

Б.К. ДЖАМУЕВ¹

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

ВЛИЯНИЯ НЕСЪЕМНЫХ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ ЗАЩЕМЛЕННЫХ ПО КОНТУРУ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты численного исследования влияния несъемных пустотообразователей на прочность защемленных по контуру монолитных железобетонных плит перекрытия. Моделирование конструкций выполнено с использованием объемных конечно-элементных моделей в программном комплексе «ЛИРА-САПР». Исследования проведены для образцов 4 видов, различающихся между собой габаритами в плане и армированием. Дано подробное описание использованных зависимостей и законов деформирования материалов в ходе построения моделей. Сравнительному анализу подверглись величины сжимающих напряжений в бетоне и арматуре, а также растягивающих напряжения в арматуре, полученные в результате моделирования. На основе проведенного исследования установлено, что использование несъемных пустотообразователей в монолитной железобетонной плите не снижает ее прочность, при этом позволяет сократить расход бетона на 18,3÷23,1 %.

Ключевые слова: железобетон, монолитная плита, плита с пустотообразователями, прочность, численное моделирование, конечно-элементная модель, программный комплекс «ЛИРА-САПР».

B.K. DZHAMUEV¹

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

THE EFFECT OF NON-REMOVABLE VOID GENERATORS ON THE STRENGTH OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS CLAMPED ALONG THE CONTOUR

Abstract. The article presents the results of a numerical experiment to determine the effect of non-removable void generators on the strength of monolithic reinforced concrete floor slabs clamped along the contour. The experimental samples are made in the form of spatial models using volumetric finite element models in the LIRA-CAD software package. The tests were carried out on 4 series of samples, differing in terms of dimensions and reinforcement. Detailed descriptions of the dependencies used and the laws of deformation of materials during the construction of models are given. The values of compressive stresses in concrete and reinforcement, as well as tensile stresses in reinforcement obtained as a result of tests, were subjected to comparative analysis. Based on the conducted experiment, it was found that the use of non-removable voids in a monolithic reinforced concrete slab does not reduce its strength, while reducing concrete consumption by 18.3-23.1%.

Keywords: reinforced concrete, monolithic slab, slab with voids, strength, numerical modeling, numerical experiment, non-removable voids, finite element model, software package «LIRA-CAD».

© Джамуев Б.К., 2024

Введение

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 31 октября 2022 г. №3268-р «Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.» объемы строительства с применением железобетона в нашей стране из года в год увеличиваются. Значительную долю в этих объемах занимает монолитное домостроение: как при новом строительстве, так и в процессе реконструкции ветхих и аварийных зданий. И это неудивительно, ведь железобетон как комплексный материал обладает множеством преимуществ. Однако, есть у него существенный недостаток – большой собственный вес. Этот вопрос всегда стоял остро, т.к. снижение веса здания — это экономия материалов (в том числе невозобновляемых), уменьшение стоимости строительного-монтажных работ, оптимизация размеров вертикальных несущих элементов, возможность отказа от дополнительных работ в виде усиления слабых оснований и т.п., что в конечном счете снижает стоимость объекта строительства. Как известно, значительную долю от общего объема расходуемого бетона на здание, занимают перекрытия. Таким образом, снижение веса перекрытия при инвариантности качественных его показателей (прочность, деформативность, надежность, долговечность), является одним из актуальных вопросов.

Классическим способом уменьшения расхода бетона для возведения здания и, как следствие снижения его общего веса, является применение сборных железобетонных многопустотных плит перекрытий. Исследованием данного вопроса начали заниматься достаточно давно, а результатом научных исследований в нашей стране явился государственный стандарт, принятый в 1991 году – ГОСТ 9561-91 [1], позволяющий при возведении зданий и сооружений использование железобетонных плит с продольными пустотами.

а)



б)

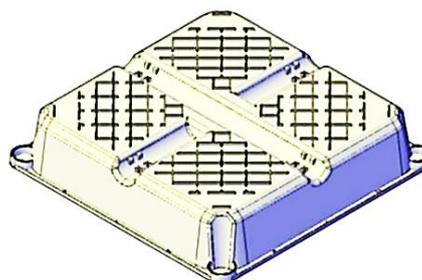


Рисунок 1 – Схема расположения пустотообразователей в железобетонной плите (а) и общий вид пустотообразователя (б)

В монолитном домостроении также велись исследования на данную тематику. Если говорить о конструкциях монолитного перекрытия, то собственный вес можно снизить различными способами: использование вкладышей из легкого бетона (минваты, пенополистирола и т.п.), применение кессонного перекрытия, а также используя несъемные пустотообразователи. Последний способ является наиболее молодым, в 1992 году его изобрел датский инженер-строитель Йорген Бреннинг. Как видно, извлекаемые и неизвлекаемые пустотообразователи начали использовать в монолитных перекрытиях достаточно недавно, но в последнее десятилетие этот способ получил наибольшее распространение, т.к. соответствует глобальному тренду по уменьшению выбросов CO₂ в атмосферу. С начала 2000-х гг. запатентовано несколько моделей и способов применения пустотообразователей: емкость для жидкости из резины или полиэтиленового пакета с водой [2], трубки из бумаги или пластика [3], полиэтилентерефталовые бутылки [4], емкость в виде пластмассового полого или герметичного тела вращения [5] емкость прямоугольной формы

из пластмассы или влагостойкого картона [6], картонно-полиэтиленовые трубы [7]. На данный момент в мире существуют множество технологий, основанные на применении неизвлекаемых пустотообразователей, наиболее распространение из которых в нашей стране получили U-Boot, Cobiax, Bubble Deck, Simkar и Сибформа (см. рисунок 1). По использованию в монолитных железобетонных плитах пустотообразователей Simkar и Сибформа разработаны стандарты организации [8, 9].

Анализ зарубежных [10-17] и отечественных [18-20] исследований о влиянии несъемных пластиковых пустотообразователей на прочность железобетонных плит указывает на то, что пустотообразователи не оказывают существенного влияния на прочность, но позволяют значительно экономить материалы. При этом, в различных исследованиях, авторами говорится о снижении максимальных напряжений в бетоне на 1-40% при использовании в плите пустотообразователей, а в исследовании [16] утверждается, что несущая способность плиты с пустотообразователями приближается к полнотелой плите с увеличением пролета.

Таким образом, учитывая, что в ранее проведенных исследованиях различными авторами приводятся данные с достаточно значительным разбросом прочности однотипных плит с пустотообразователями и без них (полнотелые), а также принимая во внимание противоречивые выводы в отдельных исследованиях, была составлена программа испытаний с целью оценки влияния несъемных пустотообразователей на прочность монолитных железобетонных плит перекрытия.

Модели и методы

Объектом исследования является монолитная железобетонная плита с несъемными пустотообразователями, квадратной в плане формы (соотношение сторон 1:1), защемленная по периметру плиты, на которую воздействует равномерно-распределенной нагрузка.

Т.к. целью исследования является оценка влияния несъемных пустотообразователей на ее прочность железобетонной плиты, то для более объективного анализа было подготовлено 4 серии образцов (моделей) различающиеся между собой габаритами в плане и армированием (см. таблица 1), что также позволило оценить влияние длины плиты на ее прочность и провести проверку правомочности вышеизложенных утверждений в [16].

Экспериментальные образцы – виртуальные, выполнены по канонам численного моделирования из конечных элементов. В качестве программного комплекса для создания конечно-элементных моделей эталонных плит и плит с пустотообразователями был использован вычислительный комплекс «ЛИРА-САПР», как наиболее популярный среди российских инженеров. Он обладает достаточными функциональными возможностями для численного исследования прочности и деформативности конструкций методом конечных элементов.

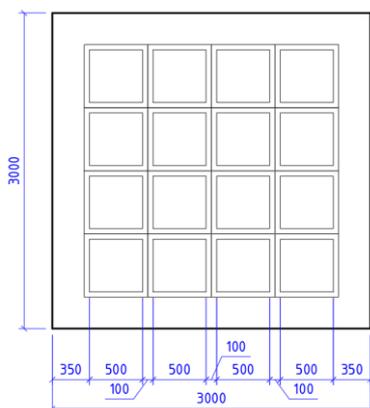
Каждая серия состояла из двух образцов: эталонный-полнотелый (условное обозначение «Et») и пустотелый (условное обозначение «Ps»).

Прообразом эталонной модели является монолитная железобетонная плита перекрытия толщиной 200 мм, выполненная из бетона класса по прочности на сжатие В25, заармированная плоскими сетками из арматурных стержней А500, уложенные равномерно с шагом 200 мм по нижней и верхней граням плиты. Расстояние от грани сечения до равнодействующего усилия в растянутой (сжатой) арматуре составляет 30 мм. При этом диаметр арматуры в каждой серии различен и подобран в результате предварительного ручного расчета.

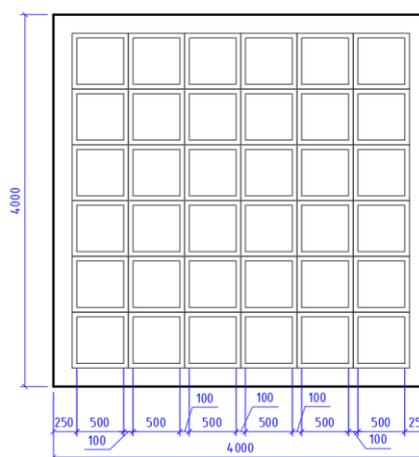
Таблица 1 – Характеристики образцов

| Условное обозначение образца | Размер плиты в плане (мм) | Объем бетона (м ³) | Армирование (м) | Снижение объема бетона относит. этал. образца, (%) |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|
| Серия «А» | | | | |
| A-Et | 3000 x 3000 | 1,80 | Ø8A500 с шагом 200мм | 18,3 |
| A-Ps | | 1,47 | | |
| Серия «В» | | | | |
| B-Et | 4000 x 4000 | 3,20 | Ø10A500 с шагом 200мм | 23,1 |
| B-Ps | | 2,46 | | |
| Серия «С» | | | | |
| C-Et | 5000 x 5000 | 5,00 | Ø12A500 с шагом 200мм | 20,0 |
| C-Ps | | 4,00 | | |
| Серия «D» | | | | |
| D-Et | 6000 x 6000 | 7,20 | Ø14A500 с шагом 200мм | 22,9 |
| D-Ps | | 5,55 | | |

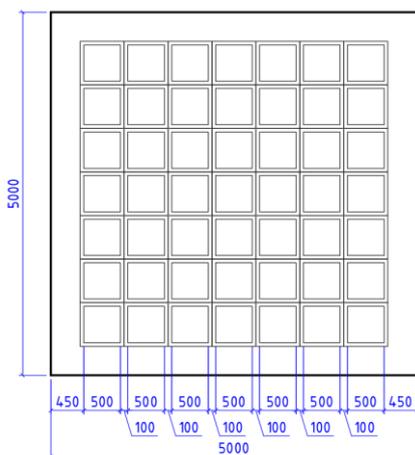
а)



б)



в)



г)

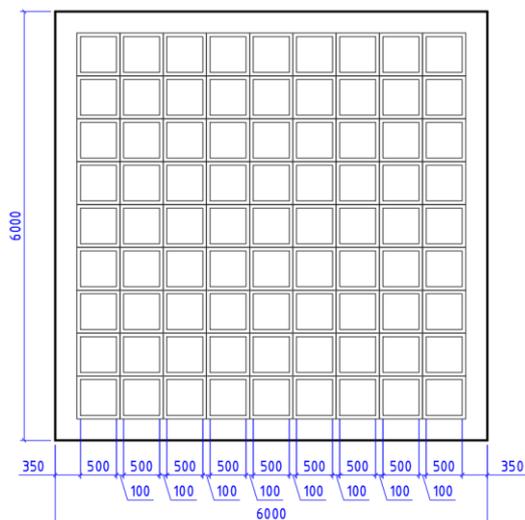


Рисунок 2 – Схема расположения пустообразователей в образцах серий А, В, С, D

Прообразом модели с пустотообразователями является монолитная железобетонная плита перекрытия с идентичными эталонной модели геометрическими и физическими параметрами, но имеющая в теле пластиковые элементы несъемной опалубки заводского изготовления, усеченно-пирамидальной формы (близкой к квадратной), образующие в процессе заливки бетона пустоты, как показано на рисунке 1. В качестве пустотообразователей в образцах «Ps» были приняты элементы системы «Сибформа» с характеристиками в соответствии с [9]. Высота пустотообразователя составляет 100 мм, размер в плане 500x500 мм. Вид и расположение пустотообразователей в теле плиты (см. рисунок 2) подобраны исходя из требований [9]:

- толщина плиты не должна быть меньше 200 мм для пустотообразователя высотой 100 мм;
- расстояние от контурных балок до зоны с пустотообразователями должна быть не менее $1.5 \times h_0$;
- расстояние между гранями пустотообразователей не должно быть менее 100 мм.

Экспериментальные образцы представляют собой пространственную конечно-элементную модель, выполненную из объемных и стержневых элементов (см. рисунок 3). Размеры конечных элементов во всех моделях (см. рисунок 4а) приняты одинаково: по длине плиты - 50 мм, по высоте - 20 мм, на отдельных участках – 15 мм (в зоне защитного слоя бетона, т.е. от грани элемента до арматуры); высота стержневых элементов – соответствует диаметру арматурного стержня.

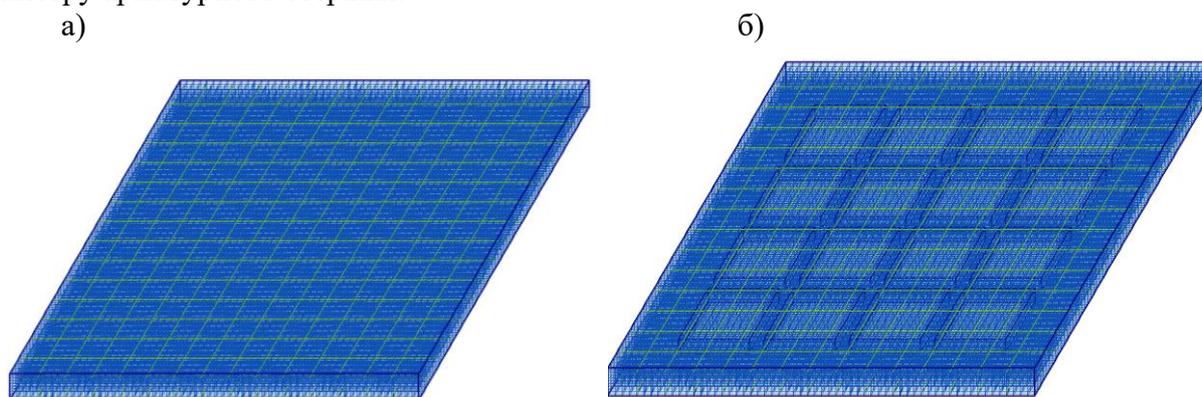


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель плиты перекрытия: полнотелая (а) и с пустотообразователями (б)

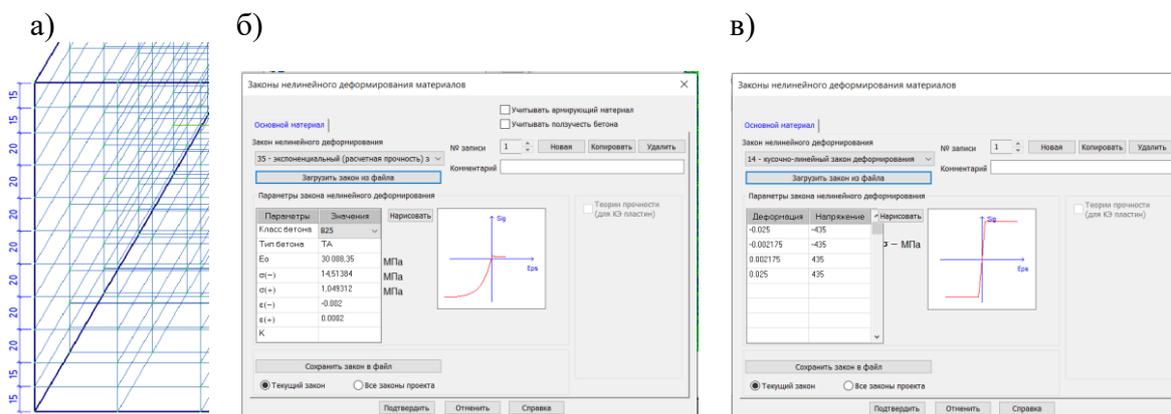


Рисунок 4 – Фрагмент конечно-элементной модели с указанием принятых размеров по высоте (а) и принятые законы нелинейного деформирования для бетона (а) и арматуры (б)

Бетонные составляющие смоделированы с помощью физически нелинейного универсального пространственного восьмиузлового изопараметрического элемента типа КЭ236. Для описания закона деформирования бетона в моделях использовалась экспоненциальная зависимость (№35), т.к. учитывает сцепление основного материала с армирующим. Диаграмма « σ - ε » строится программным комплексом автоматически в зависимости от класса и типа бетона (см. рисунок 4б). Армирование плиты моделировалось физически нелинейными универсальными пространственными стержневыми конечными элементами суперэлементного построения типа КЭ210. Для описания закона деформирования арматуры (см. рисунок 4в) была использована кусочно-линейная зависимость (№14). Ввиду отсутствия экспериментальных данных, исходные данные для построения экспоненциальной и кусочно-линейной зависимостей принимались по данным СП 63.13330.2018 [21]. В моделях, предусматривающие наличие пустотообразователей («Ps»), пустоты моделировались путем удаления конечных объемных элементов на заданных участках.

Таким образом, в программном комплексе численные модели геометрически и физически полностью идентичны своим прообразам. Для обеспечения жесткой заделки в моделях, по контуру, были наложены связи, запрещающие перемещения и повороты во всех плоскостях. В расчетах учитывался собственный вес плиты и нагрузка, равномерно распределенная по верхней грани. Расчет производился шаговым методом, т.е. программа организует пошаговое нагружение конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения.

Величина максимальной расчетной равномерно распределенной нагрузки, при которой произойдет исчерпание несущей способности в нормальном сечении была предварительно определена согласно требованиям п.8.1.8 СП 63.13330.2018 [21], приравнивая изгибающий момент от внешней нагрузки (M) к изгибающему моменту, который может быть воспринят наиболее опасным нормальным сечением (M_{ult}):

$$M \leq M_{ult} \quad (1)$$

Исходя из расчетной схемы плиты с жестким сопряжением по периметру, максимальное значение изгибающий момент достигнет в опорной зоне, а его величина согласно справочным данным [22] составит:

$$M = \frac{51 \cdot q \cdot l^2}{1000} \quad (2)$$

где, l – расчетный пролет плиты (м);

q – равномерно-распределенная нагрузка (кПа), представляющая собой сумму равномерно-распределенной нагрузки от собственного веса ($q_{св}$) и внешнего воздействия ($q_{вн}$):

$$q = q_{св} + q_{вн} \quad (3)$$

$$q_{св} = k \cdot \delta \cdot \gamma \quad (4)$$

где, k – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый согласно СП 20.13330.2020 [23] равным 1,1 для железобетонного изделия;

δ – толщина плиты (м);

γ – объемный вес железобетона (25 кН/м³).

Таким образом, значение максимальной расчетной равномерно распределенной нагрузки определяется по формуле:

$$q_{вн} = \frac{1000 \cdot M_{ult}}{51 \cdot l^2} - q_{св} \quad (5)$$

Таблица 2 – Результаты аналитического расчета эталонных образцов

| Условное обозначение модели | h_0 (мм) | R_s (МПа) | R_b (МПа) | A_s (мм ²) | l (мм) | x (мм) | M_{ult} (кН·м) | $q_{вн}$ (кПа) |
|-----------------------------|------------|-------------|-------------|--------------------------|----------|----------|------------------|----------------|
| A-Et | 170 | 435 | 14.5 | 252 | 3000 | 7,56 | 18,22 | 34,2 |
| B-Et | | | | 393 | 4000 | 11,79 | 28,05 | 28,9 |
| C-Et | | | | 566 | 5000 | 16,98 | 39,77 | 25,7 |
| D-Et | | | | 770 | 6000 | 23,10 | 53,07 | 23,4 |

Величина изгибающего момента, который может быть воспринят наиболее опасным нормальным сечением определяется с учетом имеющегося в сечении симметричного армирования, т.е. по п.8.1.13 [21]:

$$M_{ult} = R_s \cdot A_s \cdot (h_0 - a') \quad (6)$$

Т.к. высота сжатой зоны $x < a'$, уравнение примет следующий вид:

$$M_{ult} = R_s \cdot A_s \cdot (h_0 - 0.5x) \quad (7)$$

Высота сжатой зоны определяется по формуле п.8.1.9 [21] без учета сжатой арматуры:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} \quad (8)$$

Исходные данные и результаты аналитического расчета эталонных образцов каждой серии представлены в таблице 2.

Результаты исследования и их анализ

В процессе эксперимента контролировались величины сжимающих и растягивающих напряжений в бетоне и арматуре при заданном уровне нагружения. Результаты проведенного численного эксперимента приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты численного эксперимента

| № этапа нагружения | Нагрузка q (кПа) | Сжимающее напряжение в бетоне σ_{b-} (МПа) | Растягивающее напряжение в бетоне σ_{b+} (МПа) | Сжимающее напряжение в арматуре σ_{s-} (МПа) | Растягивающее напряжение в арматуре σ_{s+} (МПа) |
|--------------------|--------------------|---|---|---|---|
| A-Et | | | | | |
| 1 | 3,42 | 0,24 | 0,24 | 0,99 | 0,99 |
| 2 | 6,84 | 0,485 | 0,448 | 2,01 | 2,11 |
| 3 | 10,26 | 0,737 | 0,624 | 3,06 | 3,38 |
| 4 | 13,68 | 0,997 | 0,768 | 4,17 | 4,85 |
| 5 | 17,1 | 1,27 | 0,88 | 5,31 | 6,58 |
| 6 | 20,52 | 1,54 | 0,96 | 6,50 | 8,61 |
| 7 | 23,94 | 1,83 | 1,01 | 7,75 | 11,01 |
| 8 | 27,36 | 2,14 | 1,04 | 9,05 | 13,92 |
| 9 | 30,78 | 2,45 | 1,05 | 10,42 | 17,36 |
| 10 | 34,2 | 2,78 | 1,05 | 11,85 | 21,47 |
| A-Ps | | | | | |
| 1 | 3,42 | 0,236 | 0,236 | 0,97 | 0,96 |
| 2 | 6,84 | 0,478 | 0,441 | 1,97 | 2,05 |
| 3 | 10,26 | 0,727 | 0,616 | 3,00 | 3,30 |
| 4 | 13,68 | 0,982 | 0,759 | 4,08 | 4,73 |
| 5 | 17,1 | 1,25 | 0,871 | 5,19 | 6,40 |
| 6 | 20,52 | 1,52 | 0,953 | 6,36 | 8,37 |
| 7 | 23,94 | 1,81 | 1,01 | 7,57 | 10,72 |
| 8 | 27,36 | 2,1 | 1,04 | 8,85 | 13,54 |
| 9 | 30,78 | 2,41 | 1,05 | 10,18 | 16,94 |
| 10 | 34,2 | 2,74 | 1,05 | 11,57 | 21,07 |

| № этапа загрузки | Нагрузка q (кПа) | Сжимающее напряжение в бетоне σ_{b-} (МПа) | Растягивающее напряжение в бетоне σ_{b+} (МПа) | Сжимающее напряжение в арматуре σ_{s-} (МПа) | Растягивающее напряжение в арматуре σ_{s+} (МПа) |
|------------------|--------------------|---|---|---|---|
| В-Et | | | | | |
| 1 | 2,89 | 0,369 | 0,369 | 1,57 | 1,57 |
| 2 | 5,78 | 0,754 | 0,659 | 3,22 | 3,48 |
| 3 | 8,67 | 1,16 | 0,868 | 4,97 | 5,86 |
| 4 | 11,56 | 1,59 | 0,994 | 6,84 | 8,92 |
| 5 | 14,45 | 2,05 | 1,05 | 8,84 | 12,87 |
| 6 | 17,34 | 2,54 | 1,05 | 11,01 | 18,22 |
| 7 | 20,23 | 3,07 | 1,05 | 13,38 | 24,59 |
| 8 | 23,12 | 3,63 | 1,05 | 15,80 | 31,85 |
| 9 | 26,01 | 4,21 | 1,05 | 18,34 | 39,75 |
| 10 | 28,9 | 4,8 | 1,05 | 21,02 | 47,90 |
| В-Ps | | | | | |
| 1 | 2,89 | 0,37 | 0,37 | 1,59 | 1,59 |
| 2 | 5,78 | 0,752 | 0,655 | 3,26 | 3,49 |
| 3 | 8,67 | 1,15 | 0,857 | 5,01 | 5,82 |
| 4 | 11,56 | 1,57 | 0,982 | 6,85 | 8,75 |
| 5 | 14,45 | 2,01 | 1,04 | 8,83 | 12,51 |
| 6 | 17,34 | 2,48 | 1,05 | 10,93 | 17,45 |
| 7 | 20,23 | 2,99 | 1,05 | 13,12 | 23,57 |
| 8 | 23,12 | 3,54 | 1,05 | 15,54 | 30,70 |
| 9 | 26,01 | 4,1 | 1,05 | 18,09 | 38,60 |
| 10 | 28,9 | 4,68 | 1,05 | 20,64 | 47,13 |
| С-Et | | | | | |
| 1 | 2,57 | 0,521 | 0,521 | 2,23 | 2,23 |
| 2 | 5,14 | 1,08 | 0,871 | 4,63 | 5,20 |
| 3 | 7,71 | 1,68 | 1,04 | 7,27 | 9,37 |
| 4 | 10,28 | 2,35 | 1,05 | 10,17 | 15,47 |
| 5 | 12,85 | 3,1 | 1,05 | 13,44 | 23,70 |
| 6 | 15,42 | 3,89 | 1,05 | 16,89 | 33,16 |
| 7 | 17,99 | 4,73 | 1,05 | 20,60 | 43,06 |
| 8 | 20,56 | 5,58 | 1,05 | 24,49 | 52,79 |
| 9 | 23,13 | 6,44 | 1,05 | 28,56 | 62,42 |
| 10 | 25,7 | 7,29 | 1,05 | 32,89 | 72,33 |
| С-Ps | | | | | |
| 1 | 2,57 | 0,491 | 0,491 | 2,10 | 2,10 |
| 2 | 5,14 | 1,01 | 0,836 | 4,36 | 4,87 |
| 3 | 7,71 | 1,58 | 1,02 | 6,83 | 8,74 |
| 4 | 10,28 | 2,21 | 1,05 | 9,55 | 14,41 |
| 5 | 12,85 | 2,91 | 1,05 | 12,56 | 22,28 |
| 6 | 15,42 | 3,67 | 1,05 | 15,83 | 31,83 |
| 7 | 17,99 | 4,48 | 1,05 | 19,27 | 42,00 |
| 8 | 20,56 | 5,32 | 1,05 | 22,81 | 52,17 |
| 9 | 23,13 | 6,18 | 1,05 | 26,53 | 62,42 |
| 10 | 25,7 | 7,03 | 1,05 | 30,50 | 73,03 |
| Д-Et | | | | | |
| 1 | 2,34 | 0,688 | 0,688 | 2,97 | 4,04 |
| 2 | 4,68 | 1,44 | 1,04 | 6,27 | 10,08 |
| 3 | 7,02 | 2,3 | 1,05 | 10,07 | 19,81 |
| 4 | 9,36 | 3,29 | 1,05 | 14,29 | 33,60 |
| 5 | 11,7 | 4,36 | 1,05 | 19,04 | 48,54 |
| 6 | 14,04 | 5,49 | 1,05 | 24,04 | 64,01 |

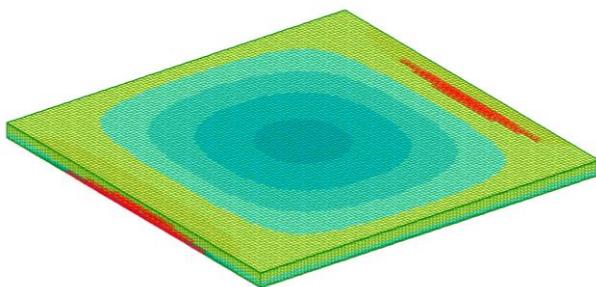
| № этапа загрузки | Нагрузка q (кПа) | Сжимающее напряжение в бетоне σ_{b-} (МПа) | Растягивающее напряжение в бетоне σ_{b+} (МПа) | Сжимающее напряжение в арматуре σ_{s-} (МПа) | Растягивающее напряжение в арматуре σ_{s+} (МПа) |
|------------------|--------------------|---|---|---|---|
| 7 | 16,38 | 6,62 | 1,05 | 29,37 | 80,37 |
| 8 | 18,72 | 7,74 | 1,05 | 35,15 | 96,37 |
| 9 | 21,06 | 8,8 | 1,05 | 41,52 | 113,17 |
| 10 | 23,4 | 9,77 | 1,05 | 48,54 | 129,09 |
| D-Ps | | | | | |
| 1 | 2,34 | 0,646 | 0,646 | 2,79 | 3,79 |
| 2 | 4,68 | 1,35 | 1 | 5,85 | 9,28 |
| 3 | 7,02 | 2,13 | 1,05 | 9,29 | 17,86 |
| 4 | 9,36 | 3,03 | 1,05 | 13,19 | 30,68 |
| 5 | 11,7 | 4,04 | 1,05 | 17,54 | 45,27 |
| 6 | 14,04 | 5,11 | 1,05 | 22,09 | 61,10 |
| 7 | 16,38 | 6,21 | 1,05 | 26,90 | 78,34 |
| 8 | 18,72 | 7,33 | 1,05 | 32,03 | 95,49 |
| 9 | 21,06 | 8,39 | 1,05 | 37,82 | 113,17 |
| 10 | 23,4 | 9,38 | 1,05 | 43,86 | 131,74 |

Анализ результатов проведенного исследования на основе компьютерного моделирования позволяет отметить следующее:

1. Сжимающие и растягивающие напряжения как в бетоне конструкции, так и в арматуре, не превысили предельно допустимых значений для заданных классов: В25 и А500. При этом, в каждой серии на образцы действовала равномерно-распределенная нагрузка, соответствующая предельно допустимой, определенная аналитическим путем (таблица 2). Имеющийся при этом запас по несущей способности указывает на перераспределения напряжений, который не учитывается в ручных расчетах.

2. Как видно из рисунков 5 и 6 пиковые сжимающие напряжения при достижении максимального нагружения возникли в нижней части опорной зоны плиты, а растягивающие – в верхней, что соответствует общепринятым представлениям о характере работы плитных конструкций под нагрузкой.

а)



б)

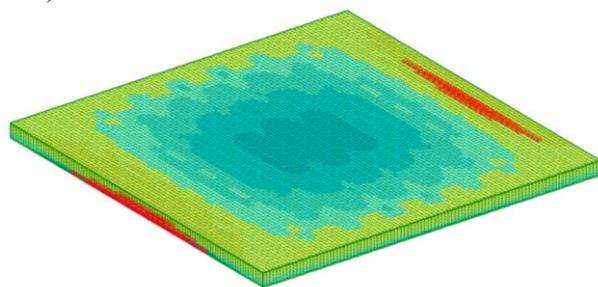


Рисунок 5 – Участки с пиковыми сжимающими напряжениями в бетоне плиты (выделены красным цветом): полнотелая (а) и с пустообразователями (б)

3. Как видно из таблицы 3, при достижении в отдельных конечных (объемных) элементах, моделирующих бетон, предельных растягивающих напряжений, равных 1,05 МПа, при последующем увеличении нагрузки данный показатель не увеличивался. Данный факт свидетельствует, что программным комплексом моделируется выключение из работы элемента при достижении в нем предельно допустимого напряжения, что соответствует действительному характеру разрушения материала под нагрузкой: фактически на этих участках появляются трещины.

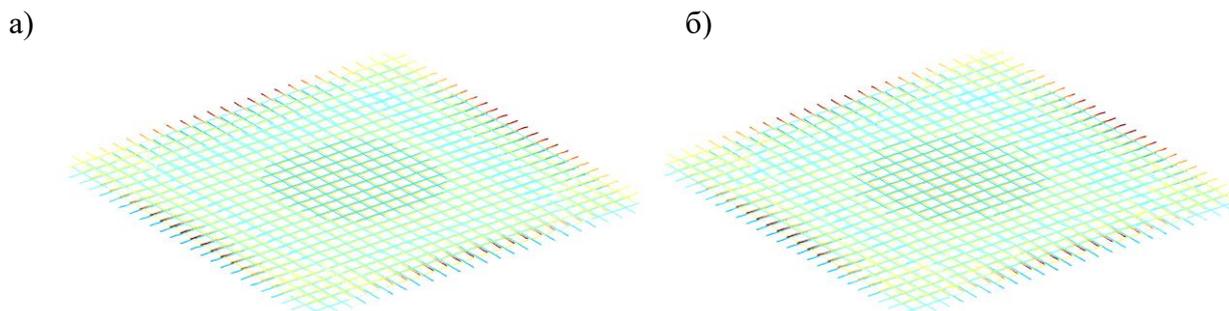


Рисунок 6 – Участки с пиковыми сжимающими (синие участки) и растягивающими (красные участки) напряжениями в арматуре плиты: полнотелая (а) и с пустотообразователями (б)

4. Сравнительный анализ возникающих напряжений в бетоне и арматуре полнотелых плит и плит с пустотообразователями (см. таблицу 4) при максимальном уровне нагружения показывает следующее:

- сжимающие напряжения в бетоне плит с пустотообразователями ниже на $1,4 \div 4,0$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- сжимающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $2,4 \div 9,6$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- для плит длиной 3,0 и 4,0 м растягивающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $1,6 \div 1,9$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых);
- для плит длиной 5,0 и 6,0 м растягивающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями выше на $1,0 \div 2,1$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых).

Таблица 4 – Сравнительный анализ результатов эксперимента при максимальном уровне нагружения

| Условное обозначение модели | Напряжение (сжатие) в бетоне σ_{b-} (МПа) | Разница относительно эталонного образца (%) | Напряжение (сжатие) в арматуре σ_{s-} (МПа) | Разница относительно эталонного образца (%) | Напряжение (растяжение) в арматуре σ_{s+} (МПа) | Разница относительно эталонного образца (%) |
|---|--|---|--|---|--|---|
| Серия «А» при нагрузке $q = 34,2$ кПа | | | | | | |
| A-Et | 2,78 | - | 11,85 | - | 21,47 | - |
| A-Ps | 2,74 | -1,4 | 11,57 | -2,4 | 21,07 | -1,9 |
| Серия «В» при нагрузке $q = 28,9$ кПа | | | | | | |
| B-Et | 4,8 | - | 21,02 | - | 47,90 | - |
| B-Ps | 4,68 | -2,5 | 20,64 | -1,8 | 47,13 | -1,6 |
| Серия «С» при нагрузке $q = 25,7$ кПа | | | | | | |
| C-Et | 7,29 | - | 32,89 | - | 72,33 | - |
| C-Ps | 7,03 | -3,6 | 30,50 | -7,3 | 73,03 | +1,0 |
| Серия «Д» при нагрузке $q = 23,4$ кПа | | | | | | |
| D-Et | 9,77 | - | 48,54 | - | 129,09 | - |
| D-Ps | 9,38 | -4,0 | 43,86 | -9,6 | 131,74 | +2,1 |

5. Учитывая, что плитные конструкции, в основном проектируются под заданное значение нагрузки, которое чаще на практике меньше, чем в данном эксперименте, то сравнительному анализу подверглись напряжений в бетоне и арматуре полнотелых плит и плит с пустотообразователями (см. таблицу 5) при усредненной нагрузке на плиту перекрытия. Например, в торговых (выставочных) помещениях, эта нагрузка приблизительно равна 16-18 кПа (с учетом собственного веса перекрытия и конструкций пола). При

указанной нагрузке (для каждой серии образцов выбрано свое значение, соответствующее определенному шагу нагружения в эксперименте) получаем следующее:

- сжимающие напряжения в бетоне плит с пустотообразователями ниже на $1,6 \div 6,2$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- сжимающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $2,3 \div 8,4$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- растягивающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $2,5 \div 4,2$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых).

Таблица 5 – Сравнительный анализ результатов эксперимента при промежуточном уровне нагружения

| Условное обозначение модели | Напряжение (сжатие) в бетоне σ_{b-} (МПа) | Разница относительно эталонного образца (%) | Напряжение (сжатие) в арматуре σ_{s-} (МПа) | Разница относительно эталонного образца (%) | Напряжение (растяжение) в арматуре σ_{s+} (МПа) | Разница относительно эталонного образца (%) |
|--|--|---|--|---|--|---|
| Серия «А» при нагрузке $q = 17,1$ кПа | | | | | | |
| A-Et | 1,27 | - | 5,31 | - | 6,58 | - |
| A-Ps | 1,25 | -1,6 | 5,19 | -2,3 | 6,40 | -2,7 |
| Серия «В» при нагрузке $q = 17,34$ кПа | | | | | | |
| B-Et | 2,54 | - | 11,01 | - | 18,22 | - |
| B-Ps | 2,48 | -2,4 | 10,93 | -0,7 | 17,45 | -4,2 |
| Серия «С» при нагрузке $q = 17,99$ кПа | | | | | | |
| C-Et | 4,73 | - | 20,60 | - | 43,06 | - |
| C-Ps | 4,48 | -5,3 | 19,27 | -6,5 | 42,00 | -2,5 |
| Серия «D» при нагрузке $q = 16,38$ кПа | | | | | | |
| D-Et | 6,62 | - | 29,37 | - | 80,37 | - |
| D-Ps | 6,21 | -6,2 | 26,90 | -8,4 | 78,34 | -2,5 |

Выводы

Проанализировав результаты исследования, можно сделать вывод, что использование несъемных пустотообразователей в монолитной железобетонной плите не снижает ее прочность, при этом позволяет сократить расход бетона на $18,3 \div 23,1$ %, что дает значительное преимущество по сравнению с традиционной полнотелой плитой в части экономической эффективности.

При максимально допустимой равномерно-распределенной нагрузке, в плите, за счет использования пустотообразователей, напряжения в сжатом бетоне снизились на $1,4 \div 4,0$ %, в сжатой арматуре на $2,4 \div 9,6$ %, в растянутой арматуре на $1,6 \div 1,9$ % (только для плит пролетом 3,0 и 4,0 м). При этом для плит пролетом 5,0 и 6,0 м, было отмечено незначительное повышение (на $1,0 \div 2,1$ %) напряжения в растянутой арматуре образцов, имеющих пустотообразователи. Эту особенность необходимо учитывать при проектировании монолитных железобетонных плит с несъемными пустотообразователями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9561-91 «Плиты перекрытий железобетонные многопустотные для зданий и сооружений технические условия».
2. Прилуцкий О.Г. Способ изготовления монолитного строительного элемента // Патент России №RU2243889C2. 10.01.2005.
3. ООО «К-РегионСтрой». Многопустотная железобетонная плита перекрытия // Патент №RU49853U1. 10.12.2005.
4. Котенков И.А. Многопустотная железобетонная плита перекрытия // Патент Беларуси №BY7667U. 30.10.2011.
5. УО «БГТУ». Пустотообразователь безбалочной плиты перекрытия // Патент Беларуси №BY8418U. 30.08.2012.

6. Мартынов А.А. Способ изготовления зданий и сооружений с трансформируемой в процессе эксплуатации планировкой // Патент России №RU2488667C2. 27.07.2013.
7. Пушкарев Б.А. Способ изготовления монолитных железобетонных балочных плит перекрытий с круглыми пустотами, с применением неизвлекаемых картонно-полиэтиленовых пустотообразователей // Патент России №RU2634156C2. 24.10.2017.
8. СТО 38311046-001-2019 «Монолитные железобетонные облегченные плиты с пустотообразователями Simkar. Правила проектирования и возведения».
9. СТО 35546020.001-2016 «Несъемная опалубка (пустотообразователи и соединительные муфты) Сибформа®. Общие сведения о технологии, номенклатура изделий. Рекомендации по расчету и конструированию монолитных безбалочных плит перекрытий с несъемной опалубкой Сибформа® в соответствии с СП 63.13330.2012».
10. Tiwari N. and Zafar S. Structural Behavior of Bubble Deck Slabs and Its Application: Main Paper. *IJSRD International Journal for Scientific Research & Development*. 2016. Vol. 4. Issue 02. Pp: 433-437. ISSN (online): 2321-0613.
11. Ibrahim A. M., Ali N. K., and Salman W. D. Flexural Capacities of Reinforced Concrete Two-Way Bubbledeck Slabs of Plastic Spherical Voids. *J. Print. Iraq*. 2013. Vol. 06. No. 02. Pp: 9-20.
12. Valivonis J., Skuturna T, Daugevius M. and Šneideris A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs with plastic void formers. *Constr. Build. Mater*. 2017. Vol.145. Pp: 518-527.
13. Saifulla M., Azeem M. A. Comparative Seismic Performance of a Conventional Slab and Flat Slab over a Bubble Deck Slab. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. November 2017. Vol. 7. Issue 11.. Pp: 137-143.
14. Teja P. P., Kumar P. V, Mounika C. R., and Saha P. Structural Behavior of Bubble Deck Slab. January 2012. Pp: 383-388.
15. Lakshmikanth L., Poluraju P. Performance of Structural Behaviour of Bubble Deck Slab. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. April 2019. Vol.7. Issue 6C2. ISSN: 2277-3878.
16. Varghese J. P, M. George. Parametric Investigation on the Seismic Response of Voided and Solid Flat Slab Systems. *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. March 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp: 256-258.
17. Mahalakshmi S., S. Nanthini S., and Saha A. P. Experimental Studies on Comparison of Conventional Slab and Bubble Deck Slab Based on Strength. 2017. Vol. 5. Pp: 580-588.
18. Орлова М.Д., Мнушкин М.А., Евтушенко И.С., Виноградова К.И., Егармин К.А. Анализ применения пустотообразователей из рециклированного полипропилена при создании облегченных монолитных перекрытий. Исследование различных направлений современной науки: Сборник материалов XXI Международной научно-практической конференции. Ч.1. Москва. 2017. С.562-567.
19. Филимонова Е. С. Анализ напряженно-деформированного состояния монолитной плиты перекрытия с пустотообразователями по системе Cobiax на основании различных расчетных моделей // Молодой ученый. 2022. № 20 (415). С. 107-109.
20. Малахова А.Н. Пустотные кессонные плиты перекрытий монолитных многоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2016. № 6. С. 15-24.
21. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003».
22. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений / под ред. А.А. Уманского. М.: Госстройиздат, 1960. 1041 с.
23. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*».

REFERENCES

1. GOST 10180-2012 «Reinforced concrete multi-cavity floor slabs for buildings and structures technical conditions». (rus)
2. Prilutsky O.G. Sposob izgotovleniya monolitnogo stroitel'nogo elementa [Method of manufacturing a monolithic building element] // Russian Patent No.RU2243889C2. 10.01.2005. (rus)
3. ООО «K-RegionStroj». Mnogopustotnaya zhelezobetonnyaya plita perekrytiya [Multi-cavity reinforced concrete floor slab] // Patent No.RU49853U1. 12/10/2005. (rus)
4. Kotenkov I.A. Mnogopustotnaya zhelezobetonnyaya plita perekrytiya [Multi-hollow reinforced concrete floor slab] // Patent of Belarus No.BY7667U. 10/30/2011. (rus)
5. УО «BGTU». Pustotoobrazovatel' bezbalochnoj plity perekrytiya [Void-forming girderless floor slab] // Patent of Belarus No. BY8418U. 30.08.2012. (rus)
6. Martynov A.A. Sposob izgotovleniya zdaniy i sooruzhenij s transformiruemoj v processe ekspluatacii planirovkoj [Method of manufacturing buildings and structures with a layout transformed during operation] // Patent of Russia No. RU2488667C2. 07/27/2013. (rus)
7. Pushkarev B.A. Sposob izgotovleniya monolitnyh zhelezobetonnyh balochnyh плит perekrytij s kruglymi pustotami, s primeneniem neizvlekaemyh kartonno-polietilenovyh pustotoobrazovatelej [Method of manufacturing

- monolithic reinforced concrete floor slabs with round voids, using non-removable cardboard-polyethylene void formers] // Russian Patent No.RU2634156C2. 10/24/2017. (rus)
8. STO 38311046-001-2019 «Monolithic reinforced concrete lightweight slabs with Simkar void formers. Rules of design and construction». (rus)
 9. STO 35546020.001-2016 «Fixed formwork (voids and couplings) Sibforma ®. General information about the technology, product range. Recommendations for the calculation and design of monolithic girderless floor slabs with non-removable formwork Sibform ® in accordance with SP 63.13330.2012». (rus)
 10. Tiwari N. and Zafar S. Structural Behavior of Bubble Deck Slabs and Its Application: Main Paper. *IJSRD International Journal for Scientific Research & Development*. 2016. Vol. 4. Issue 02. Pp: 433-437. ISSN (online): 2321-0613.
 11. Ibrahim A. M., Ali N. K., and Salman W. D. Flexural Capacities of Reinforced Concrete Two-Way Bubbledeck Slabs of Plastic Spherical Voids. *J. Print. Iraq*. 2013. Vol. 06. No. 02. Pp: 9-20.
 12. Valivonis J., Skuturna T, Daugeviius M. and Šneideris A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs with plastic void formers. *Constr. Build. Mater*. 2017. Vol.145. Pp: 518-527.
 13. Saifulla M., Azeem M. A. Comparative Seismic Performance of a Conventional Slab and Flat Slab over a Bubble Deck Slab. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. November 2017. Vol. 7. Issue 11.. Pp: 137-143.
 14. Teja P. P., Kumar P. V, Mounika C. R., and Saha P. Structural Behavior of Bubble Deck Slab. January 2012. Pp: 383-388.
 15. Lakshmikanth L., Poluraju P. Performance of Structural Behaviour of Bubble Deck Slab. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. April 2019. Vol.7. Issue 6C2. ISSN: 2277-3878.
 16. Varghese J. P, M. George. Parametric Investigation on the Seismic Response of Voided and Solid Flat Slab Systems. *IJISET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. March 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp: 256-258.
 17. Mahalakshmi S., S. Nanthini S., and Saha A. P. Experimental Studies on Comparison of Conventional Slab and Bubble Deck Slab Based on Strength. 2017. Vol. 5. Pp: 580-588.
 18. Orlova M.D., Mnushkin M.A., Evtushenko I.S., Vinogradova K.I., Egarmin K.A. Analiz primeneniya pustotoobrazovatelej iz reciklirovannogo polipropilena pri sozdanii oblegchennyh monolitnyh perekrytij. Issledovanie razlichnyh napravlenij sovremennoj nauki: Sbornik materialov XXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. [Analysis of the use of hollow formers from recycled polypropylene in the creation of lightweight monolithic floors. Research of various directions of modern science: Collection of materials of the XXI International Scientific and practical Conference]. Part 1. Moscow. 2017. Pp.562-567. (rus)
 19. Filimonova E. S. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya monolitnoj plity perekrytiya s pustotoobrazovatelyami po sisteme Cobiax na osnovanii razlichnyh raschetnyh modelej [Analysis of the stress-strain state of a monolithic floor slab with void generators according to the Cobiax system based on various computational models] // *J. Young Scientist*. 2022. No. 20 (415). Pp. 107-109. (rus)
 20. Malahova A.N. Pustotnye kessonnye plity perekrytij monolitnyh mnogoetazhnyh zdaniy [Hollow coffered floor slabs of monolithic multi-storey buildings] // *J. Vestnik MGSU*. 2016. No. 6. Pp. 15-24. (rus)
 21. SP 63.13330.2018 «Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated edition of SNiP 52-01-2003». (rus)
 22. Handbook of the designer of industrial, residential and public buildings and structures / edited by A.A. Umansky. Moscow: Gosstroyizdat, 1960. 1041 p. (rus)
 23. SP 20.13330.2016 «Loads and impacts. Updated version of SNiP 2.01.07-85». (rus)

Информация об авторах:

Джамуев Булат Калсынович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: dbk-07@mail.ru

Information about authors:

Dzhamuev Bulat K.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical science, associated professor, associated professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: dbk-07@mail.ru