

**Вариатропная эффективность центробежно уплотненных облегченных бетонов на комбинированных заполнителях****А. С. Смоляниченко<sup>1</sup>, А. А. Чернильник<sup>2</sup>, Д. М. Ельшаева<sup>3</sup>, Ю. В. Жеребцов<sup>4</sup>✉,  
Н. А. Доценко<sup>5</sup>, М. С. Самофалова<sup>6</sup>, В. Ю. Смачный<sup>7</sup>**<sup>1,2,3,4,5,6,7</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия<sup>2</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия<sup>4</sup>yuri.zherebtsov@gmail.com✉

**Аннотация.** В настоящее время разработка и усовершенствование энерго-, ресурс- и маломатериалоемких технологий изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций – одно из актуальных направлений в строительной отрасли. В частности, технология центрифугирования представляется довольно перспективной. Цель данной работы – провести оценку зависимости коэффициентов вариатропной эффективности центрифугированного бетона от зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей. Всего было изготовлено и испытано десять образцов кольцевого сечения. По результатам испытаний опытных образцов центрифугированного бетона с различными сочетаниями зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей были определены фактические значения интегральных и дифференциальных прочностных и деформативных характеристик бетона. Произведен расчет и анализ коэффициентов прочностной и деформативной вариатропной эффективности. Определены рациональный зерновой состав крупного плотного и оптимальное объемное содержание крупного пористого заполнителей, позволяющие получить центрифугированный бетон с усиленной вариатропией и наиболее эффективным коэффициентом вариатропной эффективности.

**Ключевые слова:** коэффициент вариатропной эффективности, вариатропия, зерновой состав, прочность, деформативность, объемное содержание

**Для цитирования:** Смоляниченко А. С., Чернильник А. А., Ельшаева Д. М., Жеребцов Ю. В., Доценко Н. А., Самофалова М. С., Смачный В. Ю. Вариатропная эффективность центробежно уплотненных облегченных бетонов на комбинированных заполнителях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4. С. 662–673. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-662-673>.

**Original article****Variatropic efficiency of centrifugal lightened concrete based on combined fillers****Alla S. Smolyanichenko<sup>1</sup>, Andrei A. Chernil'nik<sup>2</sup>, Diana M. El'shaeva<sup>3</sup>,  
Yuriy V. Zherebtsov<sup>4</sup>✉, Natal'ya A. Dotsenko<sup>5</sup>, Mariya S. Samofalova<sup>6</sup>,  
Vladislav Yu. Smachney<sup>7</sup>**<sup>1,2,3,4,5,6,7</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia<sup>2</sup>Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia<sup>4</sup>yuri.zherebtsov@gmail.com✉

**Abstract.** Presently, developing and improving low-material, energy- and resource-intense technologies for manufacturing concrete and reinforced concrete products and structures have become a topical issue in the construction industry. Therefore, centrifugation technology is promising. In the present work, we assess the dependence of the variatropic efficiency factors of centrifuged concrete on the grain size composition and volumetric content of coarse dense and coarse porous fillers, respectively. Ten samples having an annular cross-section were manufactured and tested. Based on the test results

of centrifuged concrete samples with various combinations of the grain size composition and volumetric content of coarse dense and coarse porous fillers, respectively, the actual values of its integral and differential strength and deformation characteristics were determined. The structural and stress-strain variatropic efficiency were calculated and analysed. The optimal grain size composition and volumetric content of the coarse dense and coarse porous fillers, respectively, were determined and allowed centrifuged concrete with an enhanced variatropy and optimum variatropic efficiency coefficient to be obtained.

**Keywords:** coefficient of variatropic efficiency, variatropy, grain size composition, strength, deformability, volumetric content

**For citation:** Smolyanichenko A. S., Chernil'nik A. A., El'shaeva D. M., Zherebtsov Yu. V., Dotsenko N. A., Samofalova M. S., Smachney V. Yu. Variatropic efficiency of centrifugal lightened concrete based on combined fillers. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2021;11(4):662-673. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-662-673>.

## Введение

Актуальной проблемой современного строительства является высокая энерго-, материало- и ресурсоемкость возводимых зданий и сооружений [1]. В этой связи многое зависит от конструктивных элементов, из которых возводятся объекты капитального строительства. По этой причине перспективным направлением видится разработка технологий, составов и конструктивных решений эффективных железобетонных конструкций. Приоритет здесь отдается тонкостенным и полым изделиям и конструкциям, которые позволяют существенно снизить вес возводимого объекта, однако при этом важной задачей остается сохранение, а зачастую и увеличение несущей способности таких изделий и конструкций. Поэтому развитие уже выбранного направления – получение центробежно уплотненных полых изделий и конструкций – может быть нацелено на облегчение таких полых изделий кольцевого сечения. Исследования [2–15], в которых рассматривается проектирование и получение облегченных железобетонных конструкций, в том числе вариатропной структуры, подтверждают актуальность данной работы и выявляют основные проблемы, оставшиеся нерешенными в настоящее время.

В статье [16] приведены результаты испытания керамзитобетона различных классов по прочности на сжатие и по плотности, предложены формулы для определения пределов образования микро- и макротрещин. В ходе исследования введен эмпирический коэффициент, учитывающий класс плотности легкого бетона в расчете микротрещинообразования. Предложена методика определения верхнего и нижнего пределов микротрещинообразова-

ния для легких бетонов различных классов по прочности на сжатие и по плотности.

Снижения веса при сохранении эффективности конструкций можно добиться за счет уменьшения плотности бетона, применяемого для центрифугированных изделий и конструкций. Снижение плотности бетона, в свою очередь, достигается применением комбинированного заполнителя, а именно разбавлением плотных зерен из тяжелых горных пород зернами заполнителя из пористых пород либо искусственных пористых заполнителей. Тем самым меняется не только весовая характеристика конструкции и его плотностная и прочностная структура, но и сама сущность его структуры, а именно вариатропия.

Таким образом, рабочей гипотезой исследования является возможность управления вариатропией облегченных центрифугированных бетонов за счет применения комбинированных заполнителей. При этом ранее нами уже был предложен ряд аналитических показателей, таких как коэффициенты вариатропной эффективности по основным прочностным и деформативным характеристикам [17].

Целью исследования являются разработка состава и анализ свойств по вариатропной эффективности облегченных центрифугированных бетонов.

Задачами исследования выступают анализ литературных данных, подготовка программы эксперимента, проведение исследований и аналитическая обработка полученных результатов.

## Методы

При проведении исследований применялся бездобавочный портландцемент марки ПЦ 500 Д0, физико-механические характеристики которого представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Физико-механические характеристики портландцемента ПЦ 500 Д0

**Table 1.** Physical and mechanical characteristics of Portland cement PC 500 D0

Наименование показателя	Фактическое значение
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	55,7
Сроки схватывания, мин:	
– начало;	1:48
– конец	4:00
Тонкость помола, проход через сито № 008, %	97,8
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	380
Нормальная густота цементного теста, %	25,5

В качестве крупного плотного заполнителя применялся гранитный щебень, а в качестве крупного пористого заполнителя – керамзитовый гравий. Физико-механические характеристики крупного плотного и пористого заполни-

теля представлены в табл. 2 и 3.

В качестве плотного мелкого заполнителя применялся песок кварцевый, физические характеристики которого представлены в табл. 4.

**Таблица 2.** Физико-механические характеристики щебня

**Table 2.** Physical and mechanical characteristics of crushed stone

Фракция	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Дробимость, % по массе	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, % по массе	Пустотность, %
5–20	1430	2,66	11,4	9,5	46,2

**Таблица 3.** Физико-механические характеристики керамзитового гравия

**Table 3.** Physical and mechanical characteristics of expanded clay gravel

Фракция	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, % по массе	Пустотность, %
5–20	911	21	6,4	56

**Таблица 4.** Физические характеристики плотного мелкого заполнителя

**Table 4.** Physical characteristics of dense fine aggregate

Зерновой состав							Проход через сито с сеткой № 0.16, % по массе	Модуль крупности	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Размеры отверстий сит, мм											
Остатки на ситах	Частные и полные остатки на ситах, %										
10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	2,49	1,66	1,1	2,61	1438
0	0	0,17	1,39	8,86	45,80	41,03					
		0,17	1,56	10,42	56,21	97,25					
							99,74				

Для изготовления центрифугированных образцов была применена экспериментальная лабораторная центрифуга, принципиальная схема данной установки и подробное описание представлены в работе М. Г. Холодняка<sup>1</sup>.

Приготовление бетонной смеси осуществлялось в лабораторном бетоносмесителе принудительного действия. Также для исследований нами было применено: испытательное оборудование (пресс гидравлический), средства измерения (линейка измерительная металлическая, весы лабораторные,

прибор для измерения отклонений от плоскости НПЛ-1, прибор для измерения отклонений от перпендикулярности НПП-1).

Всего изготовлено и испытано десять базовых образцов кольцевого сечения с размерами:

- внешний диаметр  $D = 450$  мм;
- внутренний диаметр отверстия  $d = 150$  мм;
- общая высота  $H = 1200$  мм.

Методика изготовления опытных образцов для определения прочностных и деформатив-

<sup>1</sup>Холодняк М. Г. Совершенствование расчета и технологии создания виброцентрифугированных железобетонных колонн с учетом вариативности структуры: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2020. 185 с.

ных интегральных (общих, усредненных по сечению), а также дифференциальных (различающихся по слоям сечения) характеристик бетона описана в работах<sup>2</sup> [18–22].

В качестве контрольного состава запроектирован тяжелый бетон класса В30 с требуемой маркой по удобоукладываемости

П1 (осадка конуса 1–4 см), где зерновой состав крупного заполнителя представлен фракцией 10–20 мм. Полученные в результате расчетов параметры состава бетонной смеси отражены в табл. 5.

**Таблица 5.** Параметры состава бетонной смеси  
**Table 5.** Concrete composition parameters

В/Ц*	Абсолютный объем цементного теста, л	Абсолютный объем заполнителей, л, при соотношении $r = П/Щ^{**} = 0,4$	Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Расход щебня на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг	Расход песка на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг
0,38	319	1805	400	1290	515

\* – водоцементное отношение;

\*\* – соотношение песка и щебня.

При приготовлении опытных замесов бетонных смесей с различным содержанием фракций крупного плотного и пористого заполнителей расход цемента и соотношение П/Щ оставались неизменными.

Расход воды корректировался до получения требуемой подвижности бетонной смеси. Коэффициенты прочностной и деформатив-

ной вариатропной эффективности рассчитывались по работе [16].

#### Результаты и их обсуждение

В результате испытаний контрольных образцов тяжелого центрифугированного бетона были получены средние значения интегральных и дифференциальных прочностных и деформативных характеристик, которые представлены в табл. 6.

**Таблица 6.** Средние значения интегральных и дифференциальных прочностных и деформативных характеристик контрольных образцов тяжелого центрифугированного бетона  
**Table 6.** Average values of integral and differential strength and deformation characteristics of control samples of heavy centrifuged concrete

$R_{b,cub}$ , МПа	$R_b$ , МПа	$R_{btb}$ , МПа	$R_{bt}$ , МПа	$\varepsilon_{bR}$ , мм/м·10 <sup>-3</sup>	$\varepsilon_{btR}$ , мм/м·10 <sup>-4</sup>	$E_b = E_{bt}$ , ГПа
59,6	44,7	7,2	4,2	1,73	1,15	38,9
$\overline{R}_{b,cub}$ , МПа	$\overline{R}_b$ , МПа	$\overline{R}_{btb}$ , МПа	$\overline{R}_{bt}$ , МПа	$\overline{\varepsilon}_{bR}$ , мм/м·10 <sup>-3</sup>	$\overline{\varepsilon}_{btR}$ , мм/м·10 <sup>-4</sup>	$\overline{E}_b = \overline{E}_{bt}$ , ГПа
62,7	47,5	7,5	4,4	1,69	1,11	41,2

Выбор рационального зернового состава крупного плотного и оптимального объемного содержания крупного пористого заполнителей осуществлялся посредством проведения расчетов методом математического планирования эксперимента с использованием программы *MathCAD*.

В качестве функций отклика принимались изменяющиеся в зависимости от различного зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей интегральные и дифференциальные прочностные и деформативные характеристики центрифугированного бетона:

- $R_{b,cub}(\alpha, V_{e,k})$  – кубиковая прочность при сжатии, МПа;
- $R_b(\alpha, V_{e,k})$  – призмочная прочность при сжатии, МПа;
- $R_{bt}(\alpha, V_{e,k})$  – прочность при осевом растяжении, МПа;
- $R_{btb}(\alpha, V_{e,k})$  – прочность на растяжение при изгибе, МПа;
- $\varepsilon_{bR}(\alpha, V_{e,k})$  – предельные деформации при осевом сжатии, мм/м·10<sup>-3</sup>;
- $\varepsilon_{btbR}(\alpha, V_{e,k})$  – предельные деформации при осевом растяжении, мм/м·10<sup>-4</sup>;
- $E_b = E_{btb}(\alpha, V_{e,k})$  – модуль упругости, ГПа.

<sup>2</sup>Холодняк М. Г. Совершенствование расчета и технологии создания виброцентрифугированных железобетонных колонн с учетом вариатропии структуры: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2020. 185 с.

**Таблица 7.** Значения факторов варьирования ПФЭ 2<sup>к</sup>

**Table 7.** Values of the factors of variation of the PFE 2<sup>k</sup>

Код фактора	Физический смысл фактора	Уровни фактора		
		-1	0	+1
$\alpha$	Соотношение фракций 10–20 и 5–10 крупного плотного заполнителя, %	60/40	50/50	40/60
$V_{э.к}$	Объемное содержание крупного пористого заполнителя, %	25	30	35

В табл. 8 и 9 представлены результаты экспериментальных исследований влияния зернового состава крупного плотного заполнителя и объемного содержания крупного пористого

заполнителя на интегральные и дифференциальные прочностные и деформативные характеристики облегченного центрифугированного бетона.

**Таблица 8.** Результаты экспериментальных исследований влияния зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей на интегральные прочностные и деформативные характеристики облегченного центрифугированного бетона

**Table 8.** Results of experimental studies of the effect of grain size composition coarse dense and volumetric content of coarse porous aggregates on the integral strength and deformation characteristics of the lightweight centrifuged concrete

Номер опыта	$\alpha$ , %	$V_{э.к}$ , %	$R_{b,cub}$ , МПа	$R_b$ , МПа	$R_{btb}$ , МПа	$R_{bt}$ , МПа	$\bar{\varepsilon}_{bR}$ , мм/м·10 <sup>-3</sup>	$\varepsilon_{btR}$ , мм/м·10 <sup>-4</sup>	$E_b = E_{bt}$ , ГПа
1	60/40	25	52,4	39,3	6,3	3,7	1,83	1,21	36,2
2	40/60	25	50,3	37,2	6,0	3,5	1,87	1,24	35,3
3	60/40	35	48,9	36,7	5,9	3,4	1,91	1,26	34,7
4	40/60	35	47,5	35,6	5,7	3,4	1,96	1,29	33,8
5	60/40	30	51,5	38,6	6,2	3,6	1,81	1,20	36,5
6	40/60	30	48,2	36,2	5,8	3,4	1,83	1,21	36,2
7	50/50	25	50,5	37,4	6,1	3,5	1,87	1,24	35,3
8	50/50	35	45,7	34,3	5,5	3,2	1,91	1,26	34,7
9	50/50	30	46,5	34,9	5,6	3,3	1,95	1,29	33,8

**Таблица 9.** Результаты экспериментальных исследований влияния зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей на дифференциальные прочностные и деформативные характеристики облегченного центрифугированного бетона

**Table 9.** Results of experimental studies of the effect of the grain size composition of coarse dense and volumetric content of coarse porous aggregates on the differential strength and deformation characteristics of lightweight centrifuged concrete

Номер опыта	$\alpha$ , %	$V_{э.к}$ , %	$R_{b,cub}$ , МПа	$R_b$ , МПа	$R_{btb}$ , МПа	$R_{bt}$ , МПа	$\bar{\varepsilon}_{bR}$ , мм/м·10 <sup>-3</sup>	$\varepsilon_{btR}$ , мм/м·10 <sup>-4</sup>	$E_b = E_{bt}$ , МПа·10 <sup>3</sup>
1	60/40	25	61,3	46,0	7,6	4,3	1,87	1,28	37,4
2	40/60	25	60,7	45,5	7,6	4,3	1,97	1,27	37,1
3	60/40	35	59,8	44,6	7,2	4,3	2,09	1,32	36,8
4	40/60	35	57,9	43,4	7,0	4,1	2,11	1,33	35,9
5	60/40	30	66,7	50,5	8,0	4,7	2,06	1,29	38,8
6	40/60	30	60,7	45,6	7,3	4,2	2,01	1,23	37,4
7	50/50	25	59,7	44,8	7,5	4,2	2,03	1,25	37,1
8	50/50	35	54,3	40,5	6,5	3,9	2,11	1,28	36,8
9	50/50	30	55,8	41,9	6,8	3,9	2,12	1,27	35,9

По результатам исследований методом наименьших квадратов были получены базовые уравнения регрессии для интегральных и дифференциальных прочностных и деформативных характеристик облегченного центрифугированного бетона, которые представлены в виде полиномов 2-й степени в табл. 10. По-

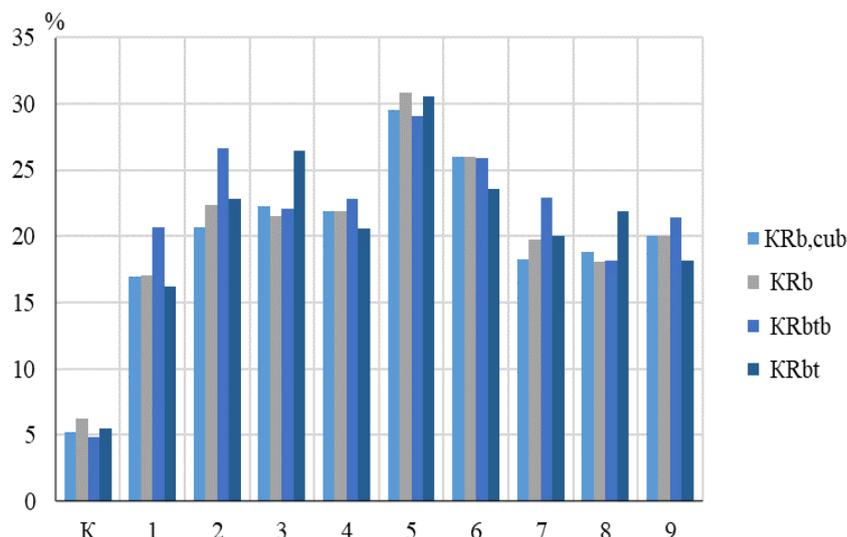
лученные уравнения регрессии оценивались по однородности дисперсий, значимости коэффициентов и адекватности, которая проверялась с помощью критерия Фишера. По расчетному значению  $t$  – критерия Стьюдента – устанавливали значимость коэффициентов уравнений.

**Таблица 10.** Базовые уравнения регрессии для интегральных и дифференциальных прочностных и деформативных характеристик облегченного центрифугированного бетона  
**Table 10.** Basic regression equations for integral and differential strength and deformation characteristics of lightweight centrifuged concrete

Характеристики	Уравнения регрессии
<i>Интегральные</i>	
$R_{b,cub}$	$R_{b,cub}(\alpha, V_{г.к}) = 49 - 1,13 \cdot \alpha - 1,85 \cdot V_{г.к} + 0,18 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 2,23 \cdot \alpha^2 + 0,48 \cdot V_{г.к}^2$
$R_b$	$R_b(\alpha, V_{г.к}) = 37 - 0,93 \cdot \alpha - 1,22 \cdot V_{г.к} + 0,25 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 1,73 \cdot \alpha^2 + 0,18 \cdot V_{г.к}^2$
$R_{bt}$	$R_{bt}(\alpha, V_{г.к}) = 6 - 0,15 \cdot \alpha - 0,22 \cdot V_{г.к} + 0,03 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 0,25 \cdot \alpha^2 + 0,05 \cdot V_{г.к}^2$
$R_{btb}$	$R_{btb}(\alpha, V_{г.к}) = 3 - 0,07 \cdot \alpha - 0,12 \cdot V_{г.к} + 0,05 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 0,17 \cdot \alpha^2 + 0,02 \cdot V_{г.к}^2$
$\epsilon_{bR}$	$\epsilon_{bR}(\alpha, V_{г.к}) = 2 + 0,02 \cdot \alpha + 0,04 \cdot V_{г.к} + 0,003 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} - 0,04 \cdot \alpha^2 + 0,03 \cdot V_{г.к}^2$
$\epsilon_{btbR}$	$\epsilon_{btbR}(\alpha, V_{г.к}) = 1 + 0,01 \cdot \alpha - 0,02 \cdot V_{г.к} - 0,03 \cdot \alpha^2 + 0,02 \cdot V_{г.к}^2$
$E_b = E_{btb}$	$E_{bR} = E_{btbR}(\alpha, V_{г.к}) = 35 - 0,35 \cdot \alpha - 0,6 \cdot V_{г.к} + 85 \cdot \alpha^2 - 0,5 \cdot V_{г.к}^2$
<i>Дифференциальные</i>	
$R_{b,cub,i}$	$R_{b,cub,i}(\alpha, V_{г.к}) = 60 - 1,41 \cdot \alpha - 1,62 \cdot V_{г.к} - 0,33 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 4,58 \cdot \alpha^2 - 2,12 \cdot V_{г.к}^2$
$R_{b,i}$	$R_{b,i}(\alpha, V_{г.к}) = 45 - 1,1 \cdot \alpha - 1,3 \cdot V_{г.к} - 0,18 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 3,53 \cdot \alpha^2 - 1,87 \cdot V_{г.к}^2$
$R_{bt,i}$	$R_{bt,i}(\alpha, V_{г.к}) = 7 - 0,15 \cdot \alpha - 0,33 \cdot V_{г.к} - 0,05 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 0,51 \cdot \alpha^2 - 0,13 \cdot V_{г.к}^2$
$R_{btb,i}$	$R_{btb,i}(\alpha, V_{г.к}) = 4 - 0,12 \cdot \alpha - 0,08 \cdot V_{г.к} - 0,05 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 0,32 \cdot \alpha^2 - 0,08 \cdot V_{г.к}^2$
$\epsilon_{bR,i}$	$\epsilon_{bR,i}(\alpha, V_{г.к}) = 2 + 0,008 \cdot \alpha + 0,002 \cdot V_{г.к} - 0,01 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} - 0,04 \cdot \alpha^2 + 0,012 \cdot V_{г.к}^2$
$\epsilon_{btbR,i}$	$\epsilon_{btbR,i}(\alpha, V_{г.к}) = 1 + 0,012 \cdot \alpha - 0,003 \cdot V_{г.к} - 0,022 \cdot \alpha^2 + 0,013 \cdot V_{г.к}^2$
$E_{bR,i} = E_{btbR,i}$	$E_{bR,i} = E_{btbR,i}(\alpha, V_{г.к}) = 37 - 0,3 \cdot \alpha - 0,12 \cdot V_{г.к} + 0,05 \cdot \alpha \cdot V_{г.к} + 0,77 \cdot \alpha^2 - 0,28 \cdot V_{г.к}^2$

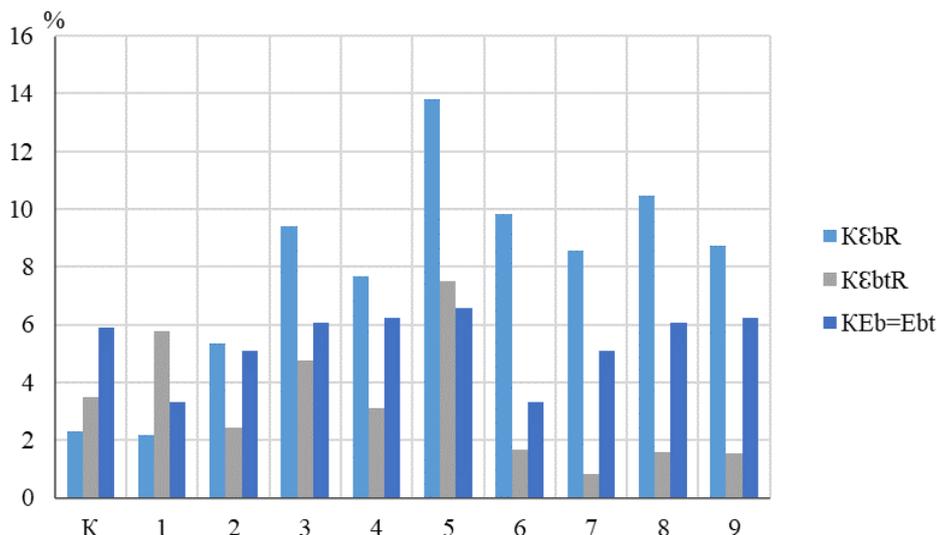
Результаты экспериментальных исследований влияния зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей на коэффициенты прочностной и деформативной вариатропной эффективности тяжелого и облегченного центрифугированного бетона представлены на рис. 1 и 2. После анализа полученных графических зависимостей было установлено, что максимальные значения коэффициентов проч-

ностной и деформативной вариатропной эффективности достигаются при применении крупного заполнителя с зерновым составом, где содержание фракции 5–10 составляет 40 % от общего объема заполнителя, содержание фракции 10–20 составляет 60 %, а объемное содержание крупного пористого заполнителя, введенное взамен части плотного, составляет 30 %.



**Рис. 1.** Зависимость изменения коэффициентов прочностной вариатропной эффективности центрифугированных бетонов от зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей

**Fig. 1.** Dependence of the change in the coefficients of the strength variatropic efficiency of centrifuged concretes on the grain size composition of coarse dense and volumetric content of coarse porous aggregates



**Рис. 2.** Зависимость изменения коэффициентов деформативной вариатропной эффективности центрифугированных бетонов от зернового состава крупного плотного и объемного содержания крупного пористого заполнителей

**Fig. 2.** Dependence of the change in the coefficients of the deformative variatropic efficiency of centrifuged concretes on the grain size composition of coarse dense and volumetric content of coarse porous aggregates

Также в результате анализа дифференциальных прочностных и деформативных характеристик установлено, что применение крупного заполнителя с данным соотношением фракций и объемным содержанием крупного пористого заполнителя в количестве 30 % позволяет добиться наилучшей вариатропии. Так, разница между прочностными характеристиками для внутреннего и среднего слоя тяжелого центрифугированного бетона составляет 26 %, а для облегченного центрифугированного бетона – 28 %. Разница между внутренним и внешним слоем для тяжелого центрифугированного бетона составляет 49 %, а для облегченного – 56 %. Что касается разницы между средним и внешним слоями, то для тяжелого центрифугированного бетона она составляет 37 %, а для облегченного – 21 %. Для модуля упругости разница между внутренним и средним слоем у тяжелого центрифугированного бетона составляет 18 %, а у облегченного – 19 %. Разница между внутренним и внешним слоем для тяжелого центрифугированного бетона составляет 38 %, а для облегченного – 45 %. Что касается разницы между средним и внешним слоем, то для тяжелого центрифугированного бетона она составляет 21 %, а для облегченного – 14 %.

#### Заключение

Подтверждена возможность управления вариатропией облегченных центрифугирован-

ных бетонов за счет применения комбинированных заполнителей.

В ходе исследования разработан состав и проанализирована вариатропная эффективность облегченных центрифугированных бетонов.

В результате проведенных исследований установлено, что значения коэффициентов вариатропной эффективности напрямую зависят от степени вариатропии. Так, применение комбинированного крупного заполнителя с рационально подобранным зерновым составом позволяет усилить вариатропию и уменьшить разницу для значений прочностных и деформативных характеристик центрифугированного бетона между средним и внешним слоем. В результате анализа дифференциальных прочностных и деформативных характеристик установлено, что применение крупного заполнителя с данным соотношением фракций и объемным содержанием крупного пористого заполнителя в количестве 30 % позволяет добиться наилучшей вариатропии. Таким образом, дальнейшее регулирование рецептурных и технологических факторов при изготовлении центрифугированных изделий и конструкций позволит нам получать наиболее эффективные маломатериалоемкие конструкции кольцевого сечения с усиленной вариатропией.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сулейманова Л. А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 9–16. <https://doi.org/10.12737/22637>.
2. Абдыкалыков Т. А., Джамаева А. М. Облегченные мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих веществ // Материаловедение. 2017. № 2 (22). С. 20–23.
3. Белых А. Н., Астахов И. А., Евдокимова А. А. Испытание особо легкого бетона на диатомитовом заполнителе // Перспективы науки. 2021. № 4 (139). С. 234–236.
4. Савенков А. И., Савенков В. А. Облегченные вариатропные железобетонные перекрытия // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 288–293.
5. Бондарович А. И., Батяновский А. И. Исследование жаростойкости и термостойкости бетона на пористых заполнителях и заполнителях из плотных горных пород // Проблемы современного бетона и железобетона. 2017. № 9. С. 113–128. <https://doi.org/10.23746/2017-9-8>.
6. Бугаевский С. А. Применение самоуплотняющегося бетона в технологии устройства облегченных железобетонных перекрытий // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2015. № 69. С. 79–90.
7. Акулова М. В., Исакулов Б. Р., Джумабаев М. Д., Толеуов Т. Ж. Получение легкого арболитобетона на основе цементнозоляшламового вяжущего и органического заполнителя из скорлупы грецкого ореха // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 4 (35). С. 7.
8. Баженов Ю. М., Королев Е. В., Самошин А. П., Королева О. В. Выбор заполнителя для радиационно-защитных бетонов вариатропно-каркасной структуры // Региональная архитектура и строительство. 2009. № 1. С. 9–13.
9. Леденев А. А., Перцев В. Т., Калач А. В., Загоруйко Т. В., Донец С. А., Калач Е. В. Управление огнестойкостью железобетонных конструкций вариатропной структуры // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 16–22.
10. Рылова Т. С., Лахтарина С. В., Егорова Е. В. Легкий конструкционный бетон с повышенным коэффициентом конструктивного качества // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2018. № 4-2 (132). С. 221–226.
11. Al Zand A. W., Hosseinpour E., Badaruzzaman W. H. W., Ali M. M., Yaseen Z. M., Hanoon A. N. Performance of the novel C-purlin tubular beams filled with recycled-lightweight concrete strengthened with CFRP sheet // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. p. 102532. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102532>.
12. Abd Elrahman M., Sikora P., Chung S. Y., Stephan D. The performance of ultra-lightweight foamed concrete incorporating nanosilica // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2021. Vol. 21. p. 79. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00234-2>.
13. Huynh T.-P., Pham V.-H., Do N.-D., Nguyen T.-C., Ho N.-T. Performance evaluation of pre-foamed ultra-lightweight composites incorporating various proportions of slag // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2021. Vol. 65 (1). p. 276–286. <https://doi.org/10.3311/PPci.16996>.
14. Гаврилов А. В., Алюян К. Д., Доброхотов В. Б., Придатко Ю. М. Совершенствование технологии получения облегченных бетонов // Шестьдесят восьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции. (Ярославль, 22 апреля 2015 г.). Ярославль: ЯГТУ, 2015. С. 765–767.
15. Begich Y. E., Klyuev S. V., Jos V. A., Cherkashin A. V. Fine-grained concrete with various types of fibers // Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 97. p. 123. <https://doi.org/10.18720/MCE.97.2>.
16. Семенюк С. Д., Москалькова Ю. Г. Определение границ образования микротрещин в зависимости от плотности керамзитобетона // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 4 (52). С. 129–136. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2018.52.4.012>.
17. Черных Д. С., Строев Д. А., Чернильник А. А., Ельшаева Д. М., Жеребцов Ю. В., Доценко Н. А. Зависимость коэффициентов прочностной и деформативной вариатропной эффективности центрифугированного бетона от зернового состава крупного заполнителя // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3. С. 470–479. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-470-479>.
18. Mailyan L. R., Stel'makh S. A., Shcherban' E. M., Khalyushev A. K., Smolyan-

ichenko A. S., Sysoev A. K., et al. Investigation of integral and differential characteristics of variatropic structure heavy concretes by ultrasonic methods // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11 (8). p. 3591. <https://doi.org/10.3390/app11083591>.

19. Mailyan L. R., Beskopylny A. N., Meskhi B., Stel'makh S. A., Shcherban E. M., Ananova O. Optimization of Composition and Technological Factors for the Lightweight Fiber-Reinforced Concrete Production on a Combined Aggregate with an Increased Coefficient of Structural Quality // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11 (16). p. 7284. <https://doi.org/10.3390/app11167284>.

20. Stel'makh S. A., Shcherban' E. M., Beskopylny A. N., Mailyan L. R., Meskhi B., Butko D., et al. Influence of Composition and Technological Factors on Variatropic Efficiency and Constructive

Quality Coefficients of Lightweight Vibro-Centrifuged Concrete with Alkalized Mixing Water // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11 (19). p. 9293. <https://doi.org/10.3390/app11199293>.

21. Shcherban E. M., Prokopov A. Yu., Stelmakh S. A., Shuyskiy A. I. Effect of Disperse Reinforcement on the Structural Quality Factor of Vibrated and Centrifuged Concretes on the Combined Aggregate // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974. p. 283-287. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.974.283>.

22. Явруян Х. С., Холодняк М. Г., Шуйский А. И., Стельмах С. А., Щербань Е. М. Влияние некоторых рецептурно-технологических факторов на свойства неавтоклавного газобетона // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 4. С. 93.

## REFERENCES

1. Suleimanova LA. High quality energy saving and competitive building materials, products and structures. *VestnikBGTUim.V.G.Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017;1:9-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/22637>.

2. Abdykalykov TA, Dzhambaeva AM. Lightweight fine-grained concrete based on composite binders. *Materialovedenie*. 2017;2(22):20-23. (In Russ.).

3. Belykh AN, Astakhov IA, Evdokimova AA. Test of lightweight concrete on diamite aggregate. *Perspektivy nauki*. 2021;4(139):234-236. (In Russ.).

4. Savenkov AI, Savenkov VA. Lightweight CVT from concrete. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016;1(1):288-293. (In Russ.).

5. Bondarovich AI, Batyanovskii AI. Research of heat resistance and thermal stability of concrete on porous fillers and fillers from dense rocks. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona = Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete*. 2017;9:113-128. (In Russ.). <https://doi.org/10.23746/2017-9-8>.

6. Bugaevskii SA. The use of self-compacting concrete in the technology of construction of lightweight reinforced concrete floors. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2015;69:79-90. (In Russ.).

7. Akulova MV, Isakulov BR, Dzhumabaev MD, Toleuov TZh. Getting lightweight concrete arbolit the based binder of cement, fly ash and sludge and organic filler from the shell of a walnut. *Naukovedenie*. 2016;8(4):7. (In Russ.).

8. Bazhenov YuM, Korolev EV, Samoshin AP, Koroleva OV. Selection of aggregate for radiation-shielding concretes of variatropic-frame structure.

*Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo = Regional architecture and construction*. 2009;1:9-13. (In Russ.).

9. Ledenev AA, Pertsev VT, Kalach AV, Zagorukiko TV, Donets SA, Kalach EV. Management of fire resistance of ferro-concrete designs variational of structure. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016;4:16-22. (In Russ.).

10. Rylova TS, Lakhtarina SV, Egorova EV. Lightweight structural concrete with an increased coefficient of structural quality. *Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury = Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2018;4-2(132):221-226. (In Russ.).

11. Al Zand AW, Hosseinpour E, Badaruzzaman WHW, Ali MM, Yaseen ZM, Hanoon AN. Performance of the novel C-purlin tubular beams filled with recycled-lightweight concrete strengthened with CFRP sheet. *Journal of Building Engineering*. 2021;43:102532. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102532>.

12. Abd Elrahman M, Sikora P, Chung SY, Stephan D. The performance of ultra-lightweight foamed concrete incorporating nanosilica. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2021;21:79. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00234-2>.

13. Huynh T-P, Pham V-H, Do N-D, Nguyen T-C, Ho N-T. Performance evaluation of pre-foamed ultra-lightweight composites incorporating various proportions of slag. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021;65(1):276-286. <https://doi.org/10.3311/PPci.16996>.

14. Gavrilov AV, Aloyan KD, Dobrokhotov VB, Pridatko YuM. Improvement of extracting technology of lightweight concrete. *Shest'desyat vos'maya vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya*

*konferentsiya studentov, magistrantov i aspirantov vysshikh uchebnykh zavedenii s mezhdunarodnym uchastiem: sbornik materialov konferentsii* (Yaroslavl', 22<sup>nd</sup> April 2015). Yaroslavl': YSTU; 2015. p. 765-767.

15. Begich YE, Klyuev SV, Jos VA, Cherkashin AV. Fine-grained concrete with various types of fibers. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;97:123. <https://doi.org/10.18720/MCE.97.2>.

16. Semenyuk SD, Moskal'kova YuG. Calculation method for the formation of microcracks taking into account the density of claydite concrete. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Russian journal of building construction and architecture*. 2018;4(52):129-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.25987/VSTU.2018.52.4.012>.

17. Chernykh DS, Stroev DA, Chernil'nik AA, El'shaeva DM, Zherebtsov YuV, Dotsenko ND. Dependence of structural and stress-strain variatropic efficiency coefficients of spun concrete on grain size composition of coarse aggregate. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(3):470-479. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-3-470-479>.

18. Mailyan LR, Stel'makh SA, Shcherban' EM, Khalyushev AK, Smolyanichenko AS, Sysoev AK, et al. Investigation of integral and differential characteristics of variatropic structure heavy concretes by ultrasonic methods. *Applied*

*Sciences (Switzerland)*. 2021;11(8):3591. <https://doi.org/10.3390/app11083591>.

19. Mailyan LR, Beskopylny AN, Meskhi B, Stel'makh SA, Shcherban EM, Ananova O. Optimization of Composition and Technological Factors for the Lightweight Fiber-Reinforced Concrete Production on a Combined Aggregate with an Increased Coefficient of Structural Quality. *Applied Sciences*. 2021;11(16):7284. <https://doi.org/10.3390/app11167284>.

20. Stel'makh SA, Shcherban' EM, Beskopylny AN, Mailyan LR, Meskhi B, Butko D, et al. Influence of Composition and Technological Factors on Variatropic Efficiency and Constructive Quality Coefficients of Lightweight Vibro-Centrifuged Concrete with Alkalized Mixing Water. *Applied Sciences*. 2021;11(19):9293. <https://doi.org/10.3390/app11199293>.

21. Shcherban EM, Prokopov AYU, Stelmakh SA, Shuyskiy AI. Effect of Disperse Reinforcement on the Structural Quality Factor of Vibrated and Centrifuged Concretes on the Combined Aggregate. *Materials Science Forum*. 2019;974:283-287. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.974.283>.

22. Yavruyan KhS, Kholodnyak MG, Shuiskii AI, Stel'makh SA, Shcherban' EM. The influence of some prescription-technological factors on properties of non-autoclave aerated concrete. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2015;4:93. (In Russ.).

### Информация об авторах

**Смоляниченко Алла Сергеевна**,  
доцент,  
Донской государственный технический университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: arpis-2006@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1664-2986>

**Чернильник Андрей Александрович**,  
аспирант,  
Ростовский государственный университет путей сообщения,  
344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, Россия,  
инженер,  
Донской государственный технический университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: chernila\_a@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0103-2587>

### Information about the authors

**Alla S. Smolyanichenko**,  
Associate professor,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: arpis-2006@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1664-2986>

**Andrei A. Chernil'nik**,  
Graduate student,  
Rostov State Transport University,  
2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Rostov-on-Don, 344038, Russia,  
engineer,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: chernila\_a@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0103-2587>

**Ельшаева Диана Михайловна**,  
магистрант,  
Донской государственный технический  
университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: diana.elshaeva@yandex.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8086-6300>

**Diana M. El'shaeva**,  
Undergraduate,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: diana.elshaeva@yandex.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8086-6300>

**Жеребцов Юрий Владимирович**,  
магистрант,  
Донской государственный технический  
университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
✉e-mail: yuri.zherebtsov@gmail.com,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6162-0049>

**Yuriy V. Zherebtsov**,  
Undergraduate,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
✉e-mail: yuri.zherebtsov@gmail.com,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6162-0049>

**Доценко Наталья Александровна**,  
магистрант,  
Донской государственный технический  
университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: natalya\_1998\_dotsenko@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7829-6401>

**Natal'ya A. Dotsenko**,  
Undergraduate,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: natalya\_1998\_dotsenko@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7829-6401>

**Самофалова Мария Сергеевна**,  
магистрант,  
Донской государственный технический  
университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: mary.ss17@yandex.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9950-8696>

**Mariya S. Samofalova**,  
Undergraduate,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: mary.ss17@yandex.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9950-8696>

**Смачный Владислав Юрьевич**,  
магистрант,  
Донской государственный технический  
университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: smachney87@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0771-1406>

**Vladislav Yu. Smachney**,  
Undergraduate,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: smachney87@mail.ru,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0771-1406>

#### **Вклад авторов**

Смоляниченко А. С., Чернильник А. А., Ельшаева Д. М., Жеребцов Ю. В., Доценко Н. А., Самофалова М. С., Смачный В. Ю. имеют равные авторские права. Жеребцов Ю. В. несет ответственность за плагиат.

#### **Contribution of the authors**

Smolyanichenko A. S., Chernil'nik A. A., El'shaeva D. M., Zherebtsov Yu. V., Dotsenko N. A., Samofalova M. S., Smachnyi V. Yu. have equal author's rights. Zherebtsov Yu. V. bears the responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Статья поступила в редакцию 12.10.2021.  
Одобрена после рецензирования 10.11.2021.  
Принята к публикации 12.11.2021.

The article was submitted 12.10.2021.  
Approved after reviewing 10.11.2021.  
Accepted for publication 12.11.2021.