

УДК 624.011.1

DOI 10.18698/0536-1044-2016-2-59-64

## Экспериментальные исследования трехслойных балок с пирамидальным дискретным заполнителем

О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов

Дагестанский государственный технический университет, 367015, Махачкала, Российская Федерация,  
просп. Имама Шамиля, д. 70

## An Experimental Study of Three-Layer Beams with Discrete Pyramidal Filler

O.M. Ustarkhanov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarkhanov

Dagestan State Technical University, 367015, Makhachkala, Russian Federation, Imam Shamyil Ave., Bldg. 70

@ e-mail: hairulla213@mail.ru

**i** Для повышения прочности трехслойной конструкции (ТК) к воздействию динамических сил в качестве среднего слоя предложено использовать волокнистый материал. Однако он не обеспечивает необходимую жесткость ТК при статическом нагружении. Для увеличения жесткости предложено применить дискретный заполнитель пирамидальной формы. При этом необходимо выявить влияние статических нагрузок на несущую способность ТК с таким заполнителем. Проведены исследования трехслойных балок (ТБ) с дискретным пирамидальным заполнителем на поперечный изгиб при шарнирном и жестком закреплении их кромок. Нагружение осуществлялось равномерно распределенной нагрузкой с помощью специальных устройств и приспособлений. Нагрузка изменялась в пределах упругой зоны работы ТБ, т. е. после ее снятия остаточная деформация ТБ не наблюдалась. Одновременно измерялись смещение концов ТБ и расстояние между несущими слоями. Приведены экспериментальные значения напряжений, возникающих в верхнем несущем слое, и перемещений ТБ с пирамидальным заполнителем из алюминиевой фольги и сплава Д-19 при поперечном изгибе ТБ, а также сравнительные данные теоретических и экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** поперечный изгиб, пирамидальный заполнитель, трехслойная балка, несущий слой, деформация, напряжения.

**i** To increase the resistance to the action of concentrated dynamic forces, the authors propose to use fibrous material as the middle layer of a three-layer structure. However, such material does not provide the necessary rigidity of the structure under static loads. To increase the rigidity, it is proposed to use discrete filler in the shape of a pyramid; in doing so, it is necessary to determine the impact of static loads on the bearing capacity of the sandwich structure when the pyramidal filler is used. The three-layer beams with pyramidal filler were studied for transverse bending with hinge- and rigid-edge fixing. The beams were subjected to an evenly distributed load using special devices and attachments. The load varied within the elastic zone of the three-layer beam, i.e. the residual deformation was not observed after removing the load. Simultaneously, the beam edge displacement and the distance between the bearing layers were measured. The paper presents experimental values of the stresses appearing in the top bearing layer and of the displacements of the three-layer beam with

pyramidal aluminum foil and D-19 alloy filler at transverse bending of the beam. The theoretical and the experimental data is compared.

**Keywords:** transverse bending, pyramidal filler, three-layer beam, bearing layer, deformation, stress.

Трехслойные конструкции (ТК) с сотовым заполнителем применяются в различных отраслях машиностроения (судо-, авиастроение и др.), но их широкому распространению препятствуют недостатки, одним из которых является низкая прочность при воздействии статических и дина-

мических нагрузок. Для устранения этого недостатка в качестве среднего слоя предложено применить волокнистый материал. Однако он не обеспечивает необходимую жесткость ТК при воздействии статических нагрузок. Для повышения этого параметра ТК предложено использовать дискретный заполнитель пирамидальной формы. При этом необходимо выявить влияние статических нагрузок на несущую способность ТК с пирамидальным заполнителем.

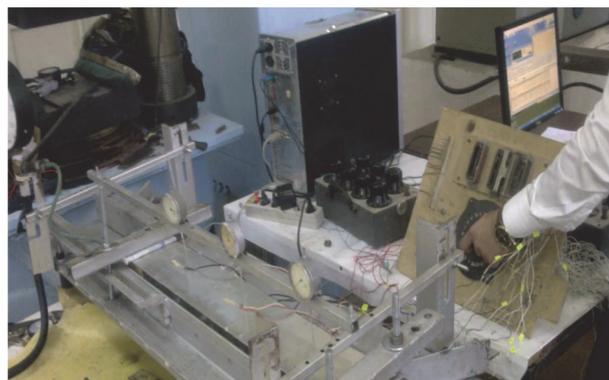
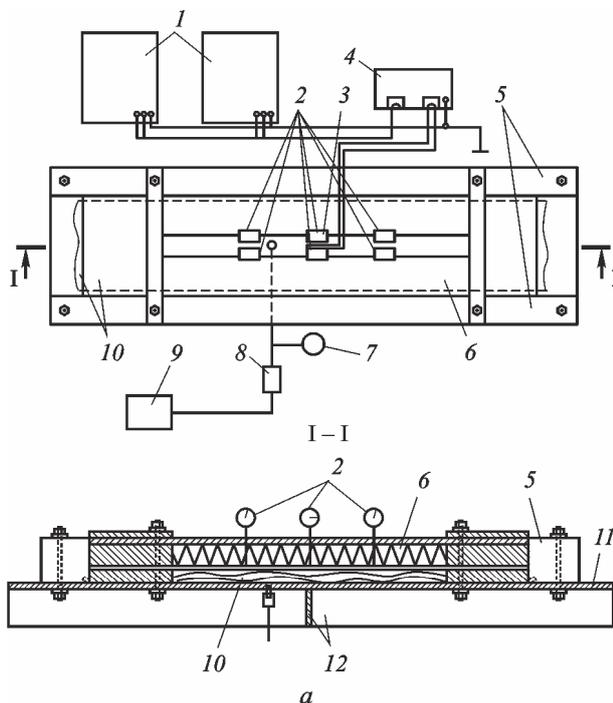
Теоретический расчет ТК проводился по методике, изложенной в работе [1], на примере трехслойной балки (ТБ). Результаты расчета параметров пирамидального дискретного заполнителя приведены в работах [2, 3]. Для проверки теоретического расчета были проведены экспериментальные исследования ТБ.

Технология изготовления испытуемых образцов, их размеры и количество, подготовка измерительного комплекса были выполнены в соответствии с заданными требованиями [4–6].

Обработка многочисленных результатов экспериментальных исследований ТК показала, что доверительный интервал  $q = 0,5\sigma_x^*/\sigma_x^* = 0,5$ . Используя значения функции  $L(q, k)$  распределения Стьюдента, получим число степеней свободы  $k = 8$ . Следовательно, выборка должна состоять не менее чем из девяти образцов для каждой серии испытаний.

По ширине балок располагалось не менее четырех пирамид, т. е. ширина ТБ определялась как размер основания пирамиды, умноженный на четыре. В качестве материала заполнителя использовались алюминиевая фольга и сплав Д-19 толщиной  $t_{ст} = 0,1$  мм, а в качестве материала несущих слоев — алюминиевый сплав АМг6М толщиной  $t = 1,5$  мм.

Контроль осевого смещения ТБ проводился с помощью датчиков часового типа. Нагружение ТБ осуществлялось равномерно распределенной нагрузкой с помощью специальных устройств и приспособлений. Как известно, существуют различные способы приложения равномерно распределенной нагрузки к испытуемым образцам [7, 8]. По мнению авторов, наиболее приемлемым из них является метод создания давления воздухом или жидкостью (например, водой).



б

Рисунок. Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) установки для поперечного изгиба ТБ:

- 1 — самописец «Эндим 621.02»; 2 — стрелочные индикаторы типа ИЧ; 3 — тензодатчики; 4 — тензостанция ZETLAB; 5 — металлические бруссы; 6 — ТБ; 7 — образцовый манометр типа ОБМ-06; 8 — редуктор; 9 — компрессор; 10 — эластичная камера; 11 — стальная плита; 12 — ребра жесткости

**Результаты исследований ТБ с пирамидальным наполнителем на поперечный изгиб при шарнирном/жестком закреплении кромок**

P, кПа	L = 0,45 м				L = 0,64 м				L = 0,72 м			
	ω, МКМ	Δ <sub>оп</sub> , %	σ <sub>12max</sub> , МПа	Δ <sub>σ12max</sub> , %	ω, МКМ	Δ <sub>оп</sub> , %	σ <sub>12max</sub> , МПа	Δ <sub>σ12max</sub> , %	ω, МКМ	Δ <sub>оп</sub> , %	σ <sub>12max</sub> , МПа	Δ <sub>σ12max</sub> , %
<i>Алюминиевая фольга</i>												
1	5/ 1,81	16,56/ 16,58	0,3769/ 0,12	15,97/ 9,51	10,1/ 3,85	13,66/ 20	0,5355/ 0,18	13,04/ 15,25	12,8/ 3,99	17,42/ 9,52	0,6121/ 0,19	15,25/ 9,1
2	10/ 3,69	16,56/ 18,16	0,7350/ 0,22	13,81/ 3,21	19,8/ 7,38	11,93/ 16,53	1,0657/ 0,35	12,61/ 10,8	23/8	8,09/ 9,75	1,1569/ 0,4	10,32/ 13,42
3	14/ 5,03	10,6/ 9,94	1,0404/ 0,36	8,66/ 12,06	30/ 11,59	12,8/ 20,28	1,6386/ 0,56	14,75/ 17,99	38,4/ 12,11	17,42/ 10,57	1,867/ 0,57	16,64/ 9,09
4	19/ 7,14	12,17/ 15,41	1,447/ 0,46	12,47/ 9,03	41/ 15,94	14,93/ 22,31	2,142/ 0,76	13,04/ 19,12	50/ 16,96	15,44/1 4,86	2,4486/ 0,78	15,25/ 11,74
5	27/ 9,68	22,74/ 22	1,9224/ 0,51	17,62/ 14,64	53/ 18,23	17,74/ 15,52	2,7311/ 0,94	14,75/ 17,4	65/ 19,96	18,69/ 9,70	3,1219/ 0,98	16,92/ 12,59
6	29/ 10,97	13,68/ 17,41	2,1976/ 0,7	13,52/ 11,14	58/ 22,01	9,79/ 16,04	3,1541/ 1,1	11,42/ 16,65	71/ 23,93	10,68/ 9,49	3,6606/ 1,12	14,92/6 ,92
7	37/ 12,67	21,07/ 16,58	2,6763/ 0,83	17,15/ 12,03	70/ 26,88	12,92/ 19,79	3,7967/ 1,27	14,15/ 15,26	90,6/ 28,08	18,33/ 10,01	4,3768/ 1,33	17,03/ 9,74
8	41/ 15,68	18,6/ 22,96	3,0532/ 0,98	17/ 14,84	83/ 31,03	15,95/ 20,59	4,2787/ 1,43	12,94/ 14,07	99,1/ 32,91	14,67/ 12,25	4,891/ 1,51	15,15/ 9,09
9	43/ 16,39	16,56/ 17,08	3,3548/ 1,07	15,02/ 12,62	89/ 33,7	11,82/ 17,75	4,8189/ 1,63	13,03/ 15,16	111/ 34,99	14,3/ 7,15	5,5031/ 1,74	15,16/ 11,07
10	51/ 18,19	18,2/ 16,99	3,8259/ 1,17	17,21/ 11,29	104/ 37,14	16,15/ 17,14	5,4621/ 1,79	14,75/ 13,97	119/ 40	11,18/ 9,75	5,9989/ 1,91	13,52/ 9,99
<i>Сплав Д-16</i>												
1	4,46/ 1,52	9,64/ 9,86	0,3512/ 0,11	9,91/ 7,24	9,28/ 2,99	9,05/ 6,39	0,4986/ 0,17	6,64/ 6,54	4,28/ 3,93	6,38/ 16,01	0,5606/ 0,20	7,4/ 13,04
2	8,72/ 3,12	7,57/ 12,18	0,7727/ 0,25	18,1/ 15,67	18,96/ 6,01	10,92/ 6,86	0,9723/ 0,35	4,15/ 10,99	23,5/ 7,46	10,13/ 11,69	1,1216/ 0,37	7,41/ 5,99
3	13/ 4,46	7/ 7,85	1,001/ 0,34	5,7/ 12,14	27,3/8, 99	7,25/ 6,6	1,3412/ 0,51	4,23/ 9,24	32,84/ 10,81	6,27/ 8,75	1,3738/ 0,57	10,4/ 10,04
4	17,28/ 6,07	6,72/ 9,72	1,44/ 0,45	12,11/ 7,23	38,37/ 11,96	9,66/ 6,38	1,8747/ 0,66	5,77/ 6,31	45,42/ 14,72	7/ 10,65	2,2404/ 0,77	8,55/ 10,12
5	24/ 7,66	16,04/ 10,57	1,8615/ 0,58	15,01/ 9,05	46,4/ 15,96	9,17/ 12,26	2,473/ 0,86	5,79/ 10,14	56,4/ 17,89	6,38/ 8,11	2,7973/ 0,97	7,22/ 11,09
6	26,2/ 9	7,7/ 8,67	3,1776/ 0,69	12,82/ 9,46	57,8/ 17,17	12,38/ 12,18	2,9866/ 0,07	6,39/ 4,15	69,1/ 21,58	8,31/ 8,58	3,5699/ 1,15	10,25/ 9,89
7	32,1/ 11,14	12,12/ 13,91	2,4761/ 0,81	10,55/ 9,81	65,51/ 20,99	9,82/ 6,66	3,5399/ 1,15	10,59/ 6,28	79,96/ 25,48	7,55/ 9,67	3,896/ 1,36	6,76/ 10,49
8	34,68/1 2,33	7,04/ 11,11	2,7958/ 0,94	9,46/ 10,59	75,24/ 24,08	10,26/ 7,01	4,0635/ 1,34	8,26/ 7,81	93,46/ 28,01	9,59/ 9,33	4,5407/ 1,54	8,55/ 10,93
9	39,25/ 14,33	7,59/ 12,62	3,1576/ 1,04	9,81/ 9,74	80,43/ 26,68	5,56/ 5,58	4,587/ 1,48	8,57/ 6,33	100,43/ 32,17	5,37/ 8,01	4,9892/ 1,74	6,37/ 10,97
10	44,6/ 9,64	9,64/ 9,64	3,5298/ 1,17	10,36/ 11,29	93,33/ 37,14	10,52/ 17,14	5,0856/ 1,79	8,37/ 13,97	113,37/ 40	6,82/ 9,75	5,3704/ 1,91	3,35/ 9,99

При проведении экспериментальных исследований равномерно распределенное нагружение осуществлялось давлением воздуха. Схема установки для поперечного изгиба ТБ и ее внешний вид приведены на рисунке. Установка собрана на стальной плите 11 с ребрами жесткости 12, расположенными снизу плиты. Испытуемая ТБ 6 устанавливалась на плите между ограничивающими металлическими брусками 5, закрепленными на плите. Между плитой и балкой располагалась камера 10 из эластичного материала. Давление в камере создавалось компрессором 9 типа С027Б через редуктор 8 и измерялось образцовым манометром 7 типа ОБМ-0,6. Очевидно, что давление в камере равномерно передавалось балке.

Измерение перемещений балки осуществлялось в трех точках вдоль нее с помощью стрелочных индикаторов 2 часового типа (ИЧ), которые располагались на верхнем и нижнем несущих слоях ТБ. Контакт индикаторов с нижней гранью осуществлялся с помощью иглы, опущенной через отверстие диаметром 0,5 мм. Такое отверстие практически не сказывается на прочностных параметрах образцов.

Измерение деформации несущих слоев ТБ осуществлялось с помощью наклеенных на них тензодатчиков 3, которые подключались к тензостанции ZETLAB 4. Выходные сигналы с нее поступали на самописец «Эндим 621.02» 1 и персональный компьютер. Таким образом, осуществлялась непрерывная регистрация деформаций.

Испытывалось три серии ТБ с высотой дискретного заполнителя 5, 7, 8 см и площадью основания отдельной ячейки 3×3, 4×4, 4×4 см<sup>2</sup> соответственно. Длина балок  $L$  для дискретного заполнителя высотой 5, 7 и 8 см составляла соответственно 45, 64 и 72 см. Несущие слои изготавливались из сплава АМгбМ. Сборка ТБ выполнялась с помощью эпоксидного клея ЭД-20.

Экспериментальные исследования проводились при двух видах крепления кромок ТБ — шарнирном и жестком (крепление осуществлялось по обоим несущим слоям ТБ). Давление воздуха при испытаниях изменялось от 0 до  $1 \cdot 10^4$  Па. В ходе эксперимента одновременно измерялись смещение концов ТБ и расстояние между несущими слоями. Нагрузка  $P$  изменялась в пределах упругой зоны работы ТБ, т. е. после ее снятия остаточная деформация балки не наблюдалась. Результаты исследований ТБ с пирамидальным заполнителем из алюминиевой фольги и сплава Д-19, шарнирно опертой и жестко защемленной по кромкам, при поперечном изгибе приведены в таблице, где  $\omega$  — прогиб ТБ;  $\sigma_{12\max}$  — напряжение, возникающее в верхнем несущем слое ТБ;  $\Delta_0$  и  $\Delta_{\sigma_{12\max}}$  — расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями параметров  $\omega$  и  $\sigma_{12\max}$  соответственно.

## Выводы

1. Исследования ТБ с пирамидальным заполнителем из алюминиевой фольги и сплава Д-19 при продольном изгибе позволили установить, что у балки, шарнирно опертой по кромкам, расхождение теоретических и экспериментальных значений прогибов не превышало соответственно 23 и 17 %, а у жестко защемленной — 23 и 14%.

2. Аналогичное различие наблюдалось между теоретическими и экспериментальными значениями напряжений в несущем слое [9–10], что объясняется неодинаковыми прочностными свойствами алюминиевой фольги и сплава Д-19.

3. Результаты исследований показали, что предложенный вариант сот можно применить в качестве дискретного заполнителя для ТК.

## Литература

- [1] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва, Наука, 1976. 297 с.
- [2] Ильдияров Е.В. Экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния трехслойной кровельной панели с ортотропным средним слоем. *Строительная механика и расчет сооружений*, 2011, № 6, с. 11.
- [3] Панин В.Ф. *Сотовые конструкции*. Москва, Машиностроение, 1982. 153 с.
- [4] Прохоров Ю.Ф., Дерюшев В.В. Влияние технологических дефектов на несущую способность трехслойных конструкций. *Технология судостроения*, 1981, № 10, с. 25–29.

- [5] Устарханов О.М., Алибеков М.С., Устарханов Т.О. Экспериментальное исследование прочности конического заполнителя для трехслойных конструкций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 9, с. 54–59.
- [6] Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Экспериментальные исследования влияния клея и размеров ячейки на несущую способность трехслойных балок. *Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2012, № 2, с. 91–95.
- [7] Устарханов О.М., Устарханов Т.О., Муселемов Х.М. Экспериментальные исследования влияния клея на несущую способность трехслойных балок. *Вестник ДГТУ*, 2011, № 20, с. 86–93.
- [8] Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Акаев Н.К. Исследования влияния температуры на несущую способность клееных трехслойных балок. *Вестник ДГТУ*, 2011, № 22, с. 127–132.
- [9] Устарханов О.М., Кобелев В.Н., Кобелев В.В., Абросимов Н.А. Анализ экспериментального исследования трехслойных балок с металлическим сотовым заполнителем и композиционными несущими слоями. *Сб. Междунар. науч.-техн. конф. Современные научно-технические проблемы гражданской авиации*, Москва, МГТУГА, 1999, с. 32–33.
- [10] Устарханов О.М., Булгаков А.И., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Расчет трехслойных балок с учетом клевого шва по методу конечных элементов с помощью ПК ЛИРА. *Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2012, № 5, с. 69–72.

## References

- [1] Adler Iu.P., Markova E.V., Granovskii Iu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Planning experiment in the search for optimal conditions]. Moscow, Nauka publ., 1976. 297 p.
- [2] Il'diariov E.V. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniia napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia trekhslonoi krovel'noi paneli s ortotropnym srednim sloem [Experimental and theoretical studies of the stress-strained state of sandwich roofing panels with the middle layer orthotropic]. *Stroitel'naiia mekhanika i raschet sooruzhenii* [Building mechanics and calculation of structures]. 2011, no. 6, 11 p.
- [3] Panin V.F. *Sotovye konstruksii* [Honeycomb structures]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982. 153 p.
- [4] Prokhorov Iu.F., Deriushchev V.V. Vliianie tekhnologicheskikh defektov na nesushchiuiu sposobnost' trekhslonnykh konstruksii [Influence of processing defects on the bearing capacity of sandwich constructions]. *Tekhnologiya sudostroeniia* [Shipbuilding Technology]. 1981, no. 10, pp. 25–29.
- [5] Ustarkhanov O.M., Alibekov M.S., Ustarkhanov T.O. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti konicheskogo zapolnitelia dlia trekhslonnykh konstruksii [Experimental study of the strength of a conical core in sandwich structures]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2014, no. 9, pp. 54–59.
- [6] Ustarkhanov O.M., Muselemov Kh.M., Ustarkhanov T.O. Eksperimental'nye issledovaniia vliianiia kleia i razmerov iacheiki na nesushchiuiu sposobnost' trekhslonnykh balok [Experimental Investigations of Glue and Sells Sizes Influence on the Load-Carrying Capacity of Three-Layer Beams]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University News North-Caucasian Region. Technical Sciences Series]. 2012, no. 2, pp. 91–95.
- [7] Ustarkhanov O.M., Ustarkhanov T.O., Muselemov Kh.M. Eksperimental'nye issledovaniia vliianiia kleia na nesushchiuiu sposobnost' trekhslonnykh balok [Experimental Investigations of Glue Influence on the Load-Carrying Capacity of Three-Layer Beams]. *Vestnik DGTU* [Vestnik of Daghestan State Technical University. Technical Science]. 2011, № 20, pp. 86–93.
- [8] Ustarkhanov O.M., Muselemov Kh.M., Akaev N.K. Issledovaniia vliianiia temperatury na nesushchiuiu sposobnost' kleennykh trekhslonnykh balok. *Vestnik DGTU* [Vestnik of Daghestan State Technical University. Technical Science]. 2011, no. 22, pp. 127–132.

- [9] Ustarkhanov O.M., Kobelev V.N., Kobelev V.V., Abrosimov N.A. Analiz eksperimental'nogo issledovaniia trekhsloinykh balok s metallicheskim sotovym zapolnitelem i kompozitsionnymi nesushchimi sloiami [Analysis of the experimental study of sandwich beams with metal honeycomb core and composite bearing layers]. *Sbornik Mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferentsii «Sovremennye nauchno-tekhniccheskie problemy grazhdanskoi aviatsii»* [Collection of the International Scientific Conference Modern scientific and technical problems of civil aviation]. Moscow, MGTUGA publ., 1999, pp. 32–33.
- [10] Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Muselemov Kh.M., Ustarkhanov T.O. Raschet trekhsloinykh balok s uchedom kleevogo shva po metodu konechnykh elementov s pomoshch'iu PK LIRA [Calculation of Three-Layer Beams Based on Adhesive Joint Finite Element Method with Through the LIRA]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [University News North-Caucasian Region. Technical Sciences Series]. 2012, no. 5, pp. 69–72.

Статья поступила в редакцию 14.12.2015

## Информация об авторах

**УСТАРХАНОВ Осман Магомедович** (Махачкала) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения». Дагестанский государственный технический университет (367015, Махачкала, Российская Федерация, просп. Имама Шамиля, д. 70, e-mail: hairulla213@mail.ru).

**МУСЕЛЕМОВ Хайрулла Магомедмуратович** (Махачкала) — старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения». Дагестанский государственный технический университет (367015, Махачкала, Российская Федерация, просп. Имама Шамиля, д. 70, e-mail: hairulla213@mail.ru).

**УСТАРХАНОВ Тагир Османович** (Махачкала) — инженер кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения». Дагестанский государственный технический университет (367015, Махачкала, Российская Федерация, просп. Имама Шамиля, д. 70, e-mail: hairulla213@mail.ru).

## Information about the authors

**USTARKHANOV Osman Magomedovich** (Makhachkala) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Building Structures and Hydraulic Engineering Installations. Dagestan State Technical University (367015, Makhachkala, Russian Federation, Imam Shamil Ave., Bldg. 70, e-mail: hairulla213@mail.ru).

**MUSELEMOV Hairulla Magomedmuradovich** (Makhachkala) — Senior Lecturer, Department of Building Structures and Hydraulic Engineering Installations. Dagestan State Technical University (367015, Makhachkala, Russian Federation, Imam Shamil Ave., Bldg. 70, e-mail: hairulla213@mail.ru).

**USTARKHANOV Tagir Osmanovich** (Makhachkala) — Engineer, Department of Building Structures and Hydraulic Engineering Installations. Dagestan State Technical University (367015, Makhachkala, Russian Federation, Imam Shamil Ave., Bldg. 70, e-mail: hairulla213@mail.ru).