

Д. С. ТОШИН
Д. А. ДОЛГОПОЛОВ

ПРОЧНОСТЬ, ЖЕСТКОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МОДЕЛИ ОБЛЕГЧЕННОЙ ПЛИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЯМИ

STRENGTH, STIFFNESS AND CRACK RESISTANCE OF A LIGHTWEIGHT
SLAB STRUCTURE MODEL WITH SPHERICAL VOID FORMERS

Сборный железобетон многие десятилетия применяется при оптимизированных расходах бетона и арматуры. Использование монолитного железобетона в РФ нельзя назвать сбалансированным с точки зрения его материалоемкости. Одной из конструкторских идей создания облегченных плитных железобетонных конструкций в монолитном строительстве является технология «BubbleDeck». Сферические вкладыши располагаются в местах наименьших напряжений в конструкции, что приводит к существенному снижению собственного веса. В статье представлены результаты оценки прочности, жесткости и трещиностойкости уменьшенной модели железобетонной плиты в сравнении с аналогичными параметрами плиты сплошного сечения.

Ключевые слова: железобетонная плита, облегченная конструкция, сферический пустотообразователь, вкладыш, прочность, жесткость, деформативность, трещиностойкость, изгиб, технология «BubbleDeck»

Строительное производство, как любой другой вид экономической деятельности, направлено на получение максимальной прибыли при наименьших расходах ресурсов и одновременном обеспечении предъявляемых к продукции требований [1–3]. Так, серии сборных железобетонных изделий, например многопустотных или ребристых панелей перекрытия и покрытия, являются ярким примером конструкций с разумным и рациональным расходом бетона и арматуры. Поперечные сечения сборных железобетонных элементов имеют достаточно сложную конфигурацию, а расчетная форма сечения, как правило, представляется тавровым или двутавровым сечением, оптимальным с точки зрения распределения материала по конструкции. Удаление из элементов значительно объема бетона, практически не влияющего на прочностные и эксплуатационные показатели, во-первых, уменьшает расход бетона, во-вторых, сокращает армирование за счет снижения соб-

Precast concrete has been used for many decades with optimized consumption of concrete and reinforcement. The use of monolithic reinforced concrete in the Russian Federation cannot be called balanced in terms of its material consumption. One of the design ideas for creating lightweight slab reinforced concrete structures in monolithic construction is the BubbleDeck technology. Spherical bushings are located in places of the least stresses in the structure, which leads to a significant reduction in the own weight. The article presents the results of assessing the strength, stiffness and crack resistance of a reduced model of a reinforced concrete slab in comparison with similar parameters of a solid section slab.

Keywords: reinforced concrete slab, lightweight construction, spherical void former, insert, strength, rigidity, deformability, crack resistance, bending, BubbleDeck technology

ственного веса конструкции, в-третьих, влияет на снижение стоимости строительства в целом за счет облегчения нижерасположенных конструкций, поскольку уменьшаются нагрузки на стены, колонны и фундаменты. Технологически сложная конфигурация поперечного сечения окупается многократным использованием стальной опалубки.

Изготовление и применение таких сборных элементов исчисляется десятилетиями и оправдало целесообразность реализации заложенной идеи [4–7]. На историческом этапе высокого уровня индустриализации строительного производства с применением оптимизированных железобетонных изделий было обеспечено не только интенсивное гражданское и промышленное строительство, но и высокий уровень надежности и долговечности возведенных зданий и сооружений.

За последние годы доля монолитных конструкций существенно возрастает. При этом

вопросы уменьшения трудозатрат и сокращения сроков строительства остаются актуальными. Считается нерациональным усложнение опалубочных и арматурных работ, поэтому конструкции по геометрической форме сечения зачастую принимаются максимально простыми. Преимущественно для изгибаемых балок и плит, сжатых элементов и других видов конструкций применяются прямоугольные формы поперечного сечения без дополнительных пустотообразователей. Такую тенденцию развития железобетона, с точки зрения конструкторской инженерии, нельзя назвать прогрессивной. Так, нормативная нагрузка от собственного веса многопустотной плиты при толщине 220 мм составляет 300 кг/м^2 , сборная ребристая плита при высоте сечения 400 мм имеет вес около 250 кг/м^2 . А монолитная плита сплошного сечения, широко применяемая в гражданском строительстве, при толщине 160-200 мм создает постоянную нагрузку с нормативным значением $400\text{--}500 \text{ кг/м}^2$. Таким образом, при переходе от сборных конструкций перекрытий к монолитным наблюдается одновременно значительное увеличение нагрузки от собственного веса и уменьшение рабочей высоты сечения элемента. Оба фактора в конечном итоге приводят к необходимости повышения расхода арматуры в монолитных конструкциях для обеспечения требуемых показателей прочности, жесткости и трещиностойкости по сравнению со сборным железобетоном.

Изучение опыта строительства в развитых странах показывает, что подходы оптимального проектирования и возведения железобетонных конструкций могут быть применены не только для сборных изделий, но и в монолитном строительстве. Одной из актуальных и прикладных разработок является технология «BubbleDeck» [8, 9], которая заключается во введении внутрь плоского перекрытия неизвлекаемых сферических пустотообразователей, выполненных, например, из полиэтилена высокого давления. Шарообразная форма вкладышей обеспечивает формирование продольных и поперечных ребер в плите, что сохраняет удобство армирования и работоспособность конструкции плиты в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Вытеснение части объема бетона на 20–40 % приводит к снижению собственного веса конструкции, расхода бетонной смеси, включая сокращение затрат на ее доставку. Сферические пустотообразователи равномерно распределяют внутри пространственного арматурного каркаса, а за счет подобранных форм ячеек нижней и верхней сеток обеспечивается максимальное вытеснение бетона при размещении вкла-

дышей и сохранность проектного положения шаров при бетонировании.

Введение сферических пустотообразователей в конструкцию предполагает изготовление монолитной плиты полностью на строительной площадке, использование армирующих модулей из арматурных сеток и шаров-вкладышей заводского изготовления или применение сборно-монолитной конструкции. В последнем варианте сборная часть конструкции предварительно изготавливается на заводе ЖБИ, включает нижнюю полку из бетона, арматурные сетки, шары-вкладыши, при этом сборная часть конструкции выполняет также функцию несъемной опалубки.

Гипотеза применения плитных железобетонных конструкций, выполняемых по технологии «BubbleDeck», заключается в вытеснении части бетона из наименее напряженной части сечения с сохранением верхней и нижней полок, в которых располагаются горизонтальные сетки с продольной арматурой в двух направлениях. В зависимости от положения рассматриваемого сечения плиты и знака усилия несущую способность по изгибающему моменту обеспечивает преимущественно сжатая полка и арматура растянутой зоны. При положении нижней границы сжатой зоны в пределах полки несущая способность такой конструкции сохраняется прежней, не требуется введение дополнительного армирования. За счет снижения размеров поперечного сечения можно ожидать некоторое уменьшение жесткости и трещиностойкости таких конструкций. В зонах продавливания таких плит возможно сохранение сплошного сечения, что обеспечивает требуемую несущую способность исключительно за счет бетона или при минимальном поперечном армировании. В итоге формируется конструкция, рациональная с точки зрения сечения, расхода бетона и арматуры, практически не уступающая по несущей способности и эксплуатационным параметрам.

Для подтверждения описанных предположений было запланировано проведение экспериментальных исследований по оценке прочности, жесткости и трещиностойкости модели железобетонной плиты с неизвлекаемыми вкладышами-пустотообразователями. При планировании эксперимента было предусмотрено изготовление двух образцов плит, одна из которых проектировалась эталонной сплошного сечения, а вторая – облегченной, для последующего сравнения результатов проведенного исследования. Геометрические размеры плит назначались одинаковыми: длина 1100 мм, ширина 1100 мм, толщина 54 мм. При изготовлении образцов использовался бетон

класса В25 по прочности на сжатие с применением доломитового заполнителя крупностью не более 8 мм, что обусловлено размерами моделей.

Для армирования предусматривалась проволока класса В500 диаметром 3 мм, сетки устанавливались по верхней и нижней граням модели плиты. В связи с применением готовой сварной сетки фактический шаг расположения стержней армирования составил 56×56 мм. В качестве неизвлекаемых пустотообразователей для облегченной модели плиты использовались пенопластовые шары диаметром 40 мм. На изготовление одной плиты потребовался 361 сферический пенопластовый пустотообразователь. Пустотообразователи укладывались в каждую ячейку между стержнями сеток армирования (рис. 1).

При проведении экспериментальных исследований моделей плит использовался стенд для испытания плоских конструкций. Опирание плит осуществлялось по контуру, схемы опирания принимались по ГОСТ 8829-2018 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости». Нагрузка на образцы прикладывалась снизу вверх с помощью гидравлического домкрата и перераспределялась через замкнутую траверсу с фактическим приложением четырех равных сил, равноудаленных от осей симметрии плит. Подобная передача нагрузки позволила получить участок постоянного изгибающего момента в средней зоне плиты, свободно расставить измерительные приборы по верхней грани, что гарантировало их сохранность при исчерпании

несущей способности плиты, а также обеспечило возможность визуальной фиксации момента появления, процесса развития трещин и характера разрушения образцов со стороны доступной растянутой зоны. При проведении испытаний с помощью прогибомеров 6-ПАО с ценой деления 0,01 мм фиксировался прогиб плиты по ее центру, а также вертикальные перемещения посередине каждой опорной грани. Также оценивалась величина продольных деформаций арматуры в растянутой зоне на базе 300 мм с помощью мессур, выполненных с применением индикаторов часового типа (цена деления 0,01 мм) и удлинителей, закрепленных на резьбовые втулки, приваренные к стержням сетки. Высота втулок назначалась равной толщине защитного слоя, их фиксация осуществлялась до бетонирования образцов. Всего на каждую плиту устанавливалось по пять прогибомеров и две мессуры (рис. 2).

Нагружение осуществлялось путем ступенчатого приложения нагрузки. Величина каждого шага нагружения назначалась небольшой с существенным запасом по требованиям ГОСТ 8829-2018. После образования трещин в растянутой зоне величина нагрузки на каждом шаге увеличивалась.

При обработке результатов испытания по величине приложенной нагрузки определялись изгибающие моменты на каждом шаге нагружения. По показаниям прогибомеров устанавливался прогиб как результат измерения по центрально установленному прибору за вычетом усредненного значения осадок четырех опор. Величина деформаций по мессурам переводилась в относительные величины и усреднялась по двум индикаторам часового типа.



Рис. 1. Общий вид опалубки с установленными сетками нижнего, верхнего армирования и сферическими пустотообразователями

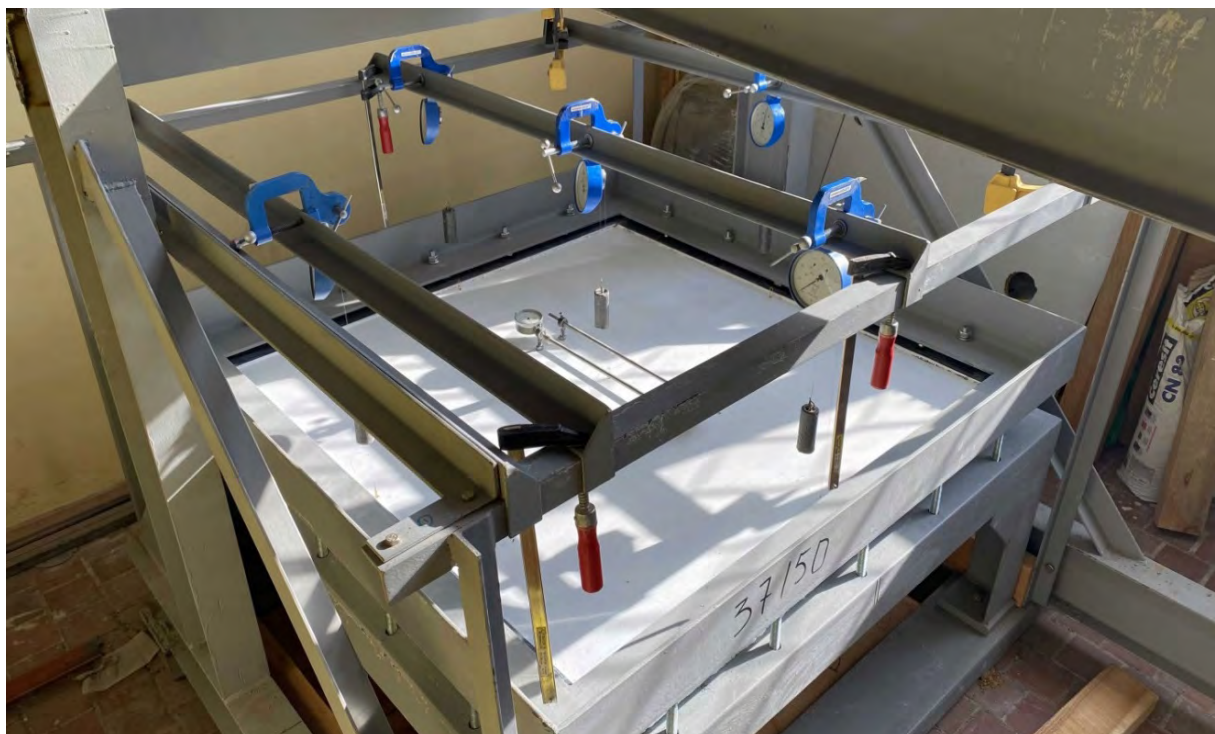


Рис. 2. Расстановка измерительных приборов при испытании образцов плит

Обработанные результаты экспериментальных исследований представлены в графическом виде на рис. 3. Момент трещинообразования, который оценивался одновременно по визуальным признакам и по резкому увеличению деформаций ϵ_s продольных стержней армирования, для экспериментальной плиты с облегчающими вкладышами оказался на 25 % меньше, чем для эталонного образца без пустотообразователей.

Характер развития трещин для двух моделей также оказался различным. В плите сплошного сечения первые трещины образовались параллельно торцевым плоскостям элемента с последующим появлением диагональных трещин (рис. 4, а). В модели со сферическими пустотообразователями последовательность развития трещин была иной: первые трещины образовались по диагонали плиты, а последующие – параллельно боковым граням (рис. 4, б).

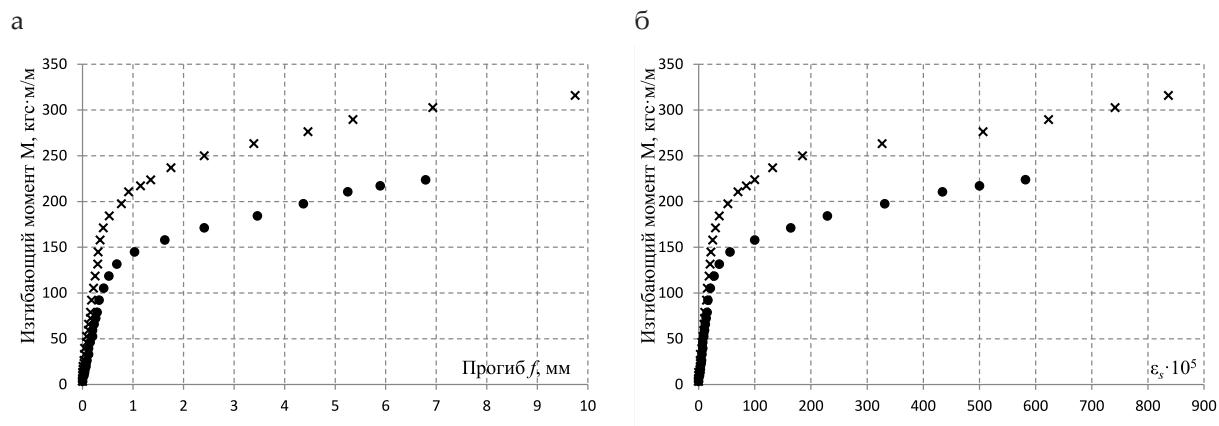
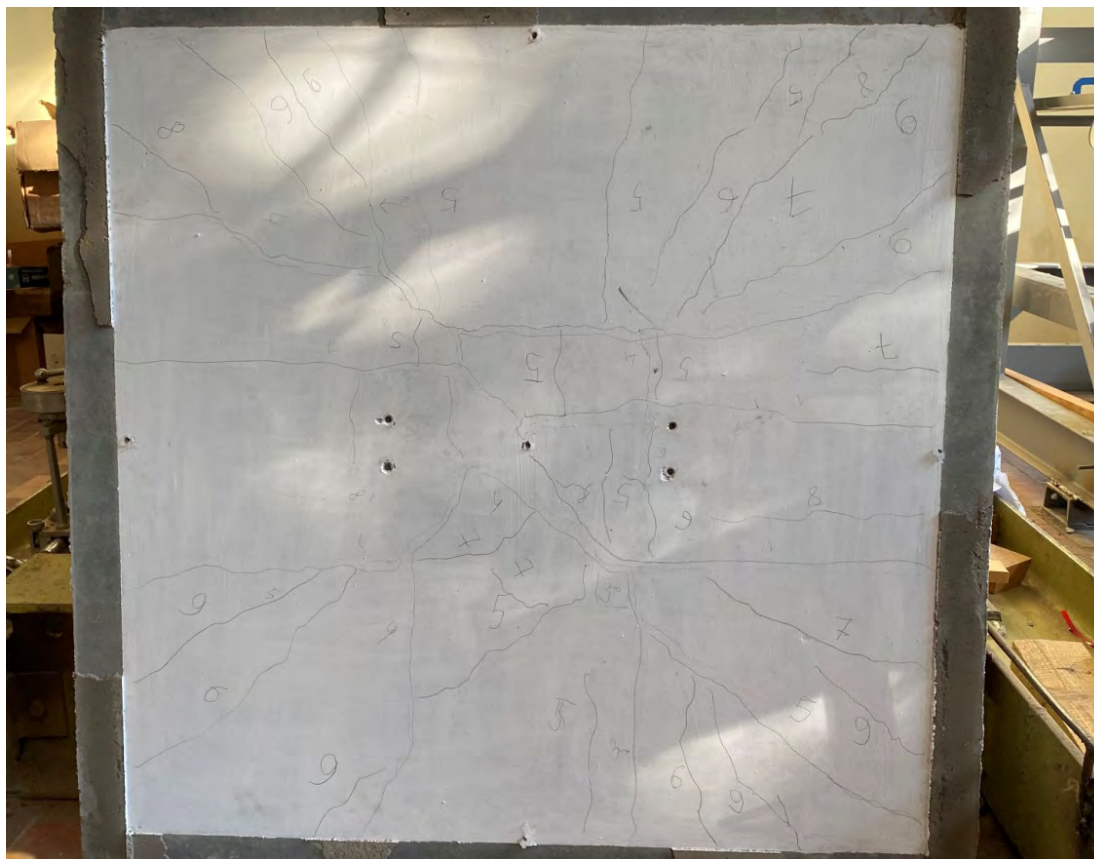


Рис. 3. Экспериментальная зависимость «изгибающий момент М – прогиб f» (а) и «изгибающий момент М – средние деформации арматуры растянутой зоны ϵ_s » (б):
 × – опытные данные для полнотелых плит;
 • – опытные данные для плит со сферическими пустотообразователями

а



б



Рис. 4. Характер развития трещин в железобетонной плите сплошного сечения (а) и в железобетонной плите со сферическими пустотообразователями (б)

Общее число трещин при достижении максимальной нагрузки на облегченную модель плиты превышало количество трещин в эталонной плите сплошного сечения.

Как и предполагалось, облегченная конструкция плиты оказалась более деформативной, что обусловлено меньшими геометрическими характеристиками поперечного сечения элемента и более ранним трещинообразованием. При одинаковом уровне нагружения на любом шаге приложения нагрузки прогибы плит с пустотообразователями имели большую величину.

Вопреки ожиданиям несущая способность плиты, установленная по величине нагружения при продольных деформациях арматуры $\varepsilon_s = 250 \cdot 10^{-5}$, для конструкции с вкладышами-пустотообразователями оказалась меньше примерно на 25 %. Однако выяснилось, что при бетонировании облегченной модели плиты у отдельных шаров нарушилось крепление и не было обеспечено их проектное положение, частично пустотообразователи всплыли при уплотнении бетонной смеси, что в итоге уменьшило площадь сжатой зоны бетона при изгибе. Полученный результат не противоречит ранее обозначенной гипотезе о несущей способности плит, выполняемых по технологии типа «BubbleDeck», а лишь расширяет область дальнейших исследований, в частности по необходимости учета влияния высоты (площади) сжатой зоны.

Несмотря на то, что полученные значения прочности, жесткости и трещиностойкости моделей облегченных плит оказались ниже, важным фактом является снижение собственного веса такой плиты на 19 %, что не является пределом сокращения расхода бетона и, как следствие, нагрузки и усилий в расчетных сечениях. При проектировании объектов, в которых постоянная нагрузка является преобладающей, например жилых и некоторых общественных зданий, даже при таких эксплуатационных показателях можно получить более экономичную конструкцию с меньшим собственным весом.

Выводы. 1. При конструировании и изготовлении модели железобетонной плиты со сферическими пустотообразователями получен элемент, собственная масса которого на 19 % меньше, чем аналогичной по размерам плиты сплошного сечения.

2. При изготовлении облегченной конструкции плиты часть пенопластовых шаров поднялась при уплотнении бетонной смеси, что уменьшило площадь сжатой зоны при изгибе образца; при изготовлении подобных конструкций следует особое внимание уделять

конструктивным решениям, обеспечивающим проектное положение вкладышей.

3. При испытании облегченных плит со сферическими пустотообразователями прочность, жесткость и трещиностойкость оказались ниже, чем в эталонных плитах сплошного сечения.

4. Первые трещины в облегченной модели плиты образовались при средних деформациях растянутой арматуры и прогибах на 10,5 % меньше, чем в эталонной плите, и располагались по диагонали (схема «конверт») в отличие от образца сплошного сечения с появлением первых трещин параллельно продольным граням.

5. При достижении соответствующих разрушающих нагрузок прогиб полнотелой и пустотелой плиты был практически одинаковым и составил около 3,9 мм.

6. Приведенные результаты получены на единичных образцах, требуются дальнейшие исследования прочности, жесткости, трещиностойкости, а также совершенствование конструктивной части армирования и фиксации сферических пустотообразователей на этапе изготовления облегченных железобетонных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коваленко Г.В., Дудина И.В., Назарова Н.О. Оптимизация железобетонных конструкций заводского изготовления на вероятностной основе как фактор снижения их материалоемкости // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т.1. С. 156–160.
2. Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А. Структура стоимости материалов в ребристых плитах при переменной высоте сечения // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3 (87). С. 421–432.
3. Тамразян А.Г., Долганов А.И., Калеев Д.И. К вероятностной оценке надежности железобетонных многопустотных панелей перекрытий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 267–271.
4. Юмашева Е.И., Сапачева Л.В. Домостроительная индустрия и социальный заказ времени // Строительные материалы. 2014. № 10. С. 3–11.
5. Аль Каради А. Производство, эффективность и применение многопустотных плит в строительстве // Технологии бетонов. 2014. № 5 (94). С. 32–36.
6. Землянский А.А., Жуков А.Н., Булавина Д.А. Опыт натурного испытания железобетонных ребристых плит // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2019. № 4 (43). С. 79–82. DOI: 10.25628/UNIP.2019.43.4.014.
7. Босаков С.В., Мордич А.И., Симбиркин В.Н. К повышению несущей способности и жесткости перекрытий, образованных многопустотными плитами //

Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 4. С. 30–36.

8. Sergiu Călin, Ciprian Asăvoaie, N. Florea. Issues for Achieving an Experimental Model Concerning Bubble Deck Concrete Slab with Spherical Gaps // Gheorghe Asachi" Technical University of Iași Department of Concrete Structures, Building Materials, Technology and Management. 2016. 8 s.

9. BubbleDeck Режим доступа: <https://www.bubbledeck.com>.

REFERENCES

1. Kovalenko G.V., Dudina I.V., Nazarova N.O. Optimization of prefabricated reinforced concrete structures on a probabilistic basis as a factor in reducing their material consumption. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences]. 2018, V.1. pp. 156–160. (In Russian).

2. Kuznecov V.S., SHaposhnikova YU.A. The structure of the cost of materials in ribbed slabs with a variable section height. *Struktura stoimosti materialov v rebristyh plitah pri peremennoj vysote secheniya* [Inzhenerny Bulletin of the Don], 2022, no. 3 (87), pp. 421–432. (in Russian)

3. Tamrazyan A.G., Dolganov A.I., Kaleev D.I. et al. On the probabilistic assessment of the reliability of reinforced concrete multi-hollow floor panels. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Tekhnologiya tekstilnoj promyshlennosti* [News of higher educational institutions. Technology of the textile industry], 2017, no. 4(370), pp. 267–271. (in Russian)

4. Yumasheva E.I., Sapacheva L.V. House-building industry and the social order of time. *Stroitelnye materialy* [Building materials], 2014, no. 10, pp. 3–11. (in Russian)

5. Al Karadi A. Production, efficiency and application of multi-hollow slabs in construction. *Tekhnologii betonov* [Tekhnologii betonov], 2014, no. 5(94), pp. 32–36. (in Russian)

6. Zemlyanskij A.A., ZHukov A.N., Bulavina D.A. Experience of full-scale testing of reinforced concrete ribbed slabs. *Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN* [Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN], 2019, no. 4(43), pp. 79–82. (in Russian) DOI: 10.25628/UNIP.2019.43.4.014

7. Bosakov S.V., Mordich A.I., Simbirkin V.N. To increase the bearing capacity and rigidity of floors formed by multi-hollow slabs. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction], 2017, no. 4, pp. 30–36. (in Russian)

8. Sergiu Călin, Ciprian Asăvoaie, N. Florea. Issues for Achieving an Experimental Model Concerning Bubble Deck Concrete Slab with Spherical Gaps. Gheorghe Asachi" Technical University of Iași Department of Concrete Structures, Building Materials, Technology and Management. 2016. 8 p.

9. BubbleDeck. Available at: <https://www.bubbledeck.com> (accessed 20 September 2022).

Об авторах:

ТОШИН Дмитрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

Тольяттинский государственный университет
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. (8482) 54-63-08

E-mail: D.Toshin@tltsu.ru

TOSHIN Dmitry S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Center for Architectural, Structural Solutions and Construction Management

Togliatti State University
445020, Russia, Samara region, Togliatti,
Belorusskaya str., 14,
tel. (8482) 54-63-08

E-mail: D.Toshin@tltsu.ru

ДОЛГОПОЛОВ Дмитрий Александрович

генеральный директор ООО «СПК-Центр»

Общество с ограниченной ответственностью
«СПК-Центр»

445032, Россия, г. Тольятти, ул. Свердлова, 72, кв. 94

E-mail: dmteta@mail.ru

DOLGOPOLOV Dmitry A.

General Director

Limited Liability Company SPK-Center
445032, Russia, Samara Region, Tolyatti,
Sverdlova str., 72, apt. 94

E-mail: dmteta@mail.ru

Для цитирования: Тошин Д.С., Долгополов Д.А. Прочность, жесткость и трещиностойкость модели облегченной плитной конструкции со сферическими пустообразователями // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 1. С. 10–16. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.2.

For citation: Toshin D.S., Dolgoplov D.A. Strength, Stiffness and Crack Resistance of a Lightweight Slab Structure Model with Spherical Void Formers. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 1, pp. 10–16. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.2.