

Н.Н. ТРЕКИН¹, Д.Ю. САРКИСОВ², В.В. КРЫЛОВ¹, Е.Б. ЕВСТАФЬЕВА³, К.Р. АНДРЯН⁴

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия

³ООО «Научно-проектное бюро «Конструктивные решения»», г. Москва, Россия

⁴АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ПРОДАВЛИВАНИЕ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация. Современные нормы проектирования развитых стран имеют существенные различия в расчетных положениях по определению несущей способности монолитных железобетонных плит на продавливание и не учитывают полностью особенности конструктивных решений и условий эксплуатации. Имеющиеся расчетные положения разработаны для статического режима нагружения конструкций. Напряженно-деформированное состояние плит на продавливание при динамической нагрузке в настоящее время мало изучено, и как следствие, отсутствуют методики определения несущей способности плит на продавливание при динамическом нагружении. В статье представлены результаты экспериментально-теоретических исследований несущей способности плит при статическом и динамическом нагружениях. Описана методика экспериментальных исследований и конструкции опытных образцов, оборудование для проведения силовых испытаний, представлены результаты исследований на продавливание фрагментов сопряжения плоских железобетонных плит с колонной при динамическом и статическом нагружении. Представлено сравнение разрушающей нагрузки для образцов, испытанных при динамическом нагружении с разрушающей нагрузкой для образцов, испытанных на статическую нагрузку. Определены факторы, влияющие на прочность плит при продавливании при динамическом нагружении. Разработаны предложения по совершенствованию методики расчёта прочности плоских железобетонных плит при продавливании на статическую и динамическую нагрузку.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, безбалочная плита, прочность на продавливание, метод конечных элементов.

N.N. TREKIN¹, D.Y. SARKISOV², V.V. KRYLOV¹, E.B. EVSTAFIEVA³, K.R. ANDRIAN⁴

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

³LLC «Scientific Design Bureau «Constructive Solutions», Moscow, Russia

⁴JSC «Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy», Moscow, Russia

STRENGTH OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLABS FOR PUNCHING UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING

Abstract. Modern design standards of developed countries have significant differences in the design provisions for determining the bearing capacity of monolithic reinforced concrete slabs for punching and do not fully take into account the features of design solutions and operating conditions. The available design positions are designed for the static loading mode of structures. The stress-strain state of plates for punching under dynamic load is currently little studied, and as a result, there are no methods for determining the bearing capacity of plates for punching under dynamic loading. The article

presents the results of experimental and theoretical studies of the bearing capacity of plates under static and dynamic loads. The methodology of experimental studies and the design of prototypes, equipment for conducting power tests are described, the results of studies on the penetration of fragments of the interface of flat reinforced concrete monolithic slabs with a column under dynamic and static loading are presented. A comparison of the destructive load for samples tested under dynamic loading with the destructive load for samples tested under static load is presented. The factors affecting the strength of the plates during punching under dynamic loading are determined. Proposals have been developed to improve the methodology for calculating the strength of flat reinforced concrete slabs when pushing through static and dynamic loads.

Keywords: dynamic load, girderless plate, punching strength, finite element method.

Введение

Вопросы прочности и деформативности железобетонных перекрытий, а также сложность процессов, возникающих в железобетонных конструкциях при продавливании, остаются в настоящее время недостаточно изученными, несмотря на имеющиеся публикации в технической литературе [1-6]. На сегодняшний день отсутствуют методы расчета железобетонных плит перекрытий на продавливание, которые полностью учитывают все факторы конструктивных решений и условий эксплуатации как в России, так и в Европейских странах [10-20]. Отсутствуют работы по исследованию плоских плит на продавливание при динамическом нагружении, а также расчетные методики, позволяющие определять величину несущей способности плиты под действием кратковременного нагружения.

Целью настоящих исследований было получение экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии фрагмента монолитного перекрытия при динамическом и статическом продавливании, разработка пространственной модели на основе метода конечных элементов с последующими численными исследованиями, подготовка рекомендаций по совершенствованию методики расчёта прочности плоских железобетонных плит при продавливании на статическую и динамическую нагрузку.

Методы и материалы

В экспериментальных исследованиях ставилась задача оценить влияние толщины плитной части образца и класса бетона на прочность сопряжения фрагмента колонны с перекрытием, получить необходимые расчетные предпосылки, новые опытные данные, характеризующие процесс сопротивления железобетонных элементов продавливанию, развитие деформаций бетона и арматуры на различных стадиях деформирования образцов в процессе статического и кратковременного динамического нагружений, выявить схемы разрушения экспериментальных образцов.

Программа экспериментального исследования несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении описана в [7], размеры и характеристики образцов представлены в таблице 1.

Экспериментальные образцы включали в себя плитную и колонную части и моделировали узел опирания плиты на колонну. Образцы изготавливались двух типов, которые отличались толщиной плитной части. Образцы первого типа имели размер плитной части 600x600 мм и толщину 100 мм, колонная часть имела размеры поперечного сечения 100x100 мм и высоту 220 мм. Образцы второго типа имели размер плитной части 600x600 мм и толщину 120 мм, колонная часть имела размеры поперечного сечения 100x100 мм и высоту 200 мм. Общая высота образцов обоих типов составляла 320 мм. Опалубочные чертежи, армирование образцов и их общий вид приведены на рисунке 1.

Таблица 1 – Размеры и характеристики экспериментальных образцов

| Тип образца | Класс бетона | | | | | | | |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | В15 | | | | В20 | | | |
| | Динамика | | | Динамика/ Статика | Динамика | | | Динамика/ Статика |
| h=100 мм | Д ^{В15} _{h100-1} | Д ^{В15} _{h100-2} | Д ^{В15} _{h100-3} | ДС ^{В15} _{h100-1} | Д ^{В20} _{h100-1} | Д ^{В20} _{h100-2} | Д ^{В20} _{h100-3} | С ^{В20} _{h100-1} |
| h=120 мм | Д ^{В15} _{h120-1} | Д ^{В15} _{h120-2} | Д ^{В15} _{h120-3} | ДС ^{В15} _{h120-1} | Д ^{В20} _{h120-1} | Д ^{В20} _{h120-2} | Д ^{В20} _{h120-3} | С ^{В20} _{h120-1} |

где С (Д) - статика (динамика); h100 (120) – высота плитной части в мм; В15(В20) – класс бетона; 1(2,3) – порядковый номер образца.

Всего 16 образцов: 12 – для испытания на кратковременную динамическую нагрузку, 2 – для испытания на статическую нагрузку, 2 – смешанные испытания

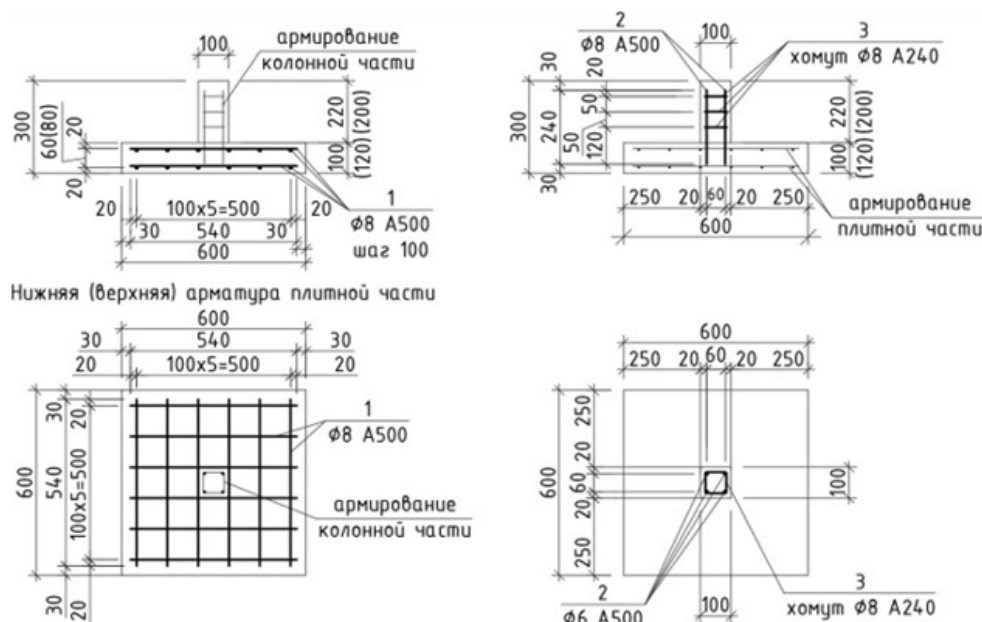


Рисунок 1 - Армирование экспериментальных образцов

Экспериментальные исследования на динамическое и статическое нагружение проводились в лаборатории испытания строительных конструкций кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременном динамическом нагружении (рисунок 2) выполнен на базе копровой установки, установленной на силовом полу, для обеспечения жесткого закрепления. Подробное описание стенда представлено в патенте на изобретение [8].

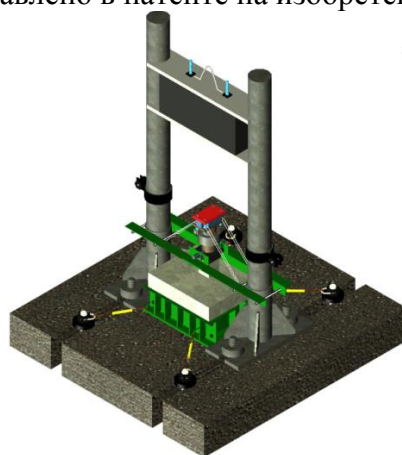


Рисунок 2 - Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременном динамическом нагружении

Стенд для испытания железобетонных образцов на статическую нагрузку образцов включал в себя металлические тужи, прикрепленные посредством гаек к силовому полу, на которых располагалась опорная металлическая траверса. Экспериментальный образец устанавливался на специально изготовленную металлическую опору из прокатного металла с дополнительными ребрами жесткости, которая была расположена на силовом полу. При этом было обеспечено шарнирное опирание образца по контуру. Пролет плиты в обоих направлениях составлял 500 мм. Сверху на колонную часть образца одевался металлический оголовок, для распределения нагрузки. На оголовок устанавливался гидравлический домкрат ДГ-100, подключенный к масляной станции. Комплекты измерительной аппаратуры, способы регистрации и записи данных были неоднократно апробированы авторами в других работах [9].

Схема установки для испытания фрагментов плит на продавливание при статическом нагружении показана на рисунке 3.



Рисунок 3 - Установка для испытания плит на продавливание

Результаты экспериментального исследования

Статическая нагрузка на опытные образцы прикладывалась ступенями в пределах 0.05-0.1 от теоретической разрушающей. Характер изменения динамической нагрузки во времени показан на рисунке 4, при этом время от момента приложения и до максимального значения изменялась в пределах 2-4 мс.

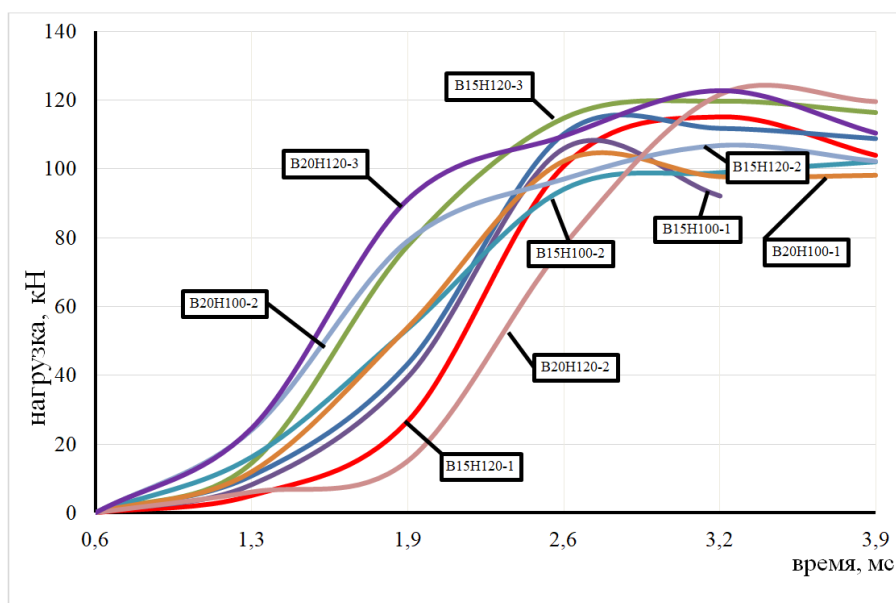


Рисунок 4 - Графики изменения динамической нагрузки во времени для указанных образцов

В результате выполненных экспериментальных исследований при действии кратковременной динамической нагрузки были получены графики зависимостей деформаций бетона и арматуры во времени от действующей на образец нагрузки.

Испытания на статическую и динамическую нагрузку показали, что в нижней арматуре возникает растягивающие усилия, а по верхней грани бетона плиты в зоне примыкания к колонне, действуют сжимающие усилия. Этот факт свидетельствует о том, что даже при небольшом пролете среза в сечениях узла примыкания колонны к перекрытию действуют значительные изгибающие моменты. На рисунке 5 даны примеры распределения деформаций по высоте сечения примыкающего к грани колонны для образца испытанного статическим нагружением $C_{h100}^{B20} - 1$ (рисунок 5 а) и образца испытанного динамическим нагружением $D_{h100}^{B20} - 2$ (рисунок 5 б).

Для каждого испытываемого образца с использованием полученных величин относительных деформаций, были определены численные значения напряжений в растянутой арматуре и бетоне, а также и усилия, возникающие в растянутой (нижней арматуре), определена высота сжатой зоны бетона (рисунок 6, 7). Следует отметить, что при статическом нагружении уровень напряжений в растянутой арматуре и сжатом бетоне при максимальной нагрузке не достигает предельных значений, но при этом выше чем при динамическом нагружении.

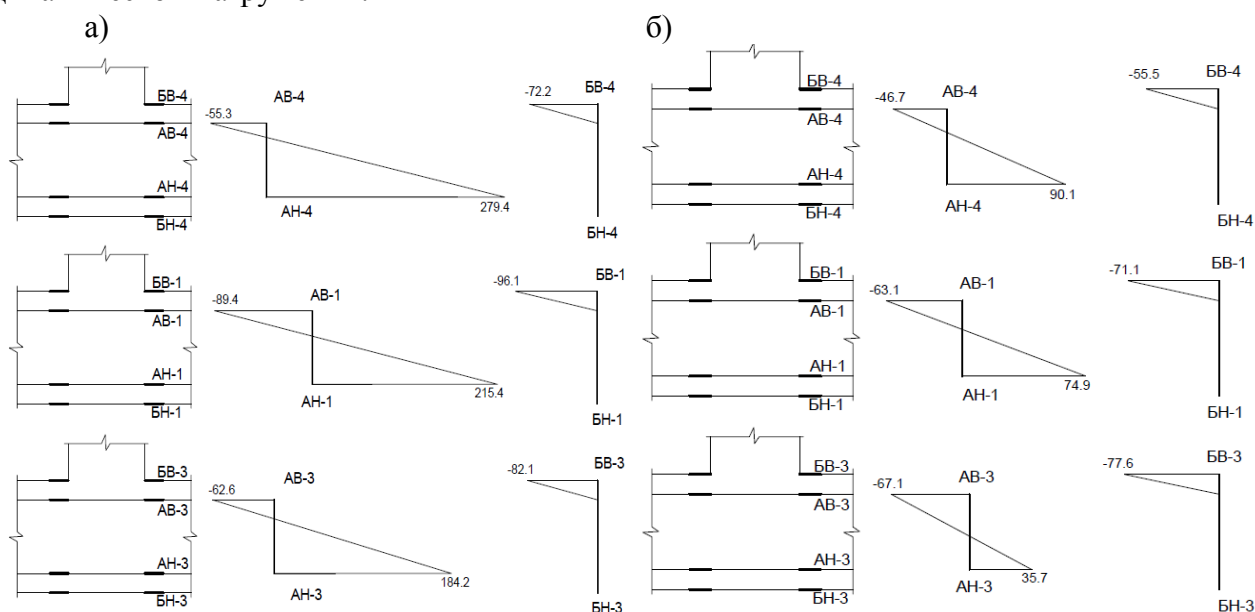


Рисунок 5 - Эпюры относительных деформаций при разрушении образца $C_{h100}^{B20} - 1$ (а) и $D_{h100}^{B20} - 2$ (б)

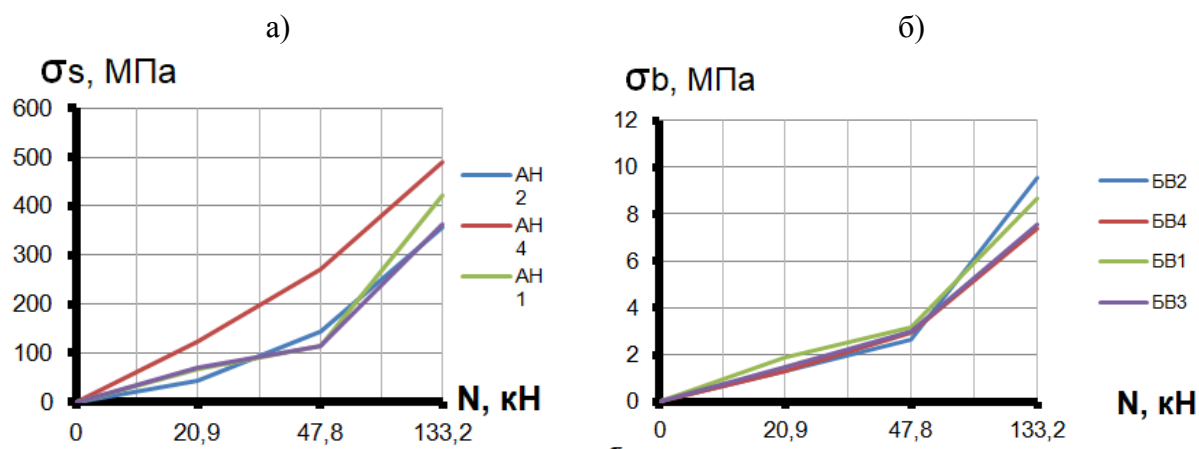


Рисунок 6 - Графики зависимости напряжений арматуры нижней (растянутой зоны) σ_s (а) и бетона верхней (сжатой зоны) σ_b (б) от внешней нагрузки N для образца $C_{h100}^{B20} - 1$

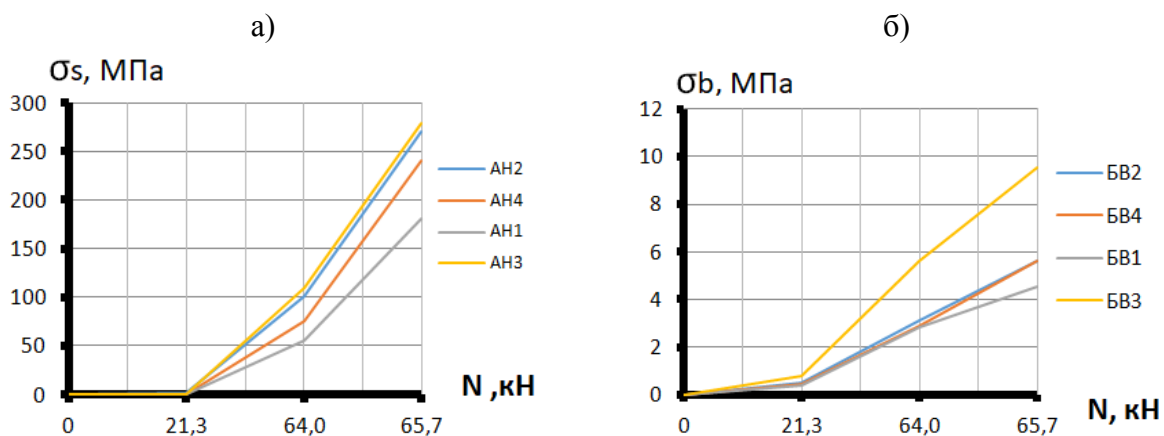


Рисунок 7 - График зависимости напряжений арматуры нижней (растянутой зоны) σ_s (а) и бетона верхней (сжатой зоны) σ_b от внешней нагрузки N для образца $D_{h100}^{B20} - 2$

Схемы трещинообразования экспериментальных образцов показали, что в целом получено характерное для продавливания железобетонных элементов разрушение (рисунок 8, 9).

В верхней зоне в месте сопряжения колонной и плитной частей у всех образцов зафиксировано смещение колонной части внутрь плитной на различную величину (примерно от 5 до 25 мм). При этом на верхней поверхности плитной части образца трещины практически не образовывались, бетон разрушался только по периметру колонной части. Плоскость верхней поверхности плитной части нарушена не значительно.

Анализ нижних поверхностей экспериментальных образцов после проведения испытаний показал, что пирамида продавливания отделилась от основного массива бетона, а нижняя ее поверхность имела линзовидную форму.

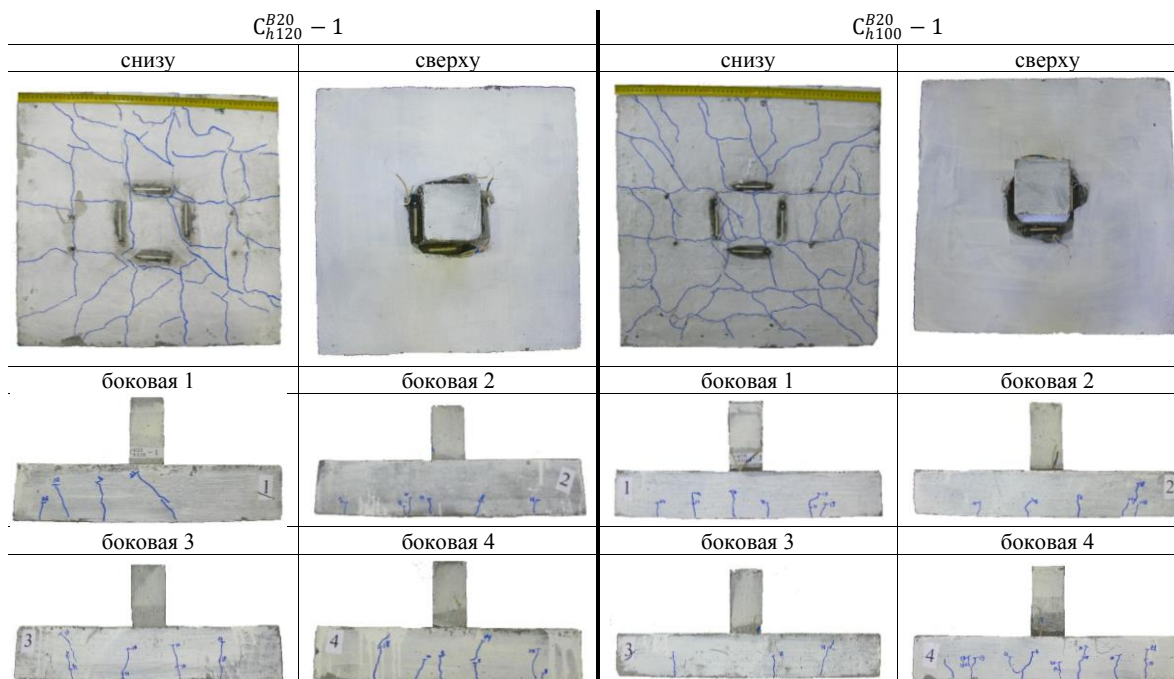


Рисунок 8 - Схемы разрушения для образца $C_{h120}^{B20} - 1$, $C_{h100}^{B20} - 1$

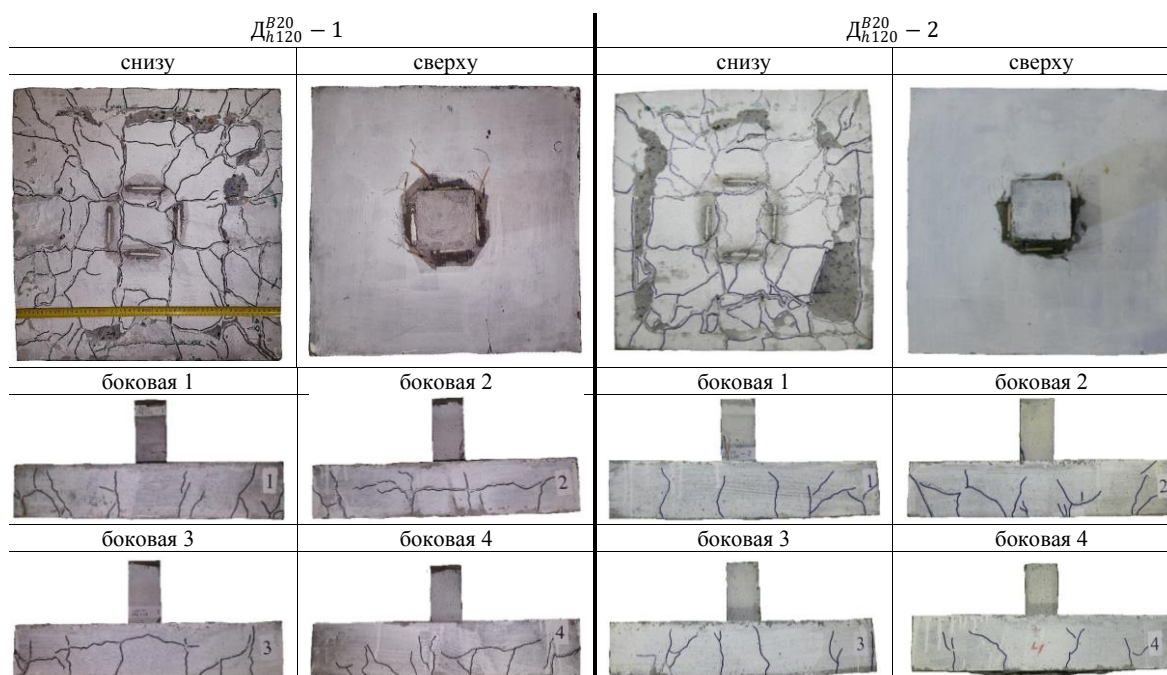


Рисунок 9 - Схемы разрушения для образца $D_{h120}^{B20} - 1$, $D_{h120}^{B20} - 2$

Экспериментальные данные по изменению динамической нагрузки показали снижение несущей способности плит на продавливание при кратковременном динамическом нагружении. Причиной этому послужило несколько факторов: прежде всего это увеличение угла наклона пирамиды продавливания и снижение высоты сжатой зоны при максимальной нагрузке, и как следствие уменьшение поверхности приведенной пирамиды продавливания (таблица 2). Сжатая часть поверхности пирамиды продавливания зависит в свою очередь от угла наклона среза и высоты сжатой зоны. Из рассмотрения схем разрушения образцов, испытанных при кратковременном динамическом нагружении, следует, что угол среза оказался существенно больше 45° ($48^\circ \dots 52^\circ$), принятого для расчета на статическую нагрузку.

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования

| Высота плитной части | Класс бетона | Кратковременное динамическое нагружение (N_D) | | | Статическое нагружение (N_{ST}) | $\frac{N_{Dmid}}{N_{ST}}$ | $\frac{N_{ST}}{N_{СП63}}$ |
|----------------------|--------------|---|----------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | Маркировка образца и максимальные значения нагрузки (кН) и угол пирамиды продавливания (град) | | | | | |
| h=100 мм | B15 | $D_{h100}^{B15} - 1$ | $D_{h100}^{B15} - 2$ | $D_{h100}^{B15} - 3$ | $C_{h100}^{B15} - 1$ | 0,98 | 1,14 |
| | | 105,9 | 102,04 | 101,4 | $N_{ST} = 104,9$ | | |
| | | $N_{Dmid} = 103,005; \alpha_{Dmid} = 48^\circ$ | | | $\alpha_{ST} = 39$ | | |
| | B20 | $D_{h100}^{B20} - 1$ | $D_{h100}^{B20} - 2$ | $D_{h100}^{B20} - 3$ | $C_{h100}^{B20} - 1$ | 0,78 | 1,25 |
| | | 102,2 | 106,8 | 103,0 | $N_{ST} = 133,7$ | | |
| | | $N_{Dmid} = 103,953; \alpha_{Dmid} = 49$ | | | $\alpha_{ST} = 39$ | | |
| h=120 мм | B15 | $D_{h120}^{B15} - 1$ | $D_{h120}^{B15} - 2$ | $D_{h120}^{B15} - 3$ | $C_{h120}^{B15} - 1$ | 0,95 | 1,04 |
| | | 115,2 | 111,8 | 119,7 | $N_{ST} = 129,49$ | | |
| | | $N_{Dmid} = 123,68; \alpha_{Dmid} = 51$ | | | $\alpha_{ST} = 40$ | | |
| | B20 | $D_{h120}^{B20} - 1$ | $D_{h120}^{B20} - 2$ | $D_{h120}^{B20} - 3$ | $C_{h120}^{B20} - 1$ | 0,77 | 1,12 |
| | | 128,4 | 121,6 | 122,7 | $N_{ST} = 160,9$ | | |
| | | $N_{Dmid} = 124,2; \alpha_{Dmid} = 52$ | | | $\alpha_{ST} = 43$ | | |

Теоретическое исследование

Для численного моделирования узла сопряжения плиты с колонной применялся программный комплекс ATENA (лицензия 767/4 NIIZHB), который позволяет проводить физически и геометрически нелинейные расчеты железобетонных конструкций с учетом реальной работы материалов используемых при создании экспериментальных моделей.

Расчетная модель представляла собой узел сопряжения плиты перекрытия и колонны. Арматурная сетка моделировалась стержневыми конечными элементами. Данные элементы не имеют изгибной жёсткости и работают только на растяжение-сжатие. Расположение арматурных стержней строго соответствовало экспериментальным образцам.

Расчетная схема приведена на рисунке 10.

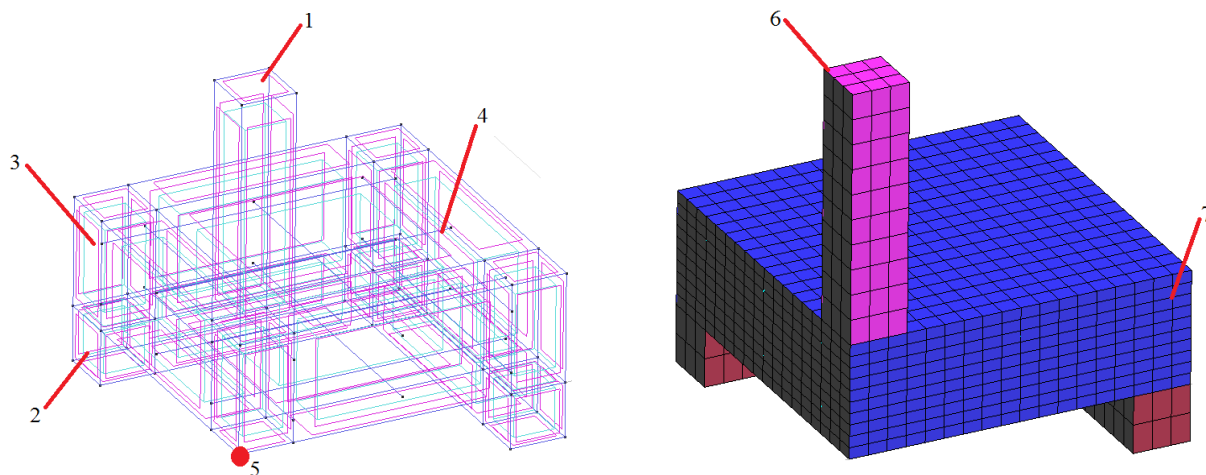


Рисунок 10 - 3D и КЭ модель из программного комплекса ATENA:
 1 – колонна; 2 – опорная плита; 3 – плита перекрытия; 4 – арматурные стержни;
 5 - точка мониторинга перемещений вдоль вертикальной оси; 6 – место приложения нагрузки;
 7 – грань закрепления образца от смещения из плоскости симметрии

Результаты численных и экспериментальных исследований дают хорошую сходимость для статических нагрузжений (таблица 3). Средняя погрешность между результатами эксперимента и результатами для КЭ моделей по максимальной разрушающей нагрузке составила 3.3%, наибольшая погрешность составила 3.57, а по показаниям относительных деформаций в арматурных стержнях для образца марки $C_{h120}^{B20} - 1$ погрешность составила 9.5%.

Таблица 3 –Сравнительный анализ результатов численного и экспериментального исследования

| № пп | Маркировка образца | $N_{ATENA}, (kN)$ | $N_{EXP}, (kN)$ | $\Delta_{ATENA}, (\%)$ |
|------|----------------------|-------------------|-----------------|------------------------|
| 1 | $C_{h100}^{B20} - 1$ | 130,1 | 133,7 | 2,2 |
| 2 | $C_{h120}^{B20} - 1$ | 164,6 | 160,93 | -2,28 |
| 3 | $C_{h100}^{B15} - 1$ | 110,6 | 107,2 | -3,2 |
| 4 | $C_{h120}^{B15} - 1$ | 136,4 | 132,3 | -3,13 |

Предложения по методике расчета

Результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований сопротивления узла сопряжения перекрытия с колонной продавливанию и анализ развития

напряженно-деформированного состояния образцов от начала нагружения до момента разрушения показали следующее:

- при наличии горизонтального армирования у большего основания пирамиды продавливания разрушение образца при образовании трещин в растянутой зоне не происходит, а образуется пара сил, формирующая сжатую зону бетона в пределах вершины пирамиды продавливания и растянутую, из нижней арматуры;
- после образования трещин в плите перекрытия сопротивление вертикальной нагрузке оказывает сжатая зона бетона, сформированная поверхностью приведенной пирамиды продавливания, как это показано на рисунке 11;
- бетон сжатой зоны, в контурах приведенной пирамиды продавливания, работает на срез с обжатием;
- сопротивление бетона срезу увеличивается за счет обжимающих усилий [21].

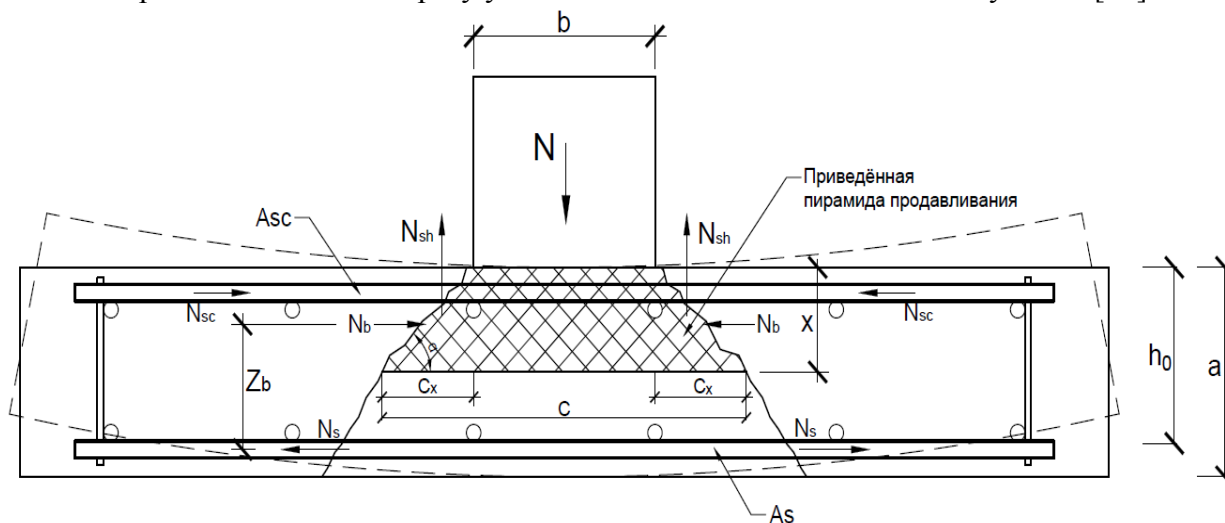


Рисунок 11 - Схема напряженно-деформированного состояния симметричного сопряжения плиты с колонной при разрушении от продавливания

Для подтверждения принятых положений к формированию расчетной схемы при центральном продавливании проведем численные исследования с использованием экспериментальных данных.

Условие равновесия продольных сил в контуре ограниченного одной грани поверхности пирамиды продавливания по высоте сечения плиты для контроля высоты сжатой зоны бетона x_i запишется:

$$N_{bi} + N_{sci} - N_{si} = 0 \quad (1)$$

где N_{bi} – продольное усилие в бетоне сжатой зоны i -ой грани; N_{si} – продольное усилие в растянутой арматуре в контуре боковой грани поверхности пирамиды; N_{sci} – продольное усилие в сжатой арматуре в контуре боковой грани поверхности пирамиды.

Условие прочности на продавливание:

$$N_{sh} = R_{sh,red} * A_{b,red} \quad (2)$$

где $R_{sh,red}$ – приведенная прочность бетона на срез равная

$$R_{sh,red} \approx 2 * R_{bt} * k, \quad (3)$$

здесь R_{bt} – сопротивление бетона на растяжение осевое.

k – коэффициент увеличения прочности на срез при наличии бокового обжатия, принимается по рекомендациям [21]; A_{red} – боковая поверхность приведенной пирамиды продавливания:

$$A_{red} = \frac{4x_i}{\sin \alpha} \left(b + \frac{x_i \cos \alpha}{\sin \alpha} \right), \quad (4)$$

где x_i - высота сжатой зоны в расчетном сечении.

α – угол наклона боковой грани пирамиды продавливания

При динамическом нагружении будем пользоваться также выражениями (1)-(4) с полученными значениями высоты сжатой зоны и угла наклона пирамиды продавливания.

Результаты численных исследований по предлагаемой расчетной схеме представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты численных исследований по предлагаемой расчетной схеме

| Марка образца | α , град. | $\xi_{эксп}$ | σ_s , МПа | σ_{sc} , МПа | σ_b , МПа | R_{sh} , МПа | $N_{эксп}$, кН | $N_{теор}$, кН | $\frac{N_{теор}}{N_{эксп}}$ |
|--------------------------------|------------------|--------------|------------------|---------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| Статическое нагружение | | | | | | | | | |
| C_{h100}^{b15} | 39 | 0,32 | 105,53 | 85,86 | 4,616 | 4,57 | 104,9 | 97,4 | 0,93 |
| C_{h120}^{b15} | 40 | 0,39 | 200,93 | 147,66 | 8,615 | 3,84 | 129,49 | 135,1 | 1,04 |
| C_{h100}^{b20} | 39 | 0,4 | 475,6 | 182,76 | 10,46 | 4,87 | 133,2 | 138,2 | 1,04 |
| C_{h120}^{b20} | 43 | 0,43 | 500 | 202,55 | 11,884 | 4,29 | 160,9 | 158,6 | 0,98 |
| Динамическое нагружение | | | | | | | | | |
| D_{h100}^{b15} | 48 | 0,42 | 219,23 | 156,99 | 7,665 | 4,21 | 104,15 | 97,6 | 0,94 |
| D_{h120}^{b15} | 51 | 0,41 | 326,45 | 242,34 | 9,63 | 3,77 | 115,56 | 109,4 | 0,95 |
| D_{h100}^{b20} | 49 | 0,35 | 217,37 | 103,17 | 6,495 | 5,48 | 104,5 | 101,5 | 0,97 |
| D_{h120}^{b20} | 51 | 0,42 | 496,6 | 203,01 | 11,66 | 4,34 | 122,15 | 124,2 | 1,02 |

Выводы

1. Результаты экспериментальных и численных исследований на основе метода конечных элементов показали, что при центральном продавливании при наличии нижней арматуры плиты в предельной стадии по несущей способности сопротивление срезу оказывает приведенная поверхность пирамиды продавливания, имеющая высоту равной высоте сжатой зоны бетона. При этом сопротивление срезу существенно повышается за счет бокового обжатия.

2. Максимальные значения нагрузки для проведенных испытаний составили: при кратковременном динамическом воздействии от 101,043 кН до 128,413 кН; при статическом воздействии от 104,967 кН до 160,927 кН. Снижение несущей способности перекрытия на продавливание при времени нагружения от нуля до разрушения 4мс по сравнению со статическим приложением нагрузки в среднем составило 15%;

3. Установлено, что угол наклона пирамиды продавливания при центральном приложении нагрузки к экспериментальным образцам зависит от вида воздействия: при динамическом нагружении 50-52°, при статическом нагружении 39-45°. Схема разрушения при высокоскоростном нагружении по характеру аналогична разрушению при статическом нагружении.

4. Сформулированы предложения по совершенствованию методики расчета прочности плит при центральном продавливании статической и динамической нагрузкой, основанная на фактической схеме разрушения при наличии двойного продольного армирования в плитах перекрытия, условиях равновесия внутренних и внешних усилий с учетом увеличения прочностных свойств бетона при сложном напряженном состоянии.

5. Используя результаты теоретических и экспериментальных исследований выявлены причины снижения несущей способности при динамическом нагружении вследствие снижения поверхности среза сжатой части пирамиды продавливания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 89 – 95.
2. Однокопылов Г.И. Саркисов Д.Ю., Бутузов Е.А. Оценка степени живучести ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 12. С. 122 – 135.
3. Трекин Н.Н., Крылов В.В. К вопросу о несущей способности железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении на объектах наземной космической инфраструктуры // Научный аспект. 2018. Т. 7. № 4. С. 771.
4. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты». Одесса: ОНМУ, 2011.
5. Бирбраер А.Н, Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. 2009.
6. Крылов В.В. Проверка несущей способности монолитной железобетонной плиты на продавливание при действии динамической нагрузки // Научный аспект. 2019. Т. 3. № 3. С. 320 – 325.
7. Крылов В.В., Саркисов Д.Ю., Эргешов Э.Т., Евстафьева Е.Б. Программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении. Конструкция опытных образцов // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3.
8. Патент на изобретение № 2726031. Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременной динамической нагрузке.
9. Sarkisov D.Yu. , Odnokopylov G.I., Krylov V.V., Annenkov A.O. Numerical and experimental studies of deflections of conventional and strengthened reinforced concrete bendable elements under short-term dynamic loading // INCAS BULLETIN. 2021. Vol. 13. Special Issue. https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov_odnokopylov_krylov_all_vol_13_special_iss.pdf
10. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 208. 110336. Pp. 1-19. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110336>
11. Alejandro Pérez Caldentey, Yolanda G. Diego, Freddy Ariñez Fernández, Anastasio P. Santos, Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // Engineering Structures. 2021. Vol. 240, 112411. Pp. 1-17. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112411>
12. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan, Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies // Engineering Structures. 2021. Vol. 229. 111639. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111639>.
13. Mohamed Eladawy, Mohamed Hassan, Brahim Benmokrane, Emmanuel Ferrier, Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab–column connections reinforced with GFRP bars // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. 109978. Pp. 1-15. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109978>
14. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces // Engineering Structures. 2021. Vol. 231. 111787. Pp. 1-14. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111787>
15. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 173. 106254. Pp. 1-16. ISSN 0143-974X. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106254>
16. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading // Engineering Structures. 2020. Vol. 206. 110125. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>.
17. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. Pp. 822-830. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085>
18. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-Punching Behavior of Flat Slabs // ACI Structural Journal. USA, 2013. Vol. 110. Pp. 801-812. <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
19. Melo G.S. «Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure» PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990. 214 p. <https://www.researchgate.net/publication/352157118>
20. More R.S., Sawant V.S. Analysis of Flat Slab. July 2015. Vol. 4. Issue 7. ISSN: 2319-7064. https://www.ijsr.net/get_abstract.php
21. Петров А.Н. Экспериментальные исследования бетона при нагружении сжатием и срезом // Бетон и железобетон. 1965. № 11. С. 34-37.

REFERENCES

1. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Ocenka parametrov razrushayushhej nagruzki pri udarno-volnovom nagruzhении dlya otvetstvenny`x stroitel`ny`x konstrukcij sooruzhenij neftegazovogo kompleksa // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov. 2017. T. 328. No. 3. Pp. 89 – 95.
2. Odnokopylov G.I. Sarkisov D.Yu., Butuzov E.A. Ocenka stepeni zhivuchesti otvetstvenny`x stroitel`ny`x konstrukcij pri udarno-volnovom nagruzhении // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov. 2018. T. 329. No. 12. Pp. 122 – 135.
3. Trekin N.N., Krylov V.V. K voprosu o nesushhej sposobnosti zhelezobetonny`x plit na prodavlivanie pri dinamicheskom nagruzhении na ob`ektax nazemnoj kosmicheskoy infrastruktury // Nauchny`j aspekt. 2018. T. 7. No. 4. Pp. 771.
4. Klovanich S.F., Shexovczov V.I. Prodavlivanie zhelezobetonny`x plit. Naturny`j i chislenny`j e`ksperimenty». Odessa: ONMU, 2011.
5. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. E`kstremal`ny`e vozdejstviya na sooruzheniya. 2009.
6. Krylov V.V. Proverka nesushhej sposobnosti monolitnoj zhelezobetonnoj plity` na prodavlivanie pri dejstvii dinamicheskoy nagruzki // Nauchny`j aspekt. 2019. T. 3. No. 3. Pp. 320 – 325.
7. Krylov V.V., Sarkisov D.Yu., E`rgeshov E.T., Evstaf`eva E.B. Programma e`ksperimental`ny`x issledovaniy nesushhej sposobnosti bezbalochny`x plit na prodavlivanie pri dinamicheskom nagruzhении. Konstrukciya opy`tny`x obrazczov // Stroitel`ny`e materialy` i izdeliya. 2020. T. 3. No. 3.
8. Patent na izobretenie № 2726031. Stend dlya ispy`taniya zhelezobetonny`x e`lementov na prodavlivanie pri kratkovremennoj dinamicheskoy nagruzke.
9. Sarkisov D.Yu., Odnokopylov G.I., Krylov V.V., Annenkov A.O. Numerical and experimental studies of deflections of conventional and strengthened reinforced concrete bendable elements under short-term dynamic loading // INCAS BULLETIN. 2021. Vol. 13. Special Issue. https://bulletin.incas.ro/files/sarkisov_odnokopylov_krylov_all_vol_13_special_iss.pdf
10. Jun Yu, Li-zhong Luo, Qin Fang. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 208. 110336. Pp. 1-19. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110336>
11. Alejandro Pérez Caldentey, Yolanda G. Diego, Freddy Ariñez Fernández, Anastasio P. Santos, Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // Engineering Structures. 2021. Vol. 240, 112411. Pp. 1-17. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112411>
12. Jinjie Men, Liquan Xiong, Jiachen Wang, Guanlei Fan, Effect of different RC slab widths on the behavior of reinforced concrete column and steel beam-slab subassemblies // Engineering Structures. 2021. Vol. 229. 111639. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111639>.
13. Mohamed Eladawy, Mohamed Hassan, Brahim Benmokrane, Emmanuel Ferrier, Lateral cyclic behavior of interior two-way concrete slab–column connections reinforced with GFRP bars // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. 109978. Pp. 1-15. ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109978>
14. Deifalla A. A mechanical model for concrete slabs subjected to combined punching shear and in-plane tensile forces // Engineering Structures. 2021. Vol. 231. 111787. Pp. 1-14. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111787>
15. Yu J.L., Wang Y.C. Modelling and design method for static resistance of a new connection between steel tubular column and flat concrete slab // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 173. 106254. Pp. 1-16. ISSN 0143-974X. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106254>
16. Kumar V., Kartik K.V., Iqbal M.A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading // Engineering Structures. 2020. Vol. 206. 110125. Pp. 1-13. ISSN 0141-0296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>.
17. Mao L., Barnett S.J., Tyas A., Warren J., Schleyer G.K., Zaini S.S. Response of small scale ultra high performance fibre reinforced concrete slabs to blast loading // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. Pp. 822-830. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.085>
18. Fernández Ruiz M., Mirzaei Y., Muttoni A. Post-Punching Behavior of Flat Slabs // ACI Structural Journal. USA, 2013. Vol. 110. Pp. 801-812. <https://www.researchgate.net/publication/283905342>
19. Melo G.S. «Behaviour of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure» PhD thesis, Polytechnic of Central London, London, UK, 1990. 214 p. <https://www.researchgate.net/publication/352157118>
20. More R.S., Sawant V.S. Analysis of Flat Slab. July 2015. Vol. 4. Issue 7. ISSN: 2319-7064. https://www.ijsr.net/get_abstract.php
21. Petrov A.N. E`ksperimental`ny`e issledovaniya betona pri nagruzhении szhatiem i srezom // Beton i zhelezobeton. 1965. No. 11. Pp. 34-37.

Информация об авторах:

Трекин Николай Николаевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: nik-trekin@yandex.ru

Саркисов Дмитрий Юрьевич

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: Milandd@yandex.ru

Крылов Владимир Владимирович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
аспирант.
E-mail: albet-group@yandex.ru

Евстафьева Елизавета Борисовна

ООО «Научно-проектное бюро «Конструктивные решения»», г. Москва, Россия
начальник отдела научного сопровождения.
E-mail: npb-kr@yandex.ru

Андрян Константин Рашидович

АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,
инженер.
E-mail: andryankr@mail.ru

Information about authors:

Trekin Nikolai N.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
doctor of technical sciences, professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structure.
E-mail: nik-trekin@yandex.ru

Sarkisov Dmitry Yu.

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structure
E-mail: Milandd@yandex.ru

Krylov Vladimir V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
graduate student.
E-mail: albet-group@yandex.ru

Yvstafieva Elizaveta B.

LLC «Scientific Design Bureau «Constructive Solutions», Moscow, Russia,
head of Scientific and Technical Support Department.
E-mail: ipevstafeva@yandex.ru

Andrian Konstantin R.

JSC «Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy», Moscow, Russia,
engineer.
E-mail: andryankr@mail.ru