



З. Ш. ГАЛЯУТДИНОВ

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ В ЗОНЕ ПРОДАВЛИВАНИЯ

NUMERICAL STUDY OF REINFORCED CONCRETE PLATES
IN THE PRESSURE AREA

Представлено описание конечно-элементных моделей узлов сопряжения железобетонной плиты с колонной, выполненных в ПК SIMULIA ABAQUS. Варьируемыми параметрами являлись отношения сторон колонны c_{max}/c_{min} и отношения стороны колонны к рабочей высоте сечения c/h_0 . Расчёт выполнен в нелинейной постановке. Конечно-элементные модели показали реалистичное поведение: была зафиксирована пирамида продавливания. Обнаружена значительная неравномерность в распределении тангенциальных деформаций, а также главных сжимающих деформаций бетона на сжатой грани плиты по периметру колонны. Установлено, что характер образования и развития пирамиды продавливания зависит от величины отношения сторон сечения колонны c_{max}/c_{min} и отношения стороны колонны к рабочей высоте сечения плиты c/h_0 .

Ключевые слова: продавливание, плоская плита, прямоугольная колонна

При проектировании монолитных безбалочных каркасов зданий особое внимание уделяется расчету на продавливание плит перекрытия в узлах сопряжения с колоннами. Исследования работы плоских железобетонных плит при продавливании проводятся достаточно давно в нашей стране и за рубежом [1–5] и в настоящее время сохраняют свою актуальность, поскольку в процессе исследований выявляются новые параметры, влияющие на несущую способность плит [6–9].

Напряженно-деформированное состояние монолитной плиты в области, прилегающей

Here is the description of finite element models of joints between reinforced concrete slab and column, made in the SIMULIA ABAQUS software package. The variable parameters were the ratio of the sides of the column c_{max}/c_{min} and the ratio of the side of the column to the effective depth c/h_0 . The calculation is performed in a non-linear formulation. Finite element models showed realistic behavior: a punching shear pyramid was detected. It was found a significant unevenness in the distribution of tangential deformations, as well as the main compressive deformations of the concrete slab near the column. The nature of the formation and development of the punching shear pyramid depends on the value of the ratio of the sides of the column c_{max}/c_{min} and the ratio of the side of the column to the effective depth slab c/h_0 .

Keywords: punching, flat slab, rectangular column

к колонне, имеет особенности, связанные с тем, что колонна для плиты является жёстким включением, которое препятствует свободному деформированию плиты. Степень этого влияния зависит, в том числе, и от формы поперечного сечения колонны [10]. Естественная форма деформирования плиты, нагруженной равномерно-распределённой нагрузкой, имеет чашевидное очертание. Поэтому, когда плита опирается на круглую колонну, деформации по периметру колонны распределяются относительно равномерно, вследствие чего в плите не возникает

концентрации деформаций. Когда же плита опирается на прямоугольную колонну, то углы колонны являются участками концентрации деформаций при изгибе плиты и нагрузка от плиты передаётся на колонну неравномерно, что приводит к перераспределению усилий в приопорной зоне плиты.

Для детального исследования работы монолитных железобетонных плит в зоне продавливания была проведена серия численных экспериментов на конечно-элементных (КЭ) моделях в ПК Simulia Abaqus, в котором есть возможность учесть реальную нелинейную диаграмму деформирования бетона, в том числе ее ниспадающую ветвь. ПК Abaqus широко используется в научных исследованиях, изучающих работу железобетонных конструкций, в том числе при работе на продавливание [11, 12], и показывает хорошую сходимость качественной и количественной картин натурального и численного экспериментов.

Численное исследование выполнялось на двух сериях конечно-элементных моделей:

– **Серия I** состоит из четырёх моделей. Конструктивные параметры и схема нагружения моделей соответствуют опытным образцам, испытанным в физическом эксперименте [13, 14] (табл. 1). Варьируемым параметром в серии I является отношение большей стороны колонны к меньшей c_{\max}/c_{\min} , которое изменяется от 1 до 4.

– **Серия II** состоит из четырёх моделей. Конструктивные параметры и схема нагружения моделей соответствуют опытному образцу КСП-1 [13, 14] и отличаются от него только размером поперечного сечения колонны (табл. 2). Также модель КСП-1-5-КЭ отличается количеством продольных стержней в колонне – 12 продольных стержней (4 вдоль каждой грани). Варьируемым параметром в серии II является отношение стороны колонны к рабочей высоте сечения плиты c/h_v , которое изменяется от 1 до 5.

Таблица 1

Соответствие образцов серии I в численном и физическом экспериментах

Марка КЭ модели в численном эксперименте	Марка соответствующего образца в физическом эксперименте	Размер сечения колонны, мм	Отношение сторон колонны c_{\max}/c_{\min}
КСК-КЭ	КСК	Круглая Ø 210	-
КСП-1-КЭ	КСП-1	200x200	1
КСП-2,5-КЭ	КСП-2,5	200x500	2,5
КСП-4-КЭ	КСП-4	200x800	4

Таблица 2

Геометрические параметры образцов серии II

Марка КЭ модели в численном эксперименте	Размер колонны, мм	h_v , мм	c/h_v , мм
КСП-1-1-КЭ	110x110	110	1
КСП-1-1,8-КЭ	200x200	110	1,82
КСП-1-3,6-КЭ	400x400	110	3,64
КСП-1-5-КЭ	550x550	110	5

Задача является симметричной, поэтому моделировалась только четверть образцов (рис. 1), реакции отброшенных частей компенсировались наложением связей. На верхней грани плиты моделировались металлические пластины, которые посредством тяг передавали нагрузку на плиту образца. На нижний узел тяг накладывалась связь, исключающая перемещение по вертикальной оси. Сетка конечных элементов принята размером 7 мм в соответствии с работой [15].

В конечно-элементных моделях предусматривалась арматура плиты и колонны. Моделировались нижняя и верхняя арматурные сет-

ки плиты, продольная и поперечная арматура колонны (рис. 2). Арматура плиты в различных направлениях располагалась на различной глубине, отличающейся на величину диаметра арматуры. Арматурные стержни моделировались конечным элементом «балка» (B31), т. е. учитывалась работа стержня на изгиб. Бетон моделировался объёмными конечными элементами (C3D8R).

Нагружение образцов производилось монотонно возрастающей равномерно-распределённой нагрузкой, действующей на нижней грани колонны. Расчёт проводился в динамическом решателе Explicit. Для реализации ква-

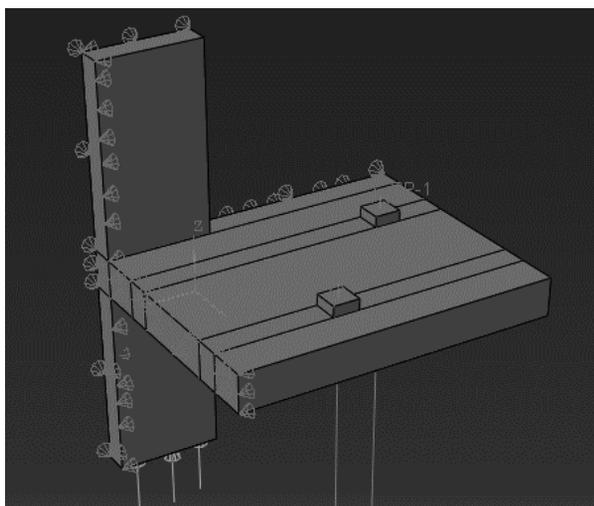


Рис. 1. Общий вид модели КСП-4-КЭ

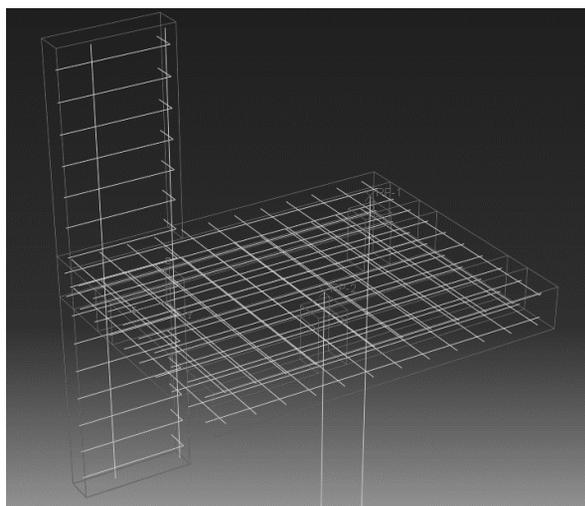


Рис. 2. Армирование модели КСП-4-КЭ

зистатического нагружения кинетическая энергия рассматриваемой системы должна быть минимальной. Для этого использовался встроенный инструмент искусственного «утяжеления» модели «mass scaling» (параметр «Target Time Increment» равен 0,0005, время нагружения 30 секунд).

Модель деформирования бетона и арматуры

В работе принята модель пластического разрушения бетона с повреждениями – concrete damage plasticity (CDP). Модель CDP позволяет учесть повреждения бетона на ветви разгрузки путем уменьшения модуля упругости. Величину уменьшения определяют коэффициенты повреждения бетона при растяжении (d_t) и сжатии (d_c). Поэтому в модели CDP возможен учёт обратимых «пластических» деформаций бетона – трещин. В модели CDP используется критерий разрушения Люблинера [16] с дополнениями, предложенными Ли и Фенвесом [17]. В данной критерии учитывается увеличение прочности (напряжений при разрушении) при двухосном и трёхосном напряженном состоянии по сравнению с одноосным.

Диаграмма деформирования бетона принималась согласно методическому пособию [18]. При этом соблюдались следующие требования:

- согласно методике [18], максимальные деформации бетона ограничиваются точкой на ниспадающей ветви, соответствующей напряжениям 0,85 от предела прочности материала. Это связано с тем, что данная методика является в первую очередь инженерной и даёт консервативную оценку. В данном исследовании

максимальные деформации сжатой ветви ограничивались значением 8000×10^{-6} ЕОД, растянутой ветви – 800×10^{-6} ЕОД;

- в качестве предела прочности бетона на сжатие принята призмная прочность бетона (получена по результатам испытаний призм);

- прочность бетона на растяжение принята по формуле $R_{bt} = 0,232 \sqrt{R_m^2}$, где R_m – среднее значение кубиковой прочности бетона (получена по результатам испытаний бетонных кубов);
- начальный модуль упругости бетона принят по табл. 6.11 СП 63.13330.2018 с применением коэффициента 0,85, который учитывает не продолжительное действие нагрузки.

Диаграмма деформирования арматуры принята двухлинейной согласно СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». В качестве предела текучести принималось нормативное значение сопротивления арматуры растяжению $R_{s,л} = 500$ МПа. Значение величины модуля упругости арматуры принято $E_s = 206000$ МПа. Для возможности обработки программным комплексом данной диаграммы площадка текучести на диаграмме была задана с незначительным упрочнением. Это соответствует фактической диаграмме арматуры класса А500.

Разрушающая нагрузка

Разрушающая нагрузка в численном эксперименте определялась как максимальное значение суммы реакций опор на тягах, удерживающих образец и представлена в табл. 3, 4. Также была определена теоретическая несущая способность образцов согласно методике СП 63.13330.2018.

Для **серии I** отношение $\frac{P_{\text{разр,КЭ}}}{P_{\text{теор.}}}$ находится в пределах от 0,72 до 1,04. При этом для образцов с квадратной и прямоугольными колоннами отношение $\frac{P_{\text{разр,КЭ}}}{P_{\text{теор.}}}$ уменьшается с ростом отношения $c_{\text{max}}/c_{\text{min}}$. Так, для образца КСП-2,5-КЭ оно составляет 91 % по сравнению с КСП-1-КЭ, а для образца КСП-4-КЭ – 70 %.

Для **серии II** отношение $\frac{P_{\text{разр,КЭ}}}{P_{\text{теор.}}}$ находится в пределах от 0,82 до 1,04. При этом оно уменьшается с ростом отношения размера грани колонны к рабочей высоте плиты c/h_0 и для образца КСП-1-5-КЭ ($c/h_0 = 5$) составляет 79 % от величины $\frac{P_{\text{разр,КЭ}}}{P_{\text{теор.}}}$ для образца КСП-1-1-КЭ ($c/h_0 = 1$).

Таблица 3
Опытная и теоретическая несущая способность образцов серии I

Марка образца	$P_{\text{разр,КЭ}}$, кН	$P_{\text{теор.}}$, кН	$\frac{P_{\text{разр,КЭ}}}{P_{\text{теор.}}}$
КСК-КЭ	258,6	249,8	1,04
КСП-1-КЭ	280,0	272,8	1,03
КСП-2,5-КЭ	296,6	316,6	0,94
КСП-4-КЭ	349,2	483,1	0,72

Таблица 4
Опытная и теоретическая несущая способность образцов серии II

Марка образца	$P_{\text{разр,КЭ}}$, кН	$P_{\text{теор.}}$, кН	$\frac{P_{\text{разр,КЭ}}}{P_{\text{теор.}}}$
КСП-1-1-КЭ	200,5	193,6	1,04
КСП-1-1,8-КЭ	280,0	272,8	1,03
КСП-1-3,6-КЭ	394,1	448,8	0,88
КСП-1-5-КЭ	477,3	580,8	0,82

Трещиностойкость плит конечно-элементных моделей

На рис. 3 изображена схема трещин для образца КСП-4-КЭ при различных уровнях нагружения. Показано, что трещины образовывались и развивались по мере нагружения образца. Отметим, что трещины, как правило, были шириной в один конечный элемент, а не распределены на всей растянутой грани бетона. Это соответствует реальной работе бетона, когда с достижением предельных напряжений растяжению образуется трещина и при этом «снимается» напряжение со смежных участков бетона. Видно, что преобладают трещины радиального направления, расположенные над стержнями продольной арматуры с шагом 100 мм.

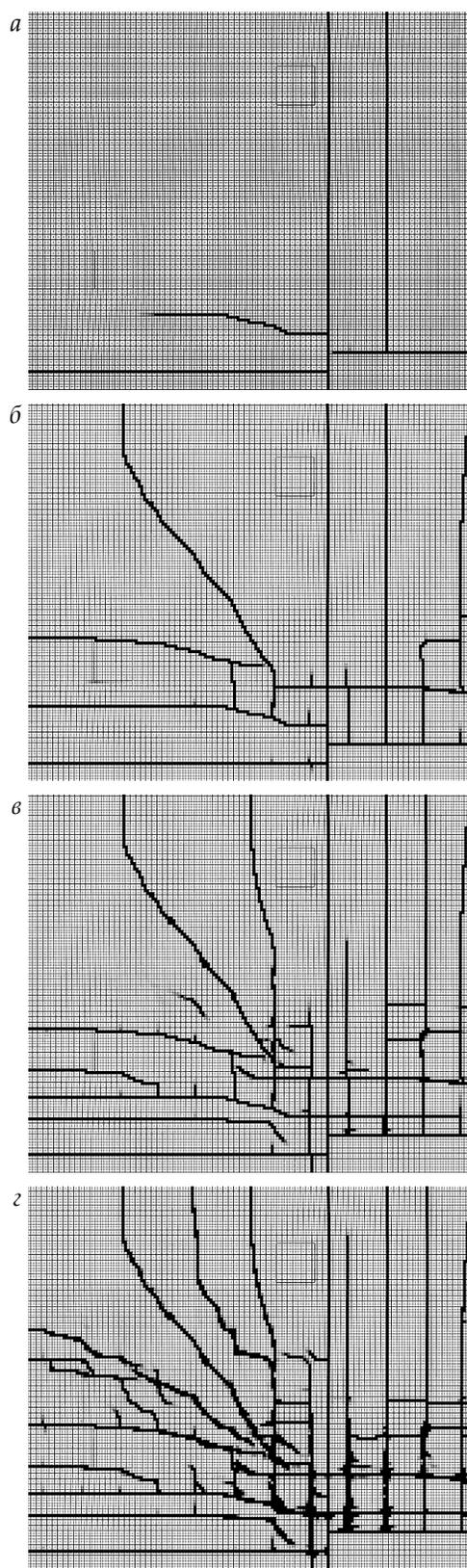


Рис. 3. Схема расположения трещин образца КСП-4-КЭ при нагрузке:
а – 0,3 $P_{\text{разр}}$; б – 0,5 $P_{\text{разр}}$; в – 0,7 $P_{\text{разр}}$; г – 0,9 $P_{\text{разр}}$.

Анализ напряженно-деформированного состояния конечно-элементных моделей

Для изучения напряженно-деформированного состояния бетона в области сопряжения плиты с колонной были построены изополя главных сжимающих деформаций на сжатой грани плиты. При анализе изополей отмечены некоторые характерные особенности деформирования бетона на сжатой грани плиты.

Для **серии I** в моделях с круглой и квадратной колоннами (КСК-КЭ и КСП-1-КЭ соответственно) деформации в непосредственной близости у колонны распределены относительно равномерно (рис. 4). При этом в модели с со-

отношением сторон c_{max}/c_{min} , равным 2,5 (КСП-2,5-КЭ), наблюдается рост деформаций плиты возле угла колонны и значительное (в несколько раз) снижение величины деформаций у середины длинной стороны колонны. В модели с соотношением сторон c_{max}/c_{min} , равным 4 (КСП-4-КЭ), наблюдается рост деформаций у короткой стороны колонны и значительное падение величины деформаций вдоль длинной стороны колонны на участке длиной примерно $1/6 c_{max}$ (c_{max} – полная длина колонны), а деформации у середины длинной стороны колонны практически равны нулю.

Отмеченные характерные особенности деформирования бетона на сжатой грани плиты

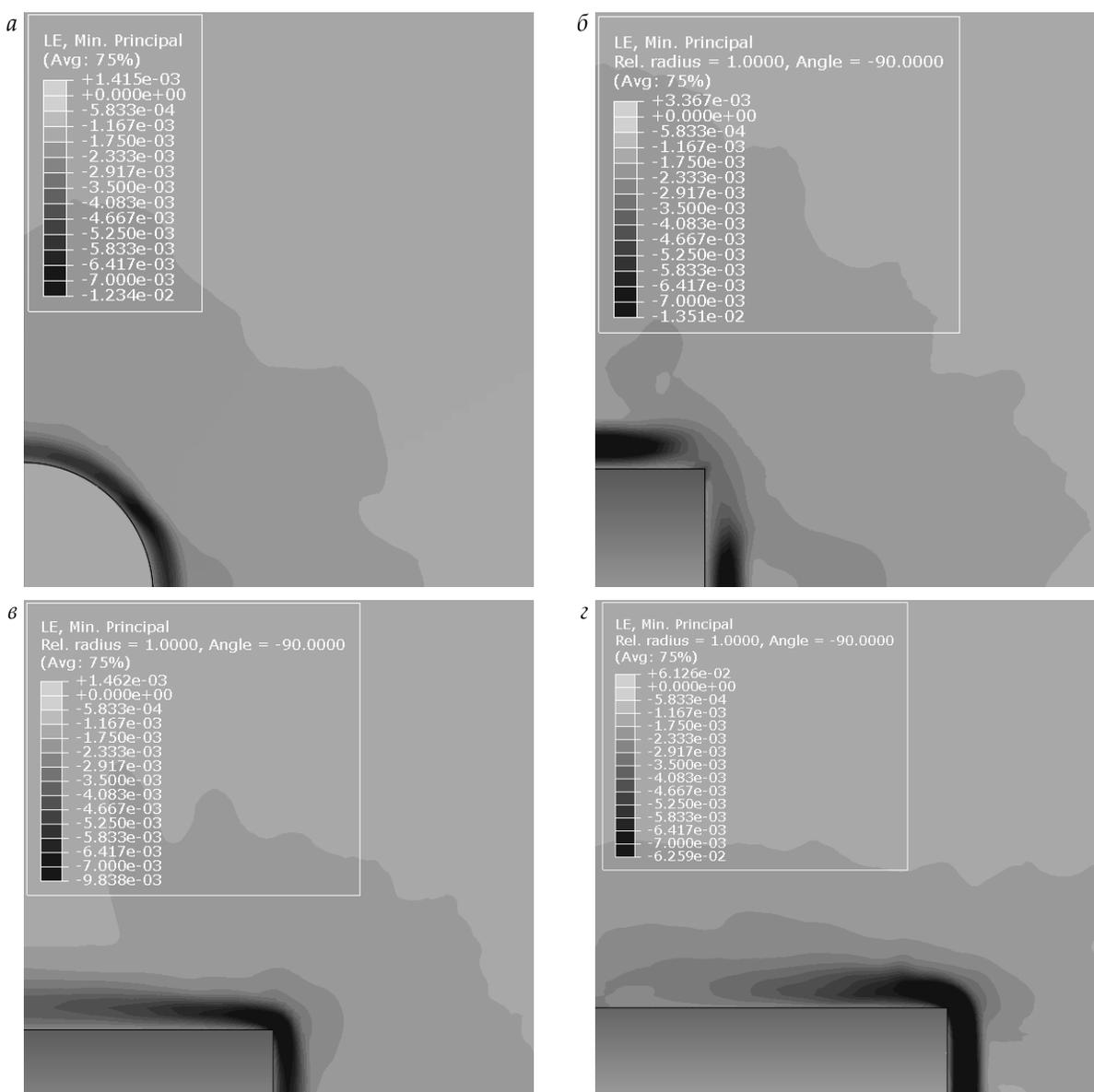


Рис. 4. Изополя главных деформаций бетона на сжатой грани плиты при нагрузке $0,9P_{раз}$ для моделей: а – КСК-КЭ; б – КСП-1-КЭ; в – КСП-2,5-КЭ; г – КСП-4-КЭ

показывают, что неравномерность распределения усилий в зоне продавливания плиты увеличивается с увеличением отношения сторон колонны. В работах [19, 20] также отмечается неравномерность в распределении усилий при продавливании плит колоннами-пилонами.

Для моделей **серии II** отмечено, что на сжатой грани бетона плиты также наблюдается значительная неравномерность в распределении деформаций при всех уровнях нагрузки (рис. 5).

В модели с отношением $c/h_0 = 1$ (КСП-1-1-КЭ) деформации распределены равномерно, а для образцов с большим значением c/h_0 наблюдается рост деформаций возле угла колонны

и падение деформаций у середины стороны колонны. Эта неравномерность увеличивается с ростом отношения c/h_0 . Отметим, что для трех образцов при $c/h_0 > 1$ зона, где наблюдается рост деформаций, имеет одинаковый размер, не зависящий от размера колонны. Размер этой зоны примерно равен $h_0 \times 0,5h_0$.

Исследовалось направление главных сжимающих деформаций на сжатой грани бетона плиты. Установлено, что на большей части плиты главные сжимающие деформации были ориентированы в тангенциальном направлении. Исключение составляет область непосредственно у линии сопряжения плиты с колонной (ширина зоны 30–60 мм). Также таким

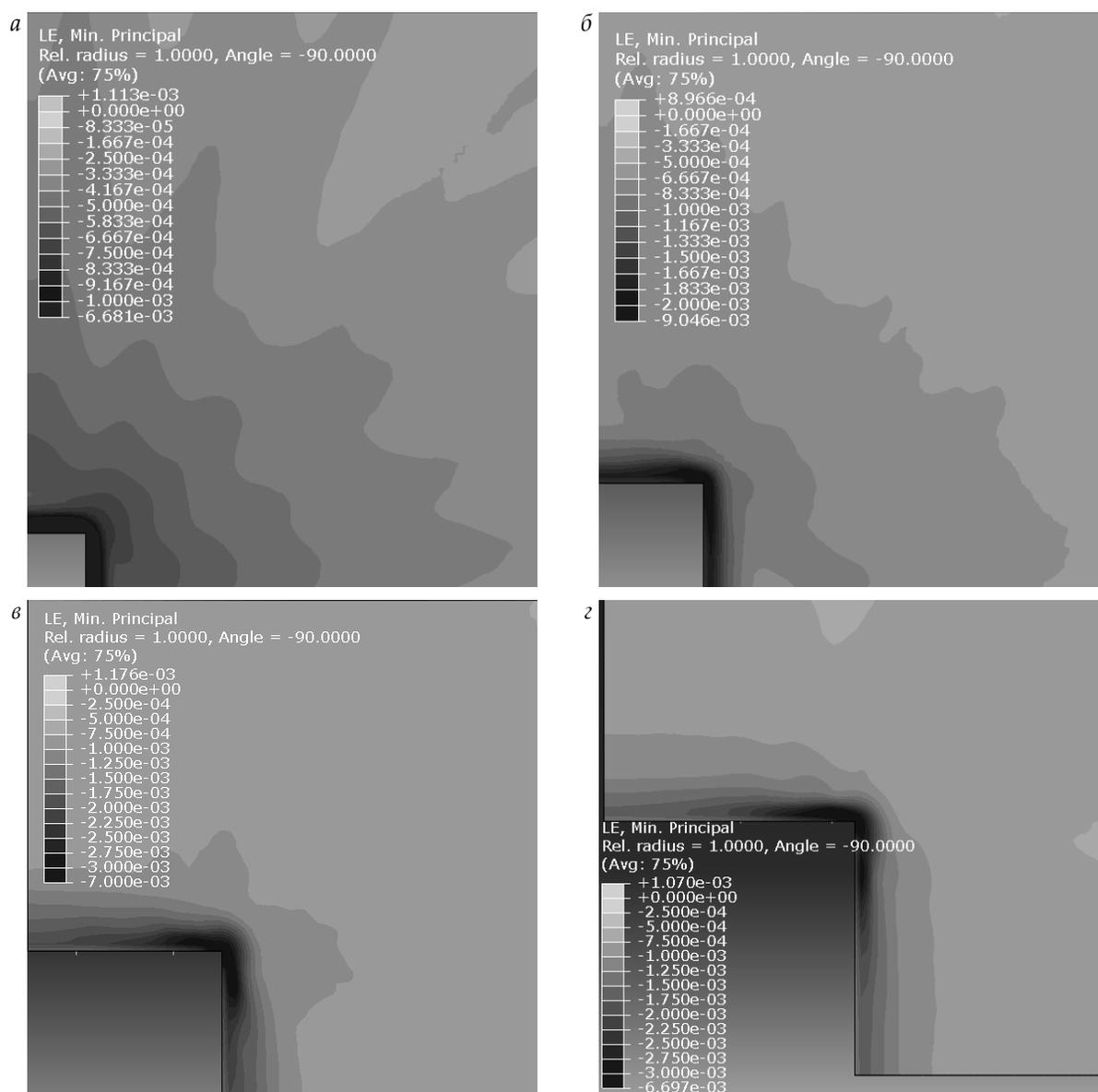


Рис. 5. Изополя главных деформаций бетона на сжатой грани плиты при нагрузке $0,7P_{разр}$ для моделей: а – КСП-1-1-КЭ; б – КСП-1-1,8-КЭ; в – КСП-1-3,6-КЭ; з – КСП-1-5-КЭ

исключением для модели КСП-4-КЭ является область, расположенная по оси симметрии длинной стороны колонны. Из вышесказанного следует, что тангенциальные деформации вносят весомый вклад в общее напряжённо-деформированное состояние плиты, что качественно отличает работу плиты на продавливание от работы балки на действие перерезывающих сил, где тангенциальные деформации отсутствуют вовсе.

Неравномерность в распределении усилий в плите по периметру колонны с ростом соотношения сторон колонны является причиной различия в образовании и развитии пирамиды продавливания для различных моделей. Так, было установлено, что в моделях **серии I** с колоннами круглого и квадратного сечения пирамида продавливания образуется сначала вдоль направления с большей изгибной жесткостью, которое соответствует арматуре с большей рабочей высотой сечения, и затем вдоль направления с меньшей изгибной жесткостью. Однако эти явления происходили с небольшой разницей во времени (уровне нагружения) и не были ярко выражены, поэтому в целом можно сказать, что для моделей с круглой и квадратной колоннами пирамида продавливания образуется одновременно вдоль всего контура продавливания.

В моделях с прямоугольной колонной пирамида продавливания сначала образуется

у короткой стороны колонны, а затем распространяется вдоль длинной стороны колонны. И неравномерность в образовании пирамиды продавливания увеличивается с ростом отношения сторон колонны. Так, для модели КСП-4-КЭ пирамида продавливания начинает образовываться при нагрузке $0,5P_{разр.}$ возле короткой стороны колонны и на части длинной стороны колонны, и затем она распространяется вдоль длинной стороны колонны, однако отсутствует у середины длинной стороны колонны даже при нагрузке $0,9P_{разр.}$ (рис. 6). Это говорит о значительной неравномерности в распределении усилий в зоне продавливания для прямоугольных колонн.

В моделях **серии II** исследовалась пирамида продавливания в двух сечениях: по оси симметрии модели (а), в сечении возле угла колонны (б) (рис. 7).

Пирамида продавливания в моделях КСП-1-1-КЭ и КСП-1-1,8-КЭ ($c/h_0 = 1$ и $1,8$ соответственно) образуется одновременно вдоль всего контура продавливания. А в моделях КСП-1-3,6-КЭ и КСП-1-5-КЭ ($c/h_0 = 3,6$ и 5 соответственно) из-за большого размера стороны колонны по сравнению с толщиной плиты пирамида продавливания сначала образуется возле угла колонны, а затем продолжает развитие к середине стороны колонны. С ростом отношения величины c/h_0 отмеченная особенность проявляется более значительно.

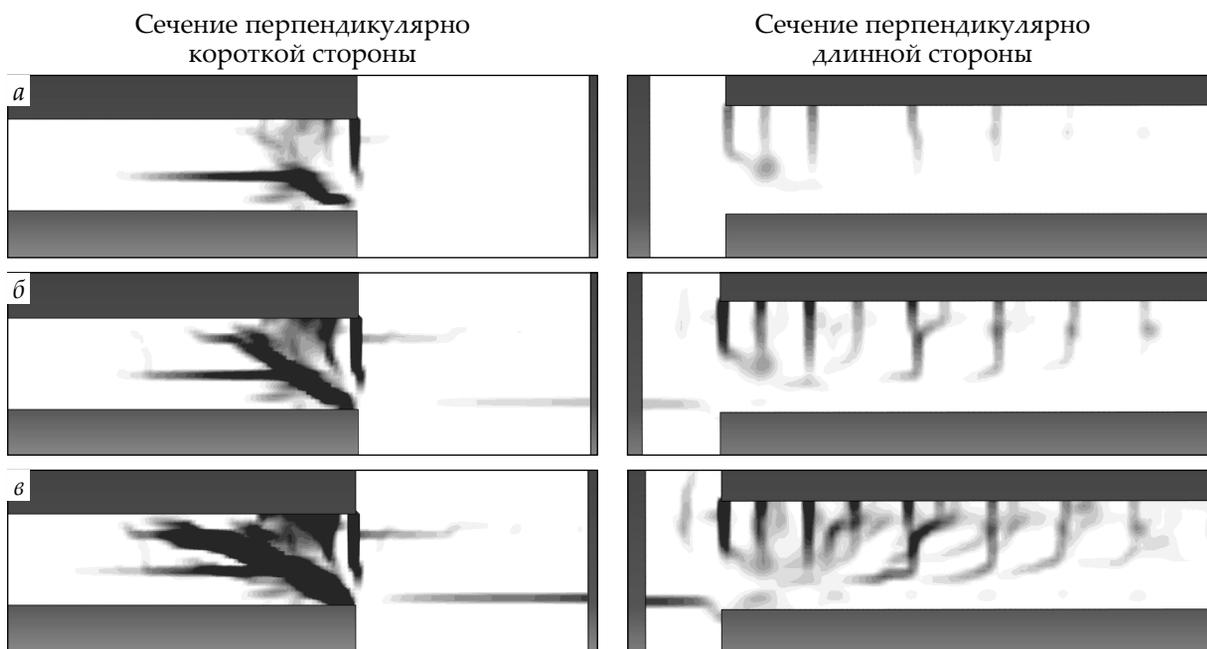


Рис. 6. Пирамида продавливания модели КСП-4-КЭ при нагрузке:
 $a - 0,5P_{разр.}$, $b - 0,7P_{разр.}$, $c - 0,9P_{разр.}$.

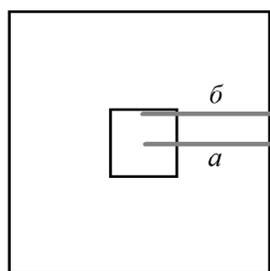


Рис. 7. Сечения пирамиды продавливания для моделей серии II

По результатам анализа испытаний двух серий конечно-элементных моделей были сделаны следующие **выводы**:

1. Конечно-элементные модели показали реалистичное поведение под нагрузкой: были зафиксированы нормальные трещины, которые развивались в процессе нагружения. Также была зафиксирована пирамида продавливания.

2. На большей части плиты главные сжимающие деформации ориентированы в тангенциальном направлении. Из этого следует вывод, что тангенциальные деформации вносят весомый вклад в общее напряжённо-деформированное состояние плиты и это качественно отличает работу плиты при продавливании от работы балки на действие перерезывающих сил, где тангенциальные деформации отсутствуют вовсе.

3. Зафиксирована значительная и характерная неравномерность в распределении тангенциальных деформаций и главных сжимающих деформаций бетона на сжатой грани плиты вблизи колонны: рост деформаций возле углов колонны и падение деформаций у середины стороны колонны.

4. Неравномерность в распределении деформаций увеличивается с ростом отношения сторон сечения колонны c_{max}/c_{min} , а также с ростом отношения стороны колонны к рабочей высоте сечения плиты c/h_0 . Так, для модели с соотношением сторон сечения колонны, равным 1 (КСП-1-КЭ), тангенциальные деформации на сжатой грани плиты по оси симметрии колонны составляют 30 % от величины деформаций возле угла колонны, для модели КСП-2,5-КЭ с соотношением сторон, равным 2,5, тангенциальные деформации составляют 8 %, а для модели КСП-4-КЭ с соотношением сторон, равным 4, величина тангенциальных деформаций колеблется около нуля.

5. Характер образования и развития пирамиды продавливания зависит от величины отношения сторон сечения колонны c_{max}/c_{min} и отношения стороны колонны к рабочей высоте сечения плиты c/h_0 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Залесов А. С., Ермуханов К. Е., Качановский С. Г. Продавливание железобетонных плит // Исследование железобетонных конструкций при статических, повторных и динамических воздействиях. М.: НИЖБ Госстроя СССР, 1984. С. 17–22.
2. Трёкин Н.Н., Пекин Д.А. Скрытые металлические капители безбалочных монолитных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 7. С. 17–20.
3. Тамразян А. Г. Анализ экспериментальных исследований по продавливанию плит пилонами // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования [Электронный ресурс]: сб. докладов Первой Нац. конф. М.: Изд. МИСИ – МГСУ, 2020. С. 177–185. URL: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrodstupa/44127/>.
4. Broms C. E. Punching of Flat Plates – A Question of Concrete Properties in Biaxial Compression and Size Effect. *ACI Structural Journal*. 1990. Vol. 87. no. 3. pp. 292–304.
5. Muttoni A. Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2008. Vol. 105. no. 4. pp. 440–450.
6. Болгов А. Н. Работа узлов сопряжения колонн из высокопрочного бетона с перекрытием в монолитных зданиях с рамно-связевой системой: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. М., 2005. 152 с.
7. Тамразян А. Г. К анализу узла сопряжения монолитных плит и колонн при продавливании // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения [Электронный ресурс]: Мат-лы Междунар. акад. чтений / под ред. С.И. Меркулова. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2020. С. 101–109. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44267209&pf=1>
8. Filatov V. Experimental investigation of stress-strain conditions in punching zone of flat slabs // *MATEC Web of Conferences*. Vol. 117. 2017. P. 00045. DOI: 10.1051/mateconf/201711700045.
9. Teng S., Cheong H. K., Kuang K. L., Geng J. Z. Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns // *ACI Structural Journal*. 2004. Vol. 101. no. 5. pp. 678–687.
10. Filatov V., Galyautdinov Z. Sh., Suvorov A.A. Elaboration of testing technique of flat slabs on punching shear strength using finite element modeling // *MATEC Web of Conferences*. Vol. 196. 2018. P. 02048. DOI: 10.1051/mateconf/201711700045.
11. Szczecina M., Winnicki A. Rational choice of reinforcement of reinforced concrete frame corners subjected to opening bending moment. *Materials* 2021, 14, 3438. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14123438>
12. Zainab M. R. Abdul Rasoul, Haura Mohamed Ali M. Taher. Accuracy of concrete strength prediction behavior in simulating punching shear behavior of flat slab using finite element approach in Abaqus. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. Vol. 7, No. 4. pp. 1933–1949. DOI: 10.21533/pen.v7i4.943.
13. Филатов В. Б., Бубнов Е.П. Экспериментальные исследования прочности плоских железобе-

тонных плит при продавливании // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 86–91.

14. Филатов В. Б., Галютдинов З. Ш. Экспериментальное исследование работы железобетонной плиты перекрытия при продавливании колонной [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2020. № 6. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6518>.

15. Сокуров А. З. Продавливание плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой: дис. ... канд. тех. наук. 05.23.01. М., 2015. 155 с.

16. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E. A plastic-damage model for concrete // *Int. Journal of Solids and Structures*. Vol. 25 (3), 1989. pp. 299–326. doi: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.

17. Lee J., Fenves G. L. A plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, 1998. no. 8. pp. 892–900. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).

18. Карпенко Н. И., Травуш В. И., Карпенко С. Н. [и др.]. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования. М., 2017. 197 с.

19. Sagaseta J., Tassinari L., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Punching of flat slabs supported on rectangular columns. *Engineering Structures*. 2014. no 77. pp. 17–33.

20. Кабанцев О.В., Песин К.О., Карлин А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния плитных конструкций в приопорных зонах // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Т.13. № 1. С. 55–62.

REFERENCES

1. Zalesov A. S., Ermukhanov K. E., Kachanovskij S. G. Punching of reinforced concrete slabs. *Issledovanie zhelezobetonnykh konstrukcij pri staticheskikh, povtornykh i dinamicheskikh vozdeystviyah* [Investigation of reinforced concrete structures under static, repeated and dynamic impacts] / NIIZhB. М., 1984, pp. 17–22. (in Russian)

2. Trekin N. N., Pekin D. A. Hidden metal capitals of monolithic beamless slabs. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2014, no. 7, pp. 17–20. (in Russian)

3. Tamrazyan A. G. Analysis of experimental studies on punching slabs with pylons. *Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya* [Actual problems of the construction industry and education]. Moscow, MI-SI-MGSU Publ. 2020, pp. 177–185. Available at: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/44127/>.

4. Broms C. E. Punching of Flat Plates – A Question of Concrete Properties in Biaxial Compression and Size Effect. *ACI Structural Journal*, 1990, vol. 87, no. 3, pp. 292–304.

5. Muttoni A. Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. *ACI Structural Journal*, 2008, vol. 105, no. 4, pp. 440–450.

6. Bolgov A.N. *Rabota uzlov sopryazheniya kolonn iz vysokoprochnogo betona s perekrytiem v monolitnykh zdaniyah s ramno-svyazevoy sistemoy*. Cand. Diss. [The operation of the joints of columns made of high-strength concrete with floor in monolithic buildings with a frame-braced system. Cand. Diss.] Moscow, 2005. 152 p.

7. Tamrazyan A. G. To the analysis of the junction of monolithic slabs and columns during punching. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya* [Security of the construction fund in Russia. Problems and solutions]. Kursk. ZAO "Universitetskaya kniga". 2020, pp. 101–109. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44267209&pff=1> (in Russian)

8. Filatov V. Experimental investigation of stress-strain conditions in punching zone of flat slabs. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 117, 00045. DOI: 10.1051/mateconf/201711700045.

9. Teng S., Cheong H. K., Kuang K. L., Geng J. Z. Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns. *ACI Structural Journal*, 2004, vol. 101, no. 5, pp. 678–687.

10. Filatov V., Galyautdinov Z. Sh., Suvorov A.. Elaboration of testing technique of flat slabs on punching shear strength using finite element modeling. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 196, 02048. DOI: 10.1051/mateconf/201711700045.

11. Szczecina M., Winnicki A. Rational choice of reinforcement of reinforced concrete frame corners subjected to opening bending moment. *Materials*, 2021, 14, 3438. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma1412343>.

12. Zainab M. R. Abdul Rasoul, Hawra Mohamed Ali M. Taher. Accuracy of concrete strength prediction behavior in simulating punching shear behavior of flat slab using finite element approach in Abaqus. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 1933–1949. DOI: 10.21533/pen.v7i4.943.

13. Filatov, V. B., Bubnov E. P. Experimental Investigation of Punching Shear Strength of Flat Reinforced Concrete Slabs. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2017, no. 2, pp. 86–91. (in Russian)

14. Filatov V., Galyautdinov Z. Sh. Experimental study of the work of a reinforced concrete floor slab under punching by column. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2020, no. 6. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6518>. (in Russian)

15. Sokurov A. Z. *Prodaвливание ploskikh zhelezobetonnykh plit, usilennykh poperechnoj armaturoj*. Cand. Diss. [Punching of flat reinforced concrete slabs strengthened with transverse reinforcement. Cand. Diss.]. Moscow, 2015. 155 p.

16. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E. A plastic-damage model for concrete. *Int. Journal of Solids and Structures*, 1989, vol. 25 (3), pp. 299–326. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.

17. Lee J., Fenves G. L. A plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1998, vol. 124, no. 8, pp. 892–900. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).

18. Karpenko N. I., Travush V. I., Karpenko S. N., et al. *Statically indeterminate reinforced concrete structures. Diagrammatic methods of computer-aided calculation and design: Methodological guide*. Moscow, 2017. 197 p.

19. Sagaseta J., Tassinari L., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Punching of flat slabs supported on rectangular columns. *Engineering Structures*, 2014, no. 77, pp. 17–33.

20. Kabancev O. V., Pesin K. O., Karlin A. V. Analysis of the stress-strain state of slab structures in the support zones. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 55–62. (in Russian)

Об авторах:

ГАЛЮТДИНОВ Зульфат Шавкатович

аспирант кафедры железобетонных конструкций Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: Zulfat.Sh.G@mail.ru

GALYAUDINOV Zulfat Sh.

Postgraduate Student of the Reinforced Concrete Structures Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: Zulfat.Sh.G@mail.ru

Для цитирования: Галютдинов З.Ш. Численное исследование работы железобетонных плит в зоне продавливания // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 3. С. 4–13. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.01.

For citation: Galyautdinov Z.Sh. Numerical Study of Reinforced Concrete Plates in the Pressure Area. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 4–13. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.01.

ПОДПИСКА – 2022

НА ЯНВАРЬ-ИЮНЬ ПО ИНТЕРНЕТ-ВЕРСИИ «ОБЪЕДИНЕННОГО КАТАЛОГА «ПРЕССА РОССИИ» НА САЙТАХ WWW.PRESSA- RF.RU И WWW.AKS.RU

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ, ЧТО С 1 СЕНТЯБРЯ 2021 Г. ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСНАЯ КАМПАНИЯ НА ЖУРНАЛЫ САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА (ПЕРВОЕ ПОЛУГОДИЕ 2022 ГОДА)

18106 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»

18107 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Психолого-педагогические науки»

18108 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки»

41340 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Философия»

70570 Градостроительство и архитектура

Условия оформления подписки Вы найдете на сайтах www.pressa-rf.ru и www.akc.ru