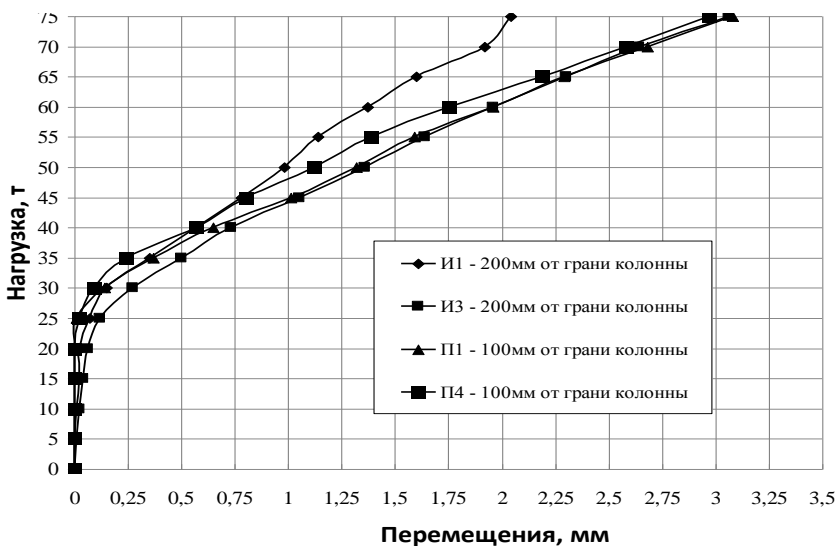


Рис. 5. Зависимость перемещения 4 точек поверхности плиты от уровня нагрузки в образце 6-ПК200А (с поперечной арматурой) при $\theta=20^\circ\text{C}$

Исследование влияния нагрева на перемещение проводилось в два этапа. Образцы 7-ПК100Θ и 8-ПК100ΘА сначала просушивались при максимальной температуре до 200°C, охлаждались до комнатной температуры, затем нагревались. При нагреве фиксировались температурные поля в сечении плиты и колонне. После достижения максимальной температуры производилось загрузке образцов. Обнулялись измерительные приборы и производился отсчет перемещений от нагретой поверхности плиты.

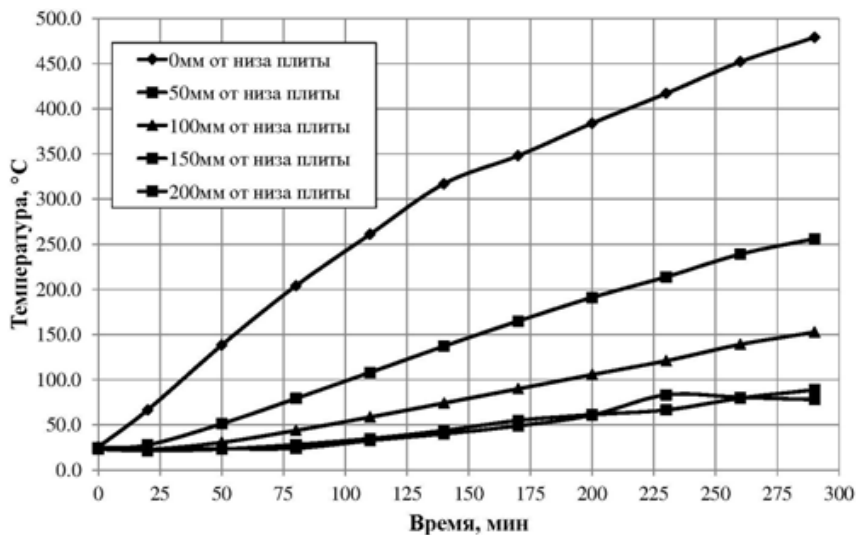


Рис. 6. Распределение температуры по высоте сечения плиты в образце 7-ПК200θ (без поперечной арматуры) на расстоянии 160 мм от грани колонны во времени

Распределение температуры по высоте сечения плиты в образце 7-ПК200θ на расстоянии 160 мм от грани колонны во времени показано на рис. 6. Соответствующие этим температурам перемещения 4 точек поверхности плиты от времени в образце 7-ПК200θ показаны на рис. 7.

На рис. 8 показана зависимость перемещения 4 точек поверхности плиты от уровня нагрузки в образце 7-ПК200θ при нагреве нижней поверхности плиты до $\theta = 479^\circ\text{C}$.

Распределение температуры по высоте сечения плиты в образце 8-ПК200θА на расстоянии 160 мм от грани колонны во времени показано на рис. 9; соответствующие этим температурам перемещения 4 точек поверхности плиты от времени в этом образце – на рис. 10.

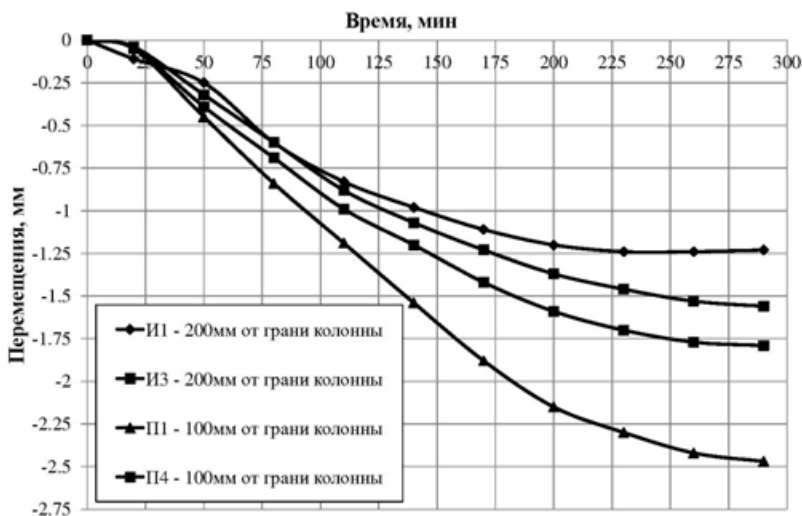


Рис. 7. Зависимость перемещения 4 точек поверхности плиты от времени в образце 7-ПК2000 (без поперечной арматуры) при нагреве

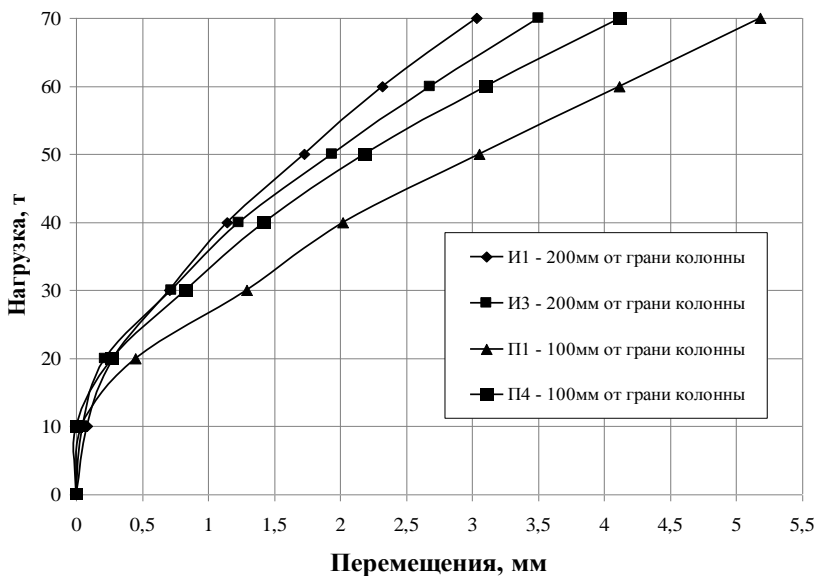


Рис. 8. Зависимость перемещения 4 точек поверхности плиты от уровня нагрузки в образце 7-ПК2000 (без поперечной арматуры) при нагреве нижней поверхность плиты до $\theta=479^{\circ}\text{C}$

На рис. 11 представлена зависимость перемещения от уровня нагрузки в образце 8-ПК2000А при нагреве нижней поверхности плиты до $\theta=323^{\circ}\text{C}$.

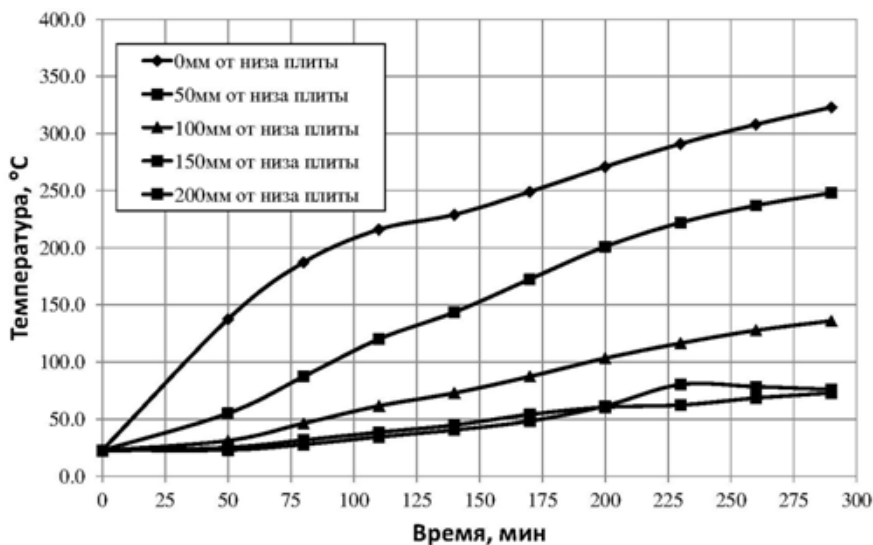


Рис. 9. Распределение температуры по высоте сечения плиты в образце 8-ПК2000А (с поперечной арматурой) на расстоянии 160 мм от грани колонны во времени

Суммарные перемещения 4 точек поверхности образцов 7-ПК2000 и 8-ПК2000А от температуры и нагрузки приведены на рис. 12 и рис. 13

Проведенные экспериментальные исследования выявили ряд новых особенностей работы железобетонных конструкций на продавливание. Одним из неясных вопросов является критерий наступления предельного состояния при испытании натуральных образцов. В рассматриваемой серии испытывались фрагменты наиболее распространенных перекрытий безбалочных каркасных зданий с нижней и верхней арматурой плит, которая не учитывается в расчетах на срез при продавливании.

Наличие этой арматуры не позволяет четко определить границу между моделью среза и моделью армированного объема бетона, разделенного пространственной трещиной в результате продавливания, поскольку в эксперименте замеряются лишь перемещения поверхностей плиты.

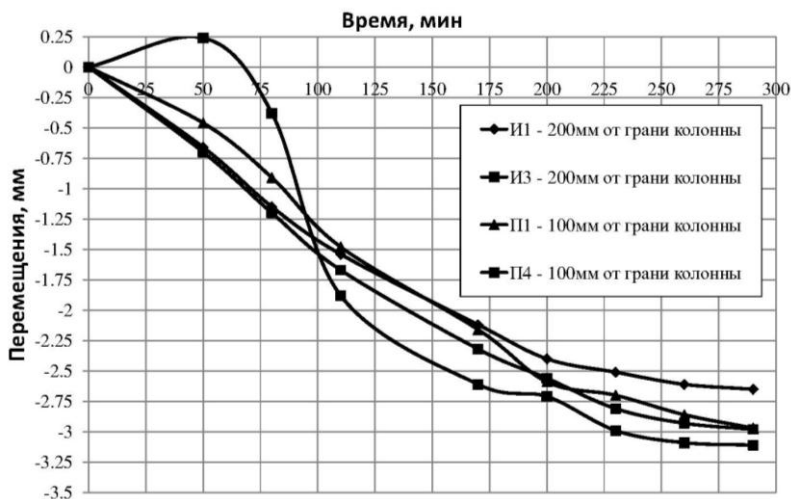


Рис. 10. Зависимость перемещения 4 точек поверхности плиты от времени в образце 8-ПК200θ (с поперечной арматурой) при нагреве

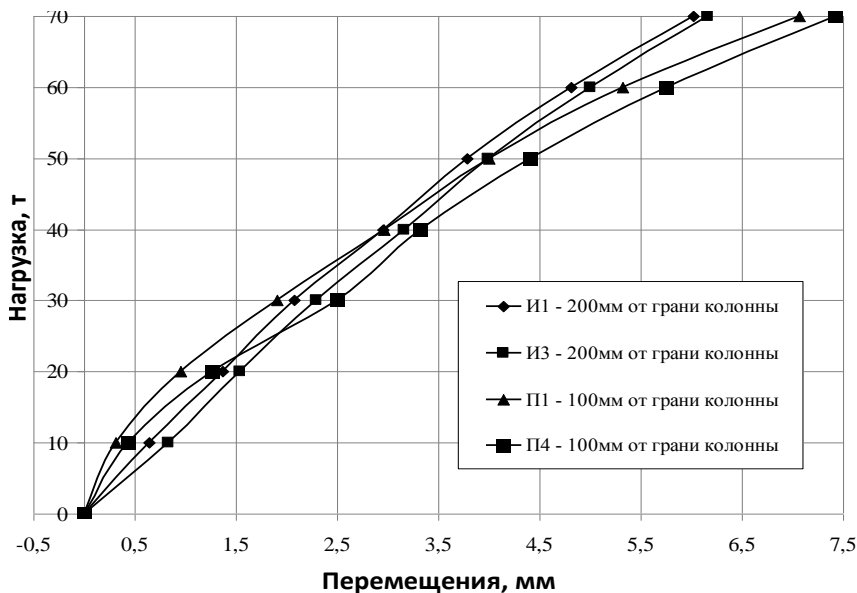


Рис. 11. Зависимость перемещения 4 точек поверхности плиты от уровня нагрузки в образце 8-ПК200θА (с поперечной арматурой) при нагреве нижней поверхности плиты до $\theta=323^{\circ}\text{C}$

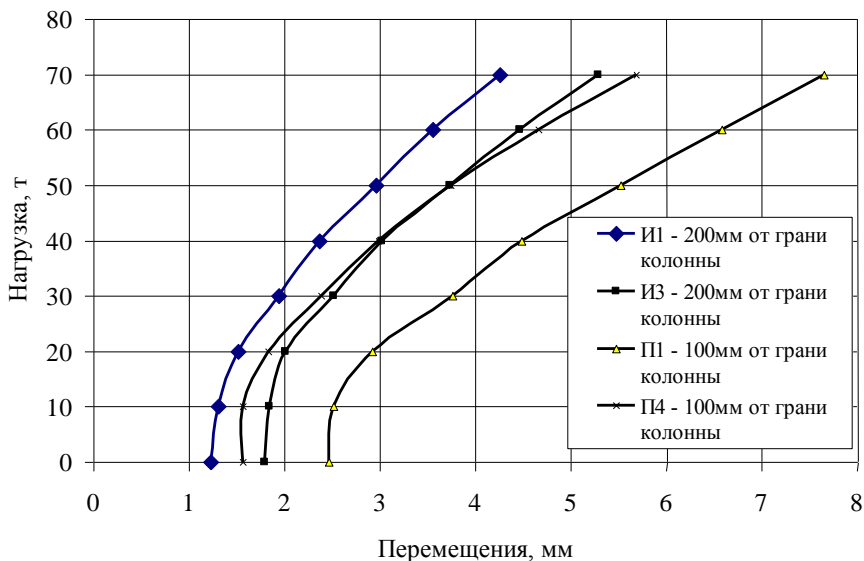


Рис. 12. Зависимость суммарных перемещений 4 точек поверхности плиты от уровня нагрузки и нагрева в образце 7-ПК2000 (без поперечной арматуры) при температуре нижней поверхности плиты $\theta = 479^{\circ}\text{C}$

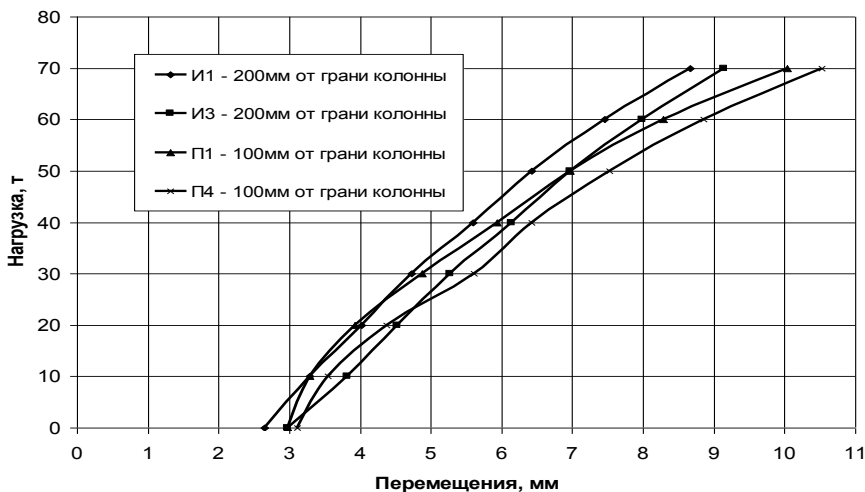


Рис. 13. Зависимость суммарных перемещений 4 точек поверхности плиты от уровня нагрузки и нагрева в образце 8-ПК2000А (с поперечной арматурой) при температуре нижней поверхности плиты $\theta = 323^{\circ}\text{C}$

При проведении испытаний визуально фиксируется периметр «призмы продавливания», однако при этом не наблюдается снижения нагрузки на домкрате или переломов на кривых перемещений верхней поверхности плиты. В этой связи, критерием наступления предельного состояния по продавливанию могут служить либо перемещения верхней поверхности плиты в точках измерения в эксперименте и сравнение с результатами моделирования объемных нелинейных моделей бетонных образцов в программных комплексах, либо сравнения с величинами конечных перемещений, полученных в линейных моделях при задании продавливающей силы из эмпирических формул нормативных документов.

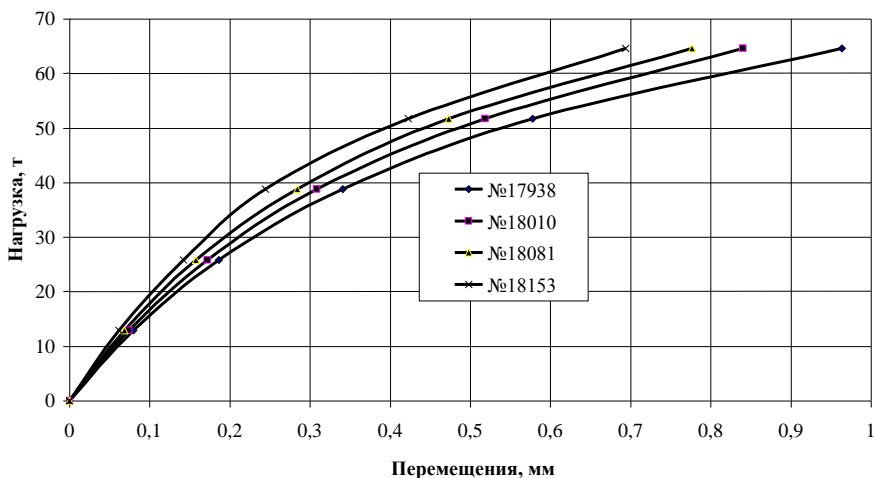


Рис. 14. Зависимость перемещения 4 узлов модели на поверхности плиты от уровня нагрузки

Если принять по ДБН [1] угол наклона призмы продавливания $\theta=26,6^\circ$ (вместо 45° по СНиП), то при коэффициенте надежности $\gamma_c=1,15$ продавливающая сила $F=64,6$ т. Эксперименты показали возможность такой аппроксимации (рис.16). Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния бетонного образца в нелинейном процессоре ПК Лира при воздействии усилия продавливания $F=64,6$ т. На рис.14 показаны зависимости перемещений 4 узлов модели на поверхности плиты от уровня нагрузки: по грани с колонной (№17938) и на расстоянии 20 мм (№18010), 40 мм (№18081) и 60 мм (№18153) от нее для сравнения с экспериментальными значениями.

На рис.15 приведена расчетная схема бетонного образца и картина его разрушения.

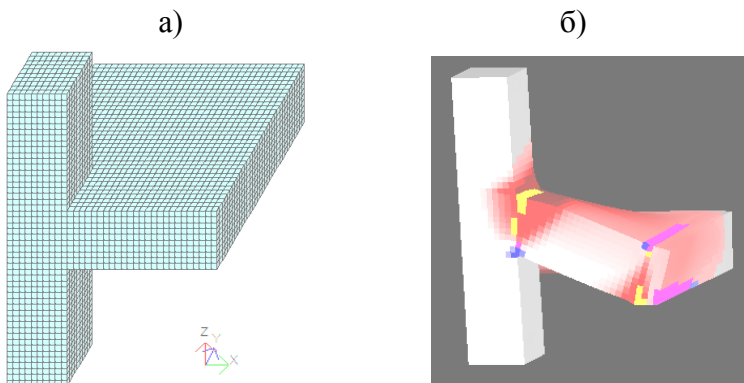


Рис. 15. Моделирование продавливания бетонного образца при температуре 20°C: а) расчетная схема, б) картина разрушения



Рис. 16. Характер разрушения образцов второй серии

Принимая за критерий расчетную кривую «нагрузка – перемещение» узла №18010 поверхности плиты, получим для расчетной нагрузки $F=64,6$ т перемещение $\delta = 0,84$ мм. Соответствующие этому перемещению предельные нагрузки продавливания бетона определим по диаграммам рис. 4,5,8 и 11: для образца № 5 - $F=34$ т, для образца № 6 - $F=44-45$ т, для образцов № 7 и №8 - $F=20$ т. Разность между максимальными нагрузками при испытании и полученными предложенным способом возникает за счет включения в работу верхней и нижней арматуры. При нагреве определение критерия δ_{θ} производится аналогично, для чего по экспериментальным температурным полям необходимо найти нагрузку F_{θ} .

Влияние нагрева на прочность при продавливании проявилось в существенном увеличении перемещений по сравнению с образцами-близнецами, испытываемыми при комнатной температуре. При нагрузке 45 т в холодном образце 5-ПК200 (без поперечной арматуры) максимальные перемещения составили 1,05 мм, в образце 7-ПК2000 при нагреве – 5 мм. В образце 6-ПК200 (с поперечной арматурой) максимальные перемещения составили 1,3 мм, в образце 8-ПК2000А при нагреве – 7,5 мм.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования выявили ряд новых особенностей работы железобетонных конструкций на продавливание.

2. Обнаружено две стадии работы плиты при наличии верхней и нижней продольной арматуры в процессе продавливания. В первой стадии продольная арматура не оказывает существенного значения на срез плиты, во второй стадии арматура включается в работу. При этом отсутствует деформационный критерий наступления предельного состояния. При визуальном фиксировании периметра «призмы продавливания» не наблюдается снижения нагрузки на домкрате или переломов на кривых перемещений верхней поверхности плиты.

3. Разработан метод оценки наступления предельного состояния, критерием которого может служить либо перемещения верхней поверхности плиты в точках измерения в эксперименте и сравнение с результатами моделирования объемных нелинейных моделей бетонных образцов, полученных в программных комплексах, либо сравнения с величинами конечных перемещений, полученных в линейных моделях при задании продавливающей силы из эмпирических формул нормативных документов.

4. Выявлены новые особенности влияния температуры на напряженно-деформированное состояние конструкций, разработаны основные положения методики расчета огнестойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкції будинків та споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. - 71 с.
2. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010.– К.: Мінрегіонбуд України, 2011. - 118 с.
3. Фомин С.Л. Огнестойкость фрагмента каркасного монолитного здания / С.Л. Фомин, Астахов А.А. // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. - Вип. 61. - С.145-153.
4. Фомин С.Л. Температурное поле в зоне сопряжения железобетонной плиты и колонны безригельного каркасного здания при пожаре / Фомин С.Л., Астахов А.А. // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. - Вип. 62.- С. 63-71.
5. Установка для випробування залізобетонних плит на продавлювання при нагріванні. Заявка на винахід а 2012 12846 (Фомін Станіслав Леонідович, Астахов Артем Анатолійович, Резнік Петро Аркадійович, Харківський національний університет будівництва та архітектури). Дата подання 12.11.2012

Статья поступила в редакцию 07.03.2013 г.