

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.699

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.4

Экспериментальное исследование динамических характеристик точно опертых квадратных плит

Аветик Гургенович Абовян¹, Александр Суренович Марутян²,
Гурген Аветикович Абовян³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Колледж Института сервиса, туризма и дизайна (филиал Северо-Кавказского федерального университета); г. Пятигорск, Россия;

³ Институт пути, строительства и сооружений (ИПСС) Российский университет транспорта (РУТ) (МИИТ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка методов определения частот и форм колебаний, а также динамических реакций тонких плит с различными системами опирания, в том числе опирающихся на точечные опоры, является актуальной задачей, решению которой посвящена настоящая работа. Цель работы — разработка экспериментальных методов определения частот и форм собственных колебаний тонких точно опертых квадратных сплошных плит и плит с отверстиями.

Материалы и методы. Приводится методика и анализ результатов экспериментальных исследований динамических характеристик квадратных сплошных плит и плит с отверстиями.

Результаты. В данной работе определены частоты собственных колебаний квадратных плит со свободными краями, опирающиеся на точечные опоры; получены зависимости частот колебаний плит от координат точечных опор и размеров симметрично расположенных отверстий; определено расположение точечных опор, при котором основная частота свободных колебаний плиты является максимальной; экспериментально определены частоты, формы и декременты колебаний квадратных плит, опертых на четыре точечных опоры, а также влияния наличия отверстий и степени заземления опор на динамические характеристики этих плит.

Выводы. Сравнение экспериментальных и теоретических значений частот собственных колебаний плит показало их хорошее сходство. Полученные в работе результаты могут быть применены при динамических и сейсмических расчетах точно опертых квадратных плит покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: колебания, вибраторы, модель, плиты, частоты колебаний, точечные опоры

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Абовян А.Г., Марутян А.С., Абовян Г.А. Экспериментальное исследование динамических характеристик точно опертых квадратных плит // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 4. Ст. 4. URL: <http://ns-ojournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.4

Автор, ответственный за переписку: Аветик Гургенович Абовян, abovyan_1958@mail.ru.

Oscillations of point-supported square slabs

Avetik G. Abovyan¹, Alexander S. Marutyan², Gurgen A. Abovyan³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² Branch of the North Caucasus Federal University; Pyatigorsk, Russian Federation;

³ Institute of Roads, Construction and Structures (IPSS) Russian University of Transport (RUT) (MIIT); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of methods for determining the frequencies and forms of vibrations, as well as dynamic reactions of thin slabs with different support systems, including those supported on point supports, is an urgent task, the solution of which is the subject of this paper.

The aim of the work is to develop experimental methods for determining the frequencies and forms of natural vibrations of thin point-supported square solid slabs and slabs with holes.

Materials and methods. The methodology and analysis of experimental results of dynamic characteristics of square solid slabs and slabs with holes are presented.

Results. In this work, the frequencies of natural vibrations of square slabs with free edges resting on point supports are determined; the dependences of frequencies of slabs vibrations on coordinates of point supports and sizes of symmetrically

located holes are obtained; the location of point supports at which the fundamental frequency of slabs free vibrations is maximum, is determined; frequencies, forms and decrements of vibrations of square slabs resting on four point supports are experimentally determined, as well as the influence of presence of holes and the degree of pinching of the supports on the dynamic characteristics of these slabs.

Conclusions. Comparison of experimental and theoretical values of natural vibration frequencies of the slabs showed good similarity. The results obtained in this paper can be applied to dynamic and seismic calculations of point-supported square slab coverings.

KEYWORDS: oscillations, vibrators, model, slabs, oscillation frequencies, point supports

FOR CITATION: Abovyan A.G., Marutyan A.S., Abovyan G.A. Oscillations of point-supported square slabs. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(4):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.4.4

Corresponding author: Avetik G. Abovyan, abovyan_1958@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение работы тонких плит под воздействием динамической нагрузки с давних пор находится в центре внимания исследователей. Тонкие плиты являются одним из основных элементов конструкций зданий и сооружений. Плиты, имеющие различные конструктивные решения и опорные устройства, применяются в покрытиях и перекрытиях жилых, общественных и промышленных зданий, а также в инженерных сооружениях. В зависимости от назначения и архитектурно-планировочного решения здания плиты могут иметь различные очертания и систему опирания, а также отверстия различных форм. Опорами для плит обычно служат стены или колонны — точечные опоры. Плиты опираются на колонны в безбалочных перекрытиях, применяющихся в зданиях различного назначения и в отдельных сооружениях.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования посвящены изгибу плит. Сравнительно сложными и мало изученными задачами являются исследования колебаний плит. Нерегулярность формы, сложная система опирания, а также наличие отверстий усложняют расчет плит, особенно при динамических воздействиях.

Учет динамических эффектов при расчете конструкций особенно необходим в условиях высокой сейсмичности. Как показали анализы последствий землетрясений, максимальное ускорение вертикальной составляющей — примерно того же порядка,

что и ускорение горизонтальной составляющей. Это указывает на то, что проверку несущей способности плит перекрытий и других сооружений необходимо провести с учетом вертикальной составляющей сейсмического воздействия. Следовательно, для динамических и сейсмических расчетов точно опертых плит, применяемых в конструкциях зданий и сооружений, практический интерес представляет определение их динамических характеристик, частот, форм собственных колебаний и декремента затухания. Теоретические исследования этой задачи обычно производятся по приближенным методам расчета [1–19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проверки значений результатов теоретических исследований колебаний точно опертых плит и уточнения отдельных вопросов проводились экспериментальные исследования на моделях сплошных и сквозных стальных плит, опертых на четыре точечные опоры с шарнирными и защемленными опорными устройствами, при различных расположениях координат точечных опор [20–30]. Плиты были изготовлены из стальных листов размерами 1200 × 1200 мм и толщиной 8 мм (рис. 1). Сплошные плиты (рис. 1, а) с координатами расположения точечных опор $X_c = Y_c = 580, 400$ и 300 мм обозначались П-1, П-2 и П-3, плиты с квадратными отверстиями (рис. 1, б), соответственно, П-4,

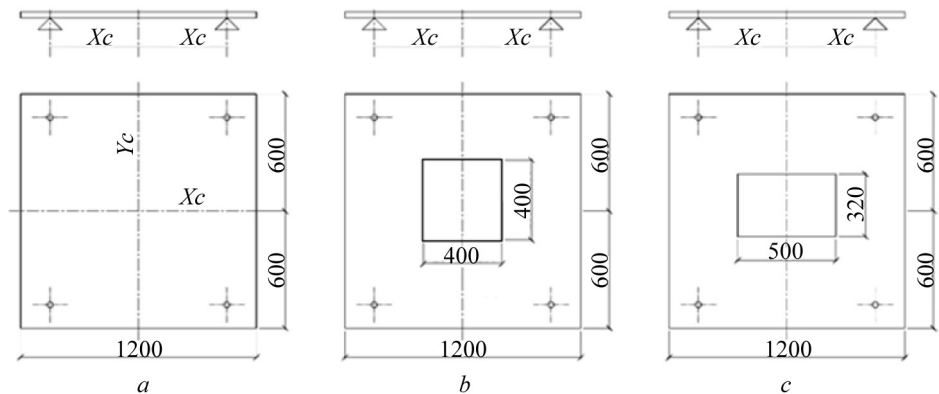


Рис. 1. Модели плит

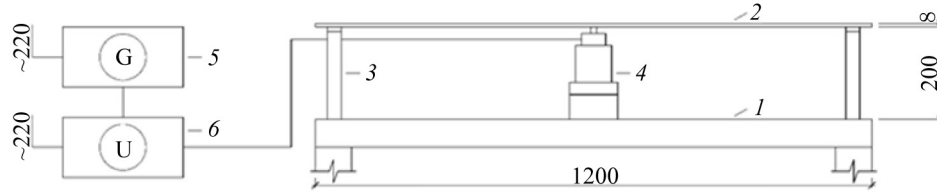


Рис. 2. Схема установки для статических и динамических испытаний



Рис. 3. Схема подключения измерительных приборов

П-5 и П-6, а плиты с прямоугольными отверстиями (рис. 1, с) — П-7, П-8 и П-9.

Итак, испытывались девять плит с различными конструктивными решениями. Ввиду того что все типоразмеры испытывались в условиях шарнирного и защемленного опирания, в дальнейшем изложении к обозначениям плит с шарнирными опорами добавлялись буквы «ш» (П-1ш; П-2ш и т.д.), а к плитам с защемленными опорами — «з» (П-1з; П-2з и т.д.).

Шарнирные соединения осуществлялись стальными полусферами ($d = 30$ мм), установленными в головных частях опорных стоек, а защемления — сжимающимися гайкам, установленными на плиты в головных частях опор.

Для статических и динамических испытаний плит была спроектирована и изготовлена специальная установка, чья упрощенная схема представлена на рис. 2. Установка состоит из испытательного

стола 1, опорных стоек 3 для крепления испытуемых плит 2, электродинамического линейного вибратора 4, генератора 5, измеряющего значения частот электрического тока, усилителя тока 6 и других устройств, необходимых для испытания. Испытания колебаний плит и образование свободных колебаний осуществлялись с помощью нагрузки ($F = 250$ Н), повешенной в их центре. Вынужденные колебания плит возбуждались электродинамическим вибратором, для питания которого использовался низкочастотный генератор марки Г6-15. С помощью последнего плавным повышением частоты тока, передаваемого вибратору, в испытуемых плитах возникали разные частоты колебаний (в том числе и резонансные), по которым и определялись динамические характеристики собственных колебаний плит.

Статические испытания плит осуществлялись для определения их жесткостей, с целью проверки результатов динамических испытаний. Динамические испытания осуществлялись двумя этапами. На первом этапе определялись частоты собственных колебаний плит по первой форме в условиях свободных колебаний, а на втором этапе подвергались вынужденным колебаниям, и в условиях резонансных

Табл. 1. Экспериментальные значения прогибов и частот испытанных плит

Плиты	Прогибы, мм	Частота свободных колебаний, ГЦ	Частоты по формам колебаний		
			I форма	II форма	III форма
1	2	3	4	5	6
П-1ш	1,75	12	11,1	23,0	64,0
П-1з	1,10	15	15,5	29,3	68,0
П-2ш	0,38	26	26,0	50,0	90,5
П-2з	0,25	31	30,0	54,5	94,6
П-3ш	0,21	32	30,5	44,0	86,3
П-3з	0,15	37	35,0	48,3	90,0
П-4ш	2,65	10	10,5	23,0	72,0
П-4з	1,60	16	15,2	30,0	75,5
П-5ш	0,55	29	28,5	42,0	83,0
П-5з	0,35	35	33,0	46,5	88,0
П-6ш	0,30	32	29,0	40,0	80,0
П-6з	0,23	34	33,0	45,3	84,0
П-7ш	2,50	12	11,3	22,5	70,5
П-7з	1,54	15	14,5	27,0	74,0
П-8ш	0,50	32	29,5	45,0	90,0
П-8з	0,35	34	33,2	49,5	95,0
П-9ш	0,28	30	30,0	45,3	78,0
П-9з	0,21	35	34,0	50,0	83,0

Табл. 2. Теоретические значения частот

Плиты	Значения частот собственных колебаний, Гц			
	I форма		III форма	
	Теоретическая	Экспериментальная	Теоретическая	Экспериментальная
П-1ш	11,0	11,1	63,5	64,0
П-2ш	24,2	26,0	89,8	90,5
П-3ш	27,4	30,5	91,2	86,3
П-4ш	10,0	11,0	—	72,0
П-5ш	28,0	28,5	—	83,0
П-6ш	30,9	29,0	—	80,0

колебаний определялись перемещения и частоты по I, II и III формам собственных колебаний.

Перемещения и частоты свободных и вынужденных колебаний плит определялись вибраторами марки СВ-10ц. Система измерительных приборов (рис. 3) состоит из вибратора 1, коробки сопротивления 2 и осциллографа 3 марки НО-441.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные значения прогибов и частот испытанных плит приведены в табл. 1.

С целью проверки результатов значений теоретических исследований колебаний точно опертых плит из графиков, приведенных в работе [31], были определены теоретические значения частот колебаний исследуемых плит, которые сравнивались с соответствующими значениями частот, определенных экспериментальным путем (табл. 2).

Для построения форм колебаний плит на 170 точках их поверхностей измерялись прямолинейные перемещения. По осциллограммам перемещений были построены I, II, III формы колебаний плит (рис. 4–7).

Ввиду незначительного влияния форм и размеров отверстий на динамические характеристики плит ниже приводятся только некоторые результаты испытаний сплошных плит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных, приведенный в табл. 1, показывает, что закрепление опор приводит к увеличению жесткости плит и, соответственно, к изменению частот. Степень увеличения жесткости зависит от координат расположения опор: при расположении опор в углах плиты (П-1, П-4, П-7) жесткость увеличилась в среднем в 1,62 раза, при установке координат опор $X_c = Y_c = 400$ мм (П-2, П-5 и П-8) — в 1,51 раза и в случае $X_c = Y_c = 300$ мм (П-3, П-6, П-9) — в 1,34 раза. Пропорционально изменению жесткости увеличились также частоты собственных колебаний плит.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных значений частот собственных колебаний плит (табл. 2) показывает, что они очень близки по значению и при колебаниях по I форме

в среднем различаются на 6 %, а при колебаниях по III форме — на 2,5 %.

Формы колебаний сплошной плиты (П-1ш) и плиты с консольными частями (П-2ш) по ее отдельным осям в виде осевых линий показаны на рис. 4. При совместном рассмотрении построенных осевых линий можно заметить, что I форма колебания плиты представляет собой двустороннюю оболочку, опертую на четыре точки. II и III формы колебаний плит в пространстве представляют собой оболочки с положительной и отрицательной кривизной, опертые на четыре точки. I форма колебаний с консольными частями (П-2ш) также представляет собой двустороннюю оболочку.

Значения декрементов колебаний плит определялись по осциллограммам затухающих колебаний и по резонансным кривым. По результатам экспериментальных исследований получилось, что декремент затухания зависит от условий закрепления опор плиты и формы колебаний. Так, например, величина декремента плит с шарнирным опиранием для колебаний по I, II и III формам получились 0,072, 0,047 и 0,038, а для плит с защемленным опиранием для колебаний первых трех форм, соответственно, 0,065, 0,043 и 0,036.

Из данных, приведенных в столбцах 3 и 4 табл. 1, видно, что значения полученных частот свободных и вынужденных (резонансных) колебаний почти одинаковы и отличаются друг от друга в среднем на 4,5 %. Это обстоятельство подтверждает достоверность частот, определенных резонансными колебаниями.

Из данных, приведенных в табл. 1, очевидно также, что наличие отверстий и их вид не оказывают существенного воздействия на частоты колебаний, несмотря на то, что жесткость последних существенно изменяется (для плит с квадратными отверстиями в 1,43–1,51 раза, а для плит с прямоугольными отверстиями и в 1,33–1,43 раза). Несущественное изменение частот можно объяснить тем, что наличие отверстий одновременно с уменьшением жесткости плиты уменьшает ее массу.

Близость теоретических и экспериментальных значений частот колебаний (табл. 2) свидетельствует о достоверности решения теоретической задачи.

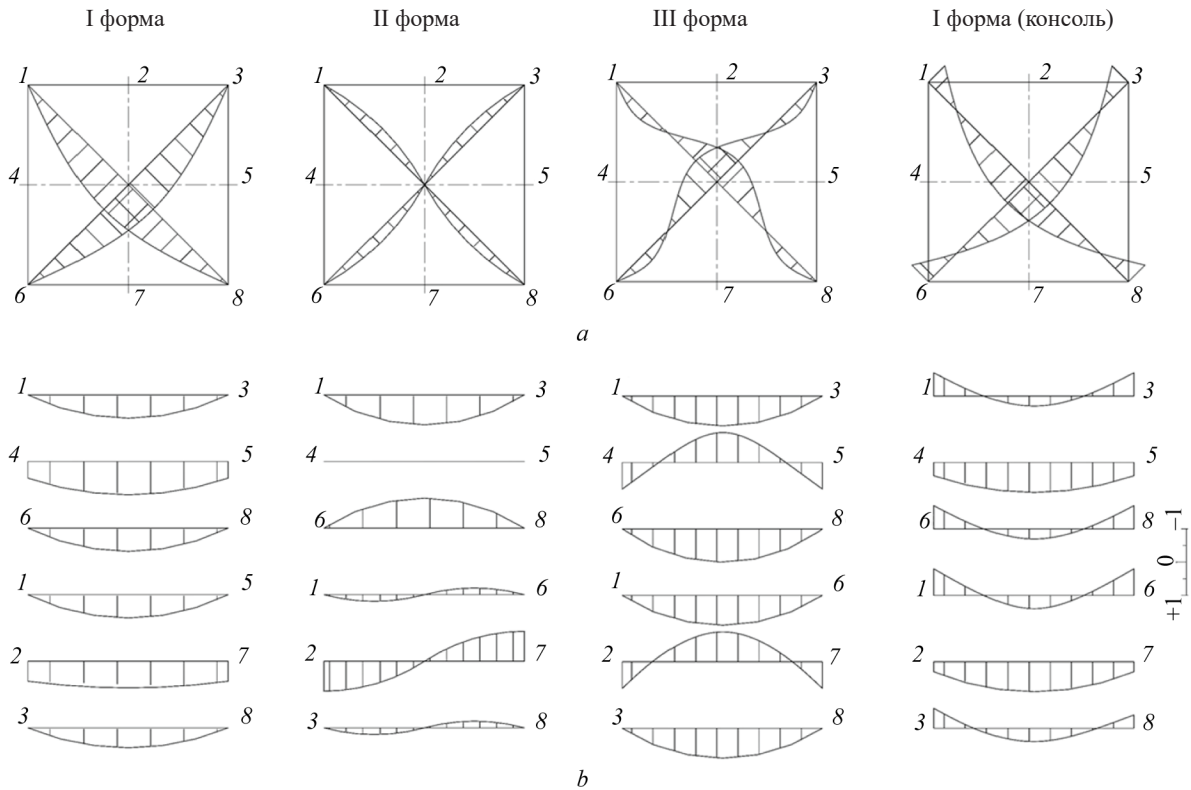


Рис. 4. Формы колебаний плиты с шарнирным опиранием по углам и плиты с консолями: а — схема с нумерациями точек и формы колебаний по диагонали; б — формы колебаний по обозначенным осям

Декремент колебаний при шарнирном опирании плиты по сравнению с защемленным опиранием получился приблизительно на 10 % больше.

Что касается зависимости декремента колебания от формы колебаний, то он уменьшается соответственно увеличению степени колебаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Abovyan A.G. Way of simulating of seismic impact on building and structures // XXVII RSP seminar TFoCE, Zilina. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012024
2. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Расчет железобетонных плит на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2 (35). С. 107–110.
3. Бержинская Л.П., Бержинский Ю.А., Киселев Д.В., Ордынская А.П. Идентификация динамической модели по результатам вибрационных испытаний фрагмента бетонного каркаса с использованием безригельного каркаса с использованием BK SCAD, CAD Master // Архитектура и строительство. 2007. № 2. С. 94–98.
4. Абовян А.Г., Абовян Ар.Г. Исследование графиков колебаний зданий и сооружений при воздействии реальных землетрясений // Сборник научных трудов ЕрГУАС. Ереван, 2003. Т. 2. С. 1–3.
5. Абовян А.Г., Абовян Ар.Г., Абовян Г.А. Зависимость декремента затухания от форм колебаний плит // Сборник научных трудов ЕрГУАС. Ереван, 2001. Т. 3. С. 5–7.
6. Амбарцумян В.А., Абовян А.Г. Колебания круглой плиты при кинематическом возбуждении точечных опор // Инженерные проблемы строительной механики : межвузов. сб. науч. трудов. 1990. С. 80–84.
7. Chiaia B., Kumpyak O., Maksimov V., Placidi L. Experimental analysis and Modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading // Engineering Structures. 2015. Vol. 96. Pp. 88–99. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.054
8. Kezmane A., Placidi L., Chiaia B., Kumpyak O., Maksimov V. 3D modelling of reinforced concrete slab with yielding supports subject to impact load // European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017. Vol. 21. Issue. 7–8. Pp. 988–1025. DOI: 10.1080/19648189.2016.1194330
9. Кумпяк О.Г., Меццулов Н.В. Прочность сжатых изгибаемых железобетонных конструкций по наклонным сечениям при податливых опорах при динамическом нагружении // Вестник Томского го-

сударственного архитектурно-строительного университета, 2014. № 6 (47). С. 70–80.

10. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading // AIP Conference Proceedings : Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists “Advanced Materials in Technology and Construction”. 2016. P. 070006. DOI: 10.1063/1.4937876

11. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Максимов В.Б. Исследование железобетонных плит, опертых по контуру на жесткие и податливые опоры, при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2013. № 1 (38). С. 69–76.

12. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Максимов В.Б. Железобетонные плиты на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Бетон и железобетон, 2014. № 5. С. 16.

13. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Экспериментальные исследования опертых по контуру железобетонных плит с распором // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3 (50). С. 113–120.

14. Kumpyak O.G., Mescheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2017. Vol. 13. Issue 4. Pp. 103–113.009.

15. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Кокорин Д.Н., Максимов В.Б. Прочность и деформативность железобетонных балок и плит на податливых опорах при интенсивном динамическом нагружении // Бетон и железобетон — взгляд в будущее. Науч. труды III Всеросс. (II Международ.) конф. по бетону и железобетону : в 7 т. 2014. С. 315–325.

16. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Деформирование железобетонных плит на податливых опорах при динамических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2017. № 1. С. 28–34.

17. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Прочность и деформативность опертых по контуру железобетонных плит с распором // Общество. Наука. Инновации (НПК-2021) : сб. ст. XXI Всеросс. науч.-практ. конф. Киров, 2021. С. 472–478.

18. Кумпяк О.Г., Мещеулов Н.В. Экспериментальное исследование наклонных сечений сжатых железобетонных конструкций на податливых опорах при поперечном кратковременном динамическом воздействии // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. М., 2016. С. 213–217.

19. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Исследование динамического деформирования железобетон-

ных плит на податливых опорах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (54). С. 107–115.

20. Алявдин П.В., Музычкин Ю.А. Анализ динамической модели фрагмента перекрытия здания // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. № 1 (26). С. 137–143.

21. Алявдин П.В., Музычкин Ю.А. Свободные колебания плитно-балочного фрагмента перекрытия зданий // Механика машин, механизмов и материалов, 2009. № 1. С. 162–167.

22. Педиков А.В. Исследование сжато-изгибаемых железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении : дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2006. 171 с.

23. Босаков С.В., Мордич А.И., Карякин А.А., Сонин С.А., Дербенцев И.С., Попп П.В. Результаты испытаний нагружением сборно-монолитного перекрытия, опертого на несущие стены многоэтажного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 2. С. 35–42.

24. Айвазов Р.Л., Лапицкий И.В. Сборное перекрытие, опертое по контуру и работающее с поперечным распором // Бетон и железобетон. 1991. № 11. С. 7–9.

25. Босаков С.В., Мордич И.В., Симбиркин Н.В. К повышению несущей способности и жесткости перекрытий, образованных многопустотными плитами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 4. С. 30–36.

26. Назаров Ю.П., Жук Ю.Н., Симбиркин Н.В. Автоматизированное проектирование плоских монолитных и сборно-монолитных дисков перекрытий каркасных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 10. С. 48–50.

27. Алявдин П.В., Мордич А.И., Белевич В.Н. Прочность и деформации сборно-монолитных дисков перекрытий при сдвиге в их плоскости // Бетон и железобетон. 2014. № 2. С. 13–18.

28. Hatch M.R., Raton B. Vibration simulation using MATLAB and ANSYS // Chapman and Hall. CRC, 2001. 654 p.

29. Абовян Г.А., Абовян А.Г. Экспериментальное исследование колебаний круглых плит, опертых на точечные опоры // Известия НАН РА и ГИУА. 1999. С. 7–12.

30. Абовян А.Г., Абовян Г.А. Исследование колебаний точечно-опертых прямоугольных плит // Юбилейный сборник к 60-летию ЕрПИ. 1998. С. 6.

31. Амбарцумян В.А., Абовян А.Г. Колебания перекрытий, опирающихся на точечные опоры и имеющих квадратные отверстия // Известия академии наук Армянской ССР. Серия: технические науки. 1990. Т. XLIII. № 2. С. 54–60.

Поступила в редакцию 21 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 27 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 октября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Аветик Гургенович Абовян** — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57202799465, ORCID: 0000-0002-6005-2465; abovyan_1958@mail.ru;

Александр Суменович Марутян — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела проектно-грантовой деятельности; **Колледж Института сервиса, туризма и дизайна (филиал Северо-Кавказского федерального университета)**; 357538, г. Пятигорск, ул. 40 лет Октября, д. 56; Scopus: 57194604628, ORCID: 0000-0001-5464-5929; al_marut@mail.ru;

Гурген Аветикович Абовян — студент; **Институт пути, строительства и сооружений (ИПСС) ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ) (МИИТ)**; 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; Scopus: 57202804177; abovyan_GA@mail.ru.

Вклад авторов:

Абовян А.Г. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Марутян А.С. — доработка текста, итоговые выводы.

Абовян Г.А. — доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The study of the performance of thin slabs under dynamic loading has long been in the centre of attention of researchers. Thin slabs are one of the main structural elements of buildings and structures. Slabs with various structural solutions and supporting devices are used in coverings and slabs of residential, public and industrial buildings, as well as in engineering structures. Depending on the purpose and architectural and planning solution of the building, slabs can have different outlines and support system, as well as holes of various shapes. The slabs are usually supported by walls or columns — point supports. Slabs are supported on columns in beamless slabs used in buildings of various purposes and in separate structures.

Numerous theoretical and experimental studies are devoted to slab bending. Slab vibrations are relatively complex and poorly studied problems. The irregularity of the shape, the complex bearing system and the presence of holes complicate the calculation of slabs, especially under dynamic loads.

Consideration of dynamic effects in the design of structures is especially necessary in conditions of high seismicity. As analyses of the consequences of earthquakes have shown, the maximum acceleration of the vertical component is of approximately the same order as the acceleration of the horizontal component. This indicates that the load-bearing capacity of floor slabs and other structures should be checked taking into account the vertical component of the seismic effect. Consequently, for dynamic and seismic calculations of point-supported slabs used in the structures of buildings and structures, it is of practical interest to determine their dynamic characteristics, frequencies, forms of natural vibrations and damping decrement. Theoretical studies of this problem are usually carried out using approximate methods of calculation [1–19].

MATERIALS AND METHODS

In order to verify the values of the results of theoretical studies of point-supported slab vibrations and to clarify certain issues, experimental studies were carried out on models of solid and through steel slabs sup-

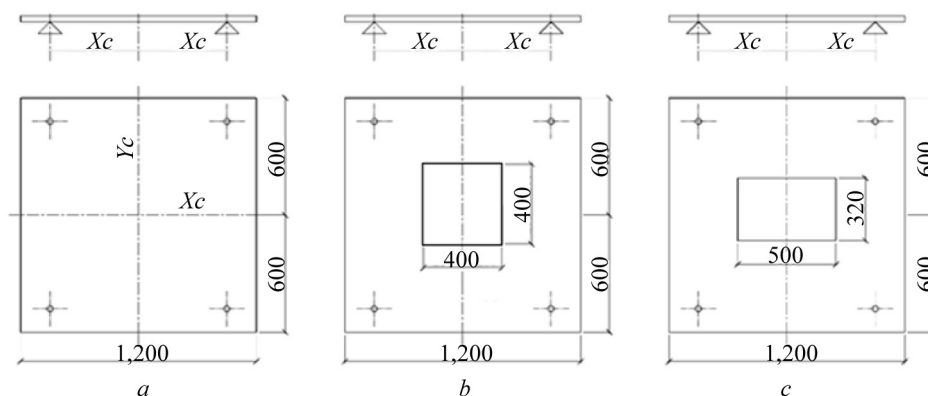


Fig. 1. Models of slabs



Fig. 2. Diagram of installation for static and dynamic tests

ported on four point supports with hinged and pinched support devices at different locations of the coordinates of the point supports [20–30]. The slabs were made of steel slabs with dimensions 1,200 × 1,200 mm and thickness of 8 mm (Fig. 1). The solid slabs (Fig. 1, *a*) with point support coordinates $X_c = Y_c = 580, 400$ and 300 mm were labelled P-1, P-2 and P-3, slabs with square holes (Fig. 1, *b*) respectively P-4, P-5 and P-6 and slabs with rectangular holes (Fig. 1, *c*) P-7, P-8 and P-9.

Thus, nine slabs with different design solutions were tested. Due to the fact that all sizes were tested under hinged and pinned bearing conditions, in the following description the letters “sh” (P-1sh; P-2sh, etc.) were added to the designations of slabs with hinged supports, and “z” was added to slabs with pinned supports (P-1z; P-2z, etc.).

The hinge joints were made by steel hemispheres $d = 30$ mm, installed in the head parts of the support legs, and the pinches were made by compression nuts, installed on the slabs in the head parts of the supports.

For static and dynamic tests of slabs, a special installation was designed and manufactured, whose simplified scheme is shown in (Fig. 2). The installation consists of a test table 1, support legs 3 for fixing the tested slabs 2, an electrodynamic linear vibrator 4, a generator 5 measuring the values of electric current frequencies, a current amplifier 6 and other devices necessary for test-



Fig. 3. Connection diagram for measuring instruments

ing. Testing the oscillations of the slabs and the formation of free oscillations were carried out with the help of a load $F = 250$ N hung in their centre. Forced oscillations of the slabs were excited by electrodynamic vibrators, for power supply of which a low-frequency generator of G6-15 brand was used. With the help of the latter, by smoothly increasing the frequency of current transmitted to the vibrator, different frequencies of oscillations (including resonance frequencies) were generated in the tested slabs, which were used to determine the dynamic characteristics of natural oscillations of the slabs.

Static tests of the slabs were carried out to determine their stiffnesses in order to verify the results of the dynamic tests. Dynamic tests were carried out in two stages. At the first stage the frequencies of natural vibrations of the slabs were determined according to the first form under conditions of free vibrations, and at the second stage they were subjected to forced vibrations, and displacements and frequencies were de-

Table 1. Experimental values of deflections and oscillations of tested slabs

Slabs	Deflections, mm	Frequency of free oscillations, Hz	Frequencies of vibration modes		
			I form	II form	III form
1	2	3	4	5	6
P-1sh	1.75	12	11.1	23.0	64.0
P-1z	1.10	15	15.5	29.3	68.0
P-2sh	0.38	26	26.0	50.0	90.5
P-2z	0.25	31	30.0	54.5	94.6
P-3sh	0.21	32	30.5	44.0	86.3
P-3z	0.15	37	35.0	48.3	90.0
P-4sh	2.65	10	10.5	23.0	72.0
P-4z	1.60	16	15.2	30.0	75.5
P-5sh	0.55	29	28.5	42.0	83.0
P-5z	0.35	35	33.0	46.5	88.0
P-6sh	0.30	32	29.0	40.0	80.0
P-6z	0.23	34	33.0	45.3	84.0
P-7sh	2.50	12	11.3	22.5	70.5
P-7z	1.54	15	14.5	27.0	74.0
P-8sh	0.50	32	29.5	45.0	90.0
P-8z	0.35	34	33.2	49.5	95.0
P-9sh	0.28	30	30.0	45.3	78.0
P-9z	0.21	35	34.0	50.0	83.0

Table 2. Theoretical values of frequencies

Slabs	Values of frequencies of natural oscillation, Hz			
	I form		III form	
	Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental
P-1sh	11.0	11.1	63.5	64.0
P-2sh	24.2	26.0	89.8	90.5
P-3sh	27.4	30.5	91.2	86.3
P-4sh	10.0	11.0	–	72.0
P-5sh	28.0	28.5	–	83.0
P-6sh	30.9	29.0	–	80.0

terminated according to the I, II and III forms of natural vibrations under conditions of resonant vibrations.

Displacements and frequencies of free and forced vibrations of the slabs were determined by vibrators of CB-10c brand. The instrumentation system (Fig. 3) consists of a vibrator 1, a resistance box 2 and a HO-441 oscilloscope 3.

RESEARCH RESULTS

Experimental values of deflections and frequencies of tested slabs are given in Table 1.

In order to verify the results of the values of theoretical investigations of the vibrations of point-supported slabs, the theoretical values of the frequencies of vibrations of the investigated slabs were determined from the graphs given in [31] and compared with the corre-

sponding values of the frequencies determined experimentally (Table 2).

To construct the forms of slab oscillations, rectilinear displacements were measured at 170 points of their surfaces. I, II, III forms of slab oscillations were constructed from the oscillograms of displacements (Fig. 4–7).

Due to the insignificant influence of the shapes and sizes of the holes on the dynamic behaviour of the slabs, only some results of the tests on solid slabs are given below.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The analysis of the data given in Table 1 shows that fixing the supports leads to an increase in the stiffness of the slabs and, accordingly, to a change in frequencies. The degree of stiffness increase depends on the coordinates of supports location: in case of supports location

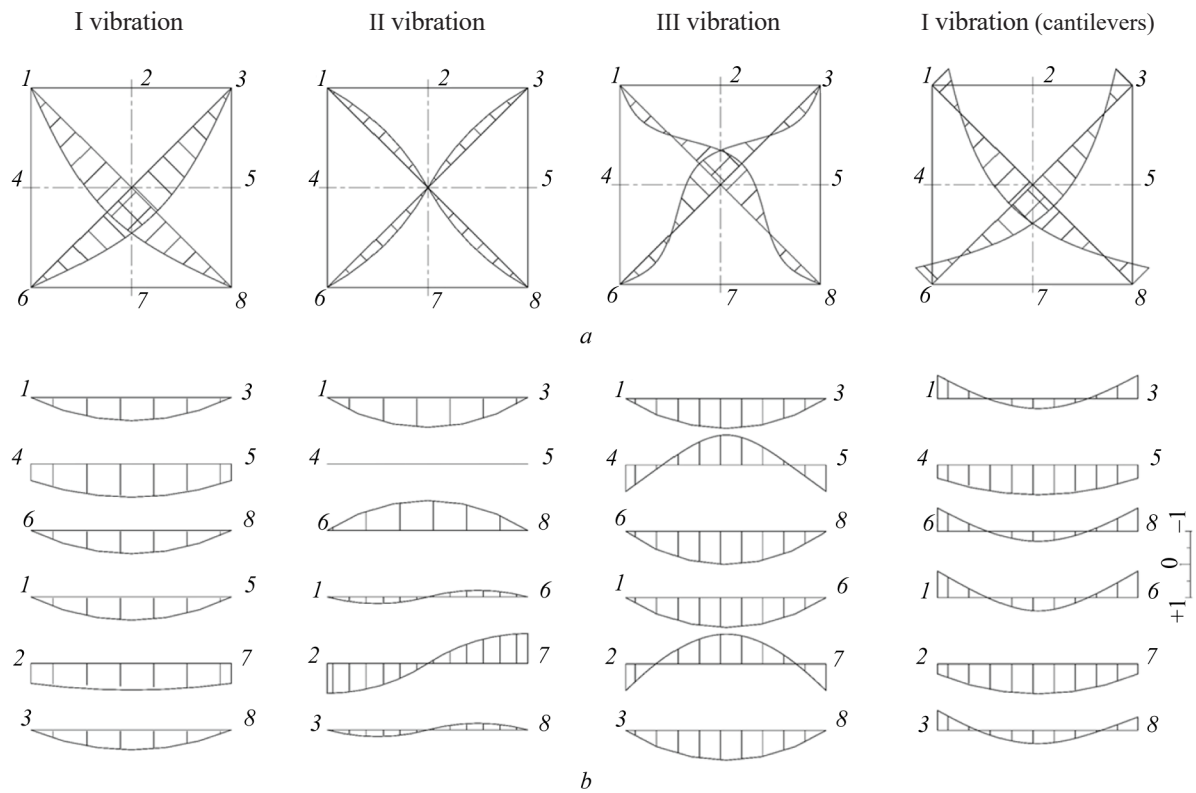


Fig. 4. Vibration patterns of the slab with articulated support at the corners and the slab with cantilevers: *a* — diagram with point numbering and vibration patterns along the diagonal; *b* — vibration patterns along the marked axes

in the corners of the slab (P-1, P-4, P-7) the stiffness increased in average in 1.62 times, in case of supports coordinates $X_c = Y_c = 400$ mm (P-2, P-5 and P-8) in 1.51 times and in case of $X_c = Y_c = 300$ mm (P-3, P-6, P-9) in 1.34 times. The frequencies of natural vibrations of the slabs also increased in proportion to the change in stiffness.

Comparison of results of theoretical and experimental values of frequencies of natural vibrations of slabs (Table 2) shows that they are very close in value and at vibrations according to I form on average differ by 6 %, and at vibrations according to III form — by 2.5 %.

Forms of vibrations of a solid slab (P-1sh) and a slab with cantilevered parts (P-2sh) along its individual axes in the form of centrelines are shown in Fig. 4. When the constructed centrelines are considered together, it can be seen that the I form of plate vibration is a bilateral shell supported on four points. II and III forms of plate oscillation in space are shells with positive and negative curvature supported on four points. I form of oscillations with cantilever parts (P-2sh) also represents a double-sided shell.

The values of decrement of slab vibrations were determined from oscillograms of damped vibrations and from resonance curves. According to the results of experimental studies, it turned out that the decrement of damping depends on the conditions of fixing the slab supports and the form of oscillations. So, for example, the value of decrement of slabs with hinged support for

vibrations on I, II and III forms turned out 0.072, 0.047 and 0.038, and for slabs with pinched support for vibrations of the first three forms respectively 0.065, 0.043 and 0.036.

From the data given in columns 3 and 4 of Table 1, we can see that the values of the obtained frequencies of free and forced (resonant) oscillations are almost identical and differ from each other by 4.5 % on average. This fact confirms the reliability of frequencies determined by resonant oscillations.

It is also evident from the data given in Table 1 that the presence of holes and their type do not have a significant effect on the frequencies of vibrations, despite the fact that the stiffness of the latter changes significantly (for slabs with square holes 1.43–1.51 times, and for slabs with rectangular holes 1.33–1.43 times). The insignificant change of frequencies can be explained by the fact that the presence of holes simultaneously with the reduction of stiffness of the slab reduces its mass.

The closeness of theoretical and experimental values of vibration frequencies (Table 2) indicates the reliability of the solution of the theoretical problem.

The vibration decrement of the hinged slab compared to the pinned slab is approximately 10 % greater.

As for the dependence of the oscillation decrement on the oscillation form, it decreases accordingly to the increase of the degree of oscillation.

REFERENCES

1. Abovyan A.G. Way of simulating of seismic impact on building and structures. *XXVII RSP seminar TFoCE*. Zilina, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012024
2. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Calculation of reinforced concrete slabs on pliable supports under short-term dynamic loading. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2012; 2(35):107-110. (rus.).
3. Berzhinskaya L.P., Berzhinskiy Yu.A., Kiselev D.V., Ordynskaya A.P. Identifying a dynamic model based on results of vibration tests of a concrete frame fragment using an unrigged frame using VC SCAD, CAD Master. *Architecture and construction*. 2007; 2:94-98. (rus.).
4. Abovyan A.G., Abovyan Ar.G. Study of graphs of fluctuations of buildings and structures under the influence of real earthquakes. *Collection of scientific works of YABU*. Yerevan, 2003; 1:1-3. (rus.).
5. Abovyan A.G., Abovyan Ar.G., Abovyan G.A. Dependence of the attenuation decrement on the slab oscillation forms. *Collection of scientific works of YABU*. Yerevan, 2001; 3:5-7. (rus.).
6. Ambartsumyan V.A., Abovyan A.G. Vibrations of a round slab during kinematic excitation of point supports. *Engineering problems of construction mechanics. Intercollegiate collection of scientific papers*. 1990; 80-84. (rus.).
7. Chiaia B., Kumpyak O., Maksimov V., Placidi L. Experimental analysis and Modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*. 2015; 96:88-99. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.054
8. Kezmane A., Placidi L., Chiaia B., Kumpyak O., Maksimov V. 3D modelling of reinforced concrete slab with yielding supports subject to impact load. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2017; 21(7-8):988-1025. DOI: 10.1080/19648189.2016.1194330
9. Kumpyak O.G., Mescheulov N.V. Compressed-flexed reinforced concrete structures along inclined sections on malleable supports under dynamic loading. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2014; 6(47):70-80. (rus.).
10. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. *AIP Conference Proceedings. Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction"*. 2016; 070006.

11. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Maksimov V.B. Investigation of reinforced concrete slabs supported along the contour on rigid and malleable supports under short-term dynamic loading. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013; 1(38):69-76. (rus.).
12. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Maksimov V.B. Reinforced concrete slabs on malleable supports under short-term dynamic loading. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2014; 5:16. (rus.).
13. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Experimental studies of reinforced concrete slabs supported along the contour with a spacer. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2015; 3(50):113-120. (rus.).
14. Kumpyak O.G., Mescheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports in the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loading. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(4):103-113.
15. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N., Maksimov V.B. Strength and deformability of reinforced concrete beams and slabs on malleable supports under intense dynamic loading. *Concrete and reinforced concrete — a look into the future. scientific papers of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete : in 7 volumes*. 2014; 315-325. (rus.).
16. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete SLABS on malleable supports under dynamic influences. *Earthquake-Resistant Construction. Safety of structures*. 2017; 1:28-34. (rus.).
17. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Strength and deformability of reinforced concrete slabs supported along the contour with a spacer. *Society. The science. Innovations (NPC-2021) : Collection of articles XXI All-Russian Scientific and Practical Conference*. Kirov, 2021; 472-478. (rus.).
18. Kumpyak O.G., Mescheulov N.V. Experimental studies of inclined sections of compressed reinforced concrete structures on malleable supports under transverse short-term dynamic impact. *Modern problems of calculation of reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts*. Moscow, 2016; 213-217.
19. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Investigation of dynamic deformation of reinforced concrete slabs on malleable supports. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2016; 1(54):107-115.
20. Alyavdin P.V., Muzychkin J.A. Analysis of the dynamic model of a fragment of the ceiling of the building. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2010; 1(26):137-141. (rus.).
21. Alyavdin P.V., Muzychkin Yu.A. Free vibrations of the slab-beam fragment of the overlap of buildings. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2009; 1:162-167. (rus.).
22. Pedikov A.V. *Study of compressed-flexed reinforced concrete structures on pliable supports under short-term dynamic loading : dissertation of the Candidate of Technical Sciences*. Tomsk, 2006; 171. (rus.).
23. Bosakov S.V., Mordich A.I., Karyakin A.A., Sonin S.A., Derbentsev I.S., Popp P.V. Load test results of precast-monolithic floor supported on bearing walls of multi-storey building. *Industrial and Civil Construction*. 2018; 2:35-42 (rus.).
24. Aivazov R.L., Lapitsky I.V. Precast floor supported on contour and working with cross trust. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1991; 11:7-9. (rus.).
25. Bosakov S.V., Mordich A.L., Simbirkin V.N. On increase of bearing capacity and rigidity of floors made of hollow-core slabs. *Industrial and Civil Construction*. 2017; 4:30-36. (rus.).
26. Nazarov Yu.P., Zhuk Yu.N., Simbirkin B.N. Computer-aided design of flat monolithic and precast-monolithic slabs in fame buildings. *Industrial and Civil Construction*. 2006; 10:48-50 (rus.).
27. Alyavdin P.V., Mordich A.I., Belevich V.N. Strength and deformation of precast-monolithic floor slabs in case of their in-plane shear. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2014; 2:13-18. (rus.).
28. Hatch M.R. Vibration simulation using MATLAB and ANSYS. *Chapman and Hall*. CRC. 2001; 654.
29. Abovyan Av.G., Abovyan Ar.G. Experimental study of oscillation of circular slabs rested on point supports. *Publication NAN RA and SEUA*. 1999; 7-12. (rus.).
30. Abovyan A.G., Abovyan G.A. Investigation of oscillations of point-supported square slabs. *Jubilee collection dedicated to the 60th anniversary of the Yerevan Polytechnic Institute*. 1998. (rus.).
31. Ambartsumian V.A., Abovyan A.G. Vibrations of beams resting on point supports and having square holes. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Armenian SSR. Series: technical sciences*. 1990; XLIII(2):54-60. (rus.).

Received September 21, 2023.

Adopted in revised form on September 27, 2023.

Approved for publication on October 13, 2023.

B I O N O T E S : **Avetik G. Abovyan** — Candidate of Technical, Associate Professor, Department of wood and metal structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57202799465, ORCID: 0000-0002-6005-2465; abovyan_1958@mail.ru;

Alexander S. Marutyan — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Department of project and grant activities; **Branch of the North Caucasus Federal University**; 56 40 years of October Avenue, Pyatigorsk, 357538, Russian Federation; Scopus: 57194604628, ORCID: 0000-0001-5464-5929; al_marut@mail.ru;

Gurgen A. Abovyan — student of the Institute of Roads, Construction and Structures (IPSS); **Institute of Roads, Construction and Structures (IPSS) Russian University of Transport (RUT) (MIIT)**; , 9 st. Obraztsova, build. 9, Moscow, 127994, Russian Federation; Scopus: 57202804177; abovyan_GA@mail.ru.

Contribution of the authors:

Avetik G. Abovyan — scientific leadership, research concept, development of methodology, writing the original text, final conclusions.

Alexander S. Marutyan — revision of the text, final conclusions.

Gurgen A. Abovyan — revision of the text. The authors declare no conflict of interest.

The authors declare that there is no conflict of interest.