



## Зависимость коэффициентов прочностной и деформативной вариатропной эффективности центрифугированного бетона от зернового состава крупного заполнителя

Д. С. Черных<sup>1</sup>, Д. А. Строев<sup>1</sup>, А. А. Чернильник<sup>2</sup>,  
Д. М. Ельшаева<sup>1</sup>, Ю. В. Жеребцов<sup>1</sup>, Н. А. Доценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия

**Резюме:** На сегодняшний день одним из актуальных направлений в строительной отрасли является разработка и усовершенствование маломатериалоемких, энерго- и ресурсоемких технологий изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций. В связи с этим технология центрифугирования является довольно перспективной. Целью настоящего исследования является поиск возможностей рецептурного регулирования вариатропной структуры бетона, а также создание способов оценки этой вариатропии, выраженной в качественном и количественном аспектах. Всего было изготовлено и испытано семь базовых образцов кольцевого сечения. По результатам испытаний опытных образцов центрифугированного бетона с различным зерновым составом крупного заполнителя были определены фактические значения интегральных и дифференциальных прочностных и деформативных характеристик бетона. Произведен расчет и анализ коэффициентов прочностной и деформативной вариатропной эффективности. Определен оптимальный зерновой состав крупного заполнителя, позволяющий получить центрифугированный бетон с усиленной вариатропией и, как следствие, наиболее эффективным коэффициентом вариатропной эффективности. Определена перспектива дальнейших исследований в направлении усиления вариатропии центрифугированных бетонных и железобетонных изделий и конструкций путем регулирования рецептурно-технологических факторов.

**Ключевые слова:** железобетонные изделия, центрифугированный бетон, вариатропия, прочностные характеристики, деформативные характеристики, зерновой состав

**Для цитирования:** 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>.

## Dependence of structural and stress-strain variatropic efficiency coefficients of spun concrete on grain size composition of coarse aggregate

Dmitrii S. Chernykh, Dmitrii A. Stroeov, Andrei A. Chernil'nik, Diana M. El'shaeva,  
Yuriy V. Zherebtsov, Natal'ya A. Dotsenko

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Abstract:** At present, developing and improving low-material, energy- and resource-intense technologies to manufacture concrete and reinforced concrete products and structures have become a topical issue in the construction industry. Therefore, centrifugation technology is promising. In this article, the formulation of concrete with variatropic structure was improved, and the methods for its qualitative and quantitative assessment were developed. Seven annular cross-section reference samples were manufactured and tested. Based on the test results of centrifuged concrete samples with different grain size compositions of the coarse aggregate, the empirical values of the integral and differential strength and deformation characteristics of concrete were determined. The structural and stress-strain variational efficiency coefficients were calculated and analysed. The optimal grain size composition of the coarse aggregate was determined and allows centrifuged concrete with an enhanced variatropy to be obtained,

as well as the most effective coefficient of variatropic efficiency. The prospects for further enhancing the variatropy of centrifuged and reinforced concrete products and structures by improving the formulation-technological factors were determined.

**Keywords:** reinforced concrete products, centrifuged concrete, variatropy, strength characteristics, deformation characteristics, grain size composition

**For citation:** Chernykh D. S., Stroev D. A., Chernil'nik A. A., El'shaeva D. M., Zherebtsov Yu. V., Dotsenko N. D. Dependence of structural and stress-strain variatropic efficiency coefficients of spun concrete on grain size composition of coarse aggregate. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. 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>.

## Введение

Получение строительных конструкций с использованием маломатериалоемких, энерго- и ресурсоемких технологий является одним из актуальнейших направлений строительной науки, что отражено в работах<sup>1</sup> [1–2].

В источниках<sup>2</sup> [2–6] исследовались прочностные и деформативные характеристики железобетонных изделий и конструкций при различных напряженно-деформированных состояниях. Также в работах [7–13] проводился анализ физико-механических свойств центрифугированного бетона в зависимости от технологических и рецептурных параметров.

Однако в научно-технической литературе недостаточно информации о влиянии различных рецептурных решений на вариатропию структуры бетона, получаемого центрифугированием [14].

Ранее в наших исследованиях были определены направления снижения материало-, ресурсо- и энергоемкости создания эффективных строительных конструкций.

В работах М.Г. Холодняка<sup>3</sup> и [15–18] были получены результаты, доказавшие, что такое свойство центрифугированных и иных центробежно уплотненных бетонных и железобетонных конструкций кольцевого сечения, как вариатропия, является перспективным для развития научных школ железобетона в России и за рубежом.

Дело в том, что данное явление традиционно рассматривалось как отрицательное, снижающее прочность бетона и, как следствие, несущую способность получаемых железобетонных конструкций.

Однако нашими исследованиями было доказано, что при правильной постановке за-

дачи и умении правильно спрогнозировать и рассчитать вариатропию структуры, а при необходимости и усилить ее, можно добиваться высвобождения скрытых резервов несущей способности железобетонных изделий кольцевого сечения.

Такое сечение является удачным ввиду малой материалоемкости и, вследствие этого, облегченности и возможности применения таких конструкций в сложных инженерно-геологических условиях в городах и иных населенных пунктах, а также в рамках решения проблемы плотной городской застройки.

Таким образом, ранее были определены различия, имеющиеся между нормативными методами расчета и технологией создания вариатропных элементов кольцевого сечения, выполненных из железобетона, и предлагаемыми нами методиками расчета и технологией.

В связи с этим целью настоящего исследования является поиск возможностей рецептурного регулирования вариатропной структуры, а также создание способов оценки этой вариатропии, выраженной в качественном и количественном аспектах.

Задачами исследования являются:

– изучение вариантов варьирования фракционного состава крупного заполнителя из гранитного щебня для получения рациональной структуры вариатропной железобетонной колонны;

– оценка вариатропности при различных значениях рецептурно-технологических факторов, таких как фракционный состав крупного заполнителя.

Исследование включает в себя теоретическое обоснование и экспериментальные исследования с формулированием выводов

<sup>1</sup>Дубинина В.Г. Разработка оптимальных параметров центрифугирования железобетонных безнапорных труб: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Тагил, 2002. 150 с.

<sup>2</sup>Там же.

<sup>3</sup>Холодняк М.Г. Совершенствование расчета и технологии создания виброцентрифугированных железобетонных колонн с учетом вариатропии структуры: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2020. 185 с.

по итогам полученных результатов.

**Методы**

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

В качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень, физико-механические характеристики которого представлены в табл. 2. В качестве мелкого заполнителя – песок кварцевый, физические характеристики которого представлены в табл. 3.

**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   | 165                  |
| – конец  | 260                  |
| Тонкость помола при проходе через сито № 008, %      | 97,8                 |
| Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг             | 380                  |
| Нормальная густота цементного теста, %               | 25,5                 |

**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 щебня

**Table 3.** Physical and mechanical characteristics of crushed stone

| 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, % |      |       |       |       | 2,49  | 1,66             | 1,1   | 2,61                                  | 1438                                  |
| 10                        | 5 | 2,5                                  | 1,25 | 0,63  | 0,315 | 0,16  |   |                  |   |                                       |                                       |
| 0                         | 0 | 0,17                                 | 1,39 | 8,86  | 45,80 | 41,03 | 99,74   |                  |   |                                       |                                       |
|                           |   | 0,17                                 | 1,56 | 10,42 | 56,21 | 97,25 |   |                  |   |                                       |                                       |

Для изготовления центрифугированных образцов была применена экспериментальная лабораторная центрифуга, принципиальная схема данной установки и подробное описание представлены в работе М.Г. Холодняка<sup>4</sup>. Приготовление бетонной смеси осуществлялось в лабораторном бетоносмесителе принудительного действия.

Также для исследований нами были применены: 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 семь базо-

вых 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 деформативных интегральных (общих, усредненных по сечению), а также дифференциальных (различающихся по слоям сечения) характеристик бетона описана в работах<sup>5</sup> [15–18].

Значения коэффициентов прочностной и деформативной вариативной эффективности рассчитывались по приведенным ниже формулам.

<sup>4</sup>Холодняк М.Г. Совершенствование расчета и технологии создания виброцентрифугированных железобетонных колонн с учетом вариативности структуры: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2020. 185 с.

<sup>5</sup>Там же.

$$K_{R_{b,cub}} = \frac{\overline{R_{b,cub}} - R_{b,cub}}{R_{b,cub}}, \quad (1)$$

где  $R_{b,cub}$  – кубиковая прочность при сжатии, МПа;  $\overline{R_{b,cub}} = \frac{\sum R_{b,cub,i}}{n}$  – среднее значение при расчете дифференциальных характеристик, МПа, где  $i$  – номер слоя,  $n$  – количество слоев.

$$K_{R_b} = \frac{\overline{R_b} - R_b}{R_b}, \quad (2)$$

где  $R_b$  – призменная прочность при сжатии, МПа;  $\overline{R_b} = \frac{\sum R_{b,i}}{n}$  – среднее значение при расчете дифференциальных характеристик, МПа, где  $i$  – номер слоя,  $n$  – количество слоев.

$$K_{R_{btb}} = \frac{\overline{R_{btb}} - R_{btb}}{R_{btb}}, \quad (3)$$

где  $R_{btb}$  – прочность на растяжение при изгибе, МПа,  $\overline{R_{btb}} = \frac{\sum R_{btb,i}}{n}$  – среднее значение при расчете дифференциальных характеристик, МПа, где  $i$  – номер слоя,  $n$  – количество слоев.

$$K_{R_{bt}} = \frac{\overline{R_{bt}} - R_{bt}}{R_{bt}}, \quad (4)$$

где  $R_{bt}$  – прочность на осевое растяжение, МПа,  $\overline{R_{bt}} = \frac{\sum R_{bt,i}}{n}$  – среднее значение при расчете дифференциальных характеристик, МПа, где  $i$  – номер слоя,  $n$  – количество слоев.

$$K_{\varepsilon_{bR}} = \frac{|\overline{\varepsilon_{bR}} - \varepsilon_{bR}|}{\overline{\varepsilon_{bR}}} \cdot 100, \% , \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{bR}$  – предельные деформации при осевом сжатии, мм/м·10<sup>-3</sup>;  $\overline{\varepsilon_{bR}} = \frac{\sum \varepsilon_{bR,i}}{n}$  – среднее значение при расчете дифференциальных характеристик, мм/м·10<sup>-3</sup>, где  $i$  – номер слоя,  $n$  – количество слоев.

$$K_{\varepsilon_{btR}} = \frac{|\overline{\varepsilon_{btR}} - \varepsilon_{btR}|}{\varepsilon_{btR}} \cdot 100, \% , \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{btR}$  – предельные деформации при осевом растяжении, мм/м·10<sup>-4</sup>;  $\overline{\varepsilon_{btR}} = \frac{\sum \varepsilon_{btR,i}}{n}$  – среднее значение при расчете дифференциальных характеристик, мм/м·10<sup>-4</sup>, где  $i$  – номер слоя,  $n$  – количество слоев.

$$K_{E_b=E_{bt}} = \frac{\overline{E_b = E_{bt}} - E_b = E_{bt}}{E_b = E_{bt}} \cdot 100\% , \quad (7)$$

где  $E_b = E_{bt}$  – интегральный модуль упругости, ГПа;  $\overline{E_b = E_{bt}} = \frac{\sum E_{b,i=E_{bt,i}}}{n}$  – среднее значение при расчете дифференциальных характеристик, ГПа, где  $i$  – номер слоя,  $n$  – количество слоев.

### Результаты и их обсуждение

В качестве контрольного состава запроектирован тяжелый бетон класса В30, где зерновой состав крупного заполнителя представлен фракцией 10–20 мм.

Полученные в результате расчетов параметры состава бетонной смеси отражены в табл. 4. Результаты экспериментальных исследований влияния зернового состава крупного заполнителя на коэффициенты прочностной и деформативной вариатропной эффективности центрифугированного бетона представлены в табл. 5 и на рис. 1 и 2.

При приготовлении опытных замесов бетонных смесей с различной пропорцией содержания фракций крупного заполнителя расход цемента оставался неизменным. Расход воды корректировался до получения требуемой подвижности бетонной смеси.

В результате анализа полученных графических характеристик было установлено, что максимальные значения коэффициентов прочностной и деформативной вариатропной эффективности достигаются при применении крупного заполнителя со следующим зерновым составом: содержание фракции 5–10 составляет 40% от общего объема заполнителя, а содержание фракции 10–20 – 60%.

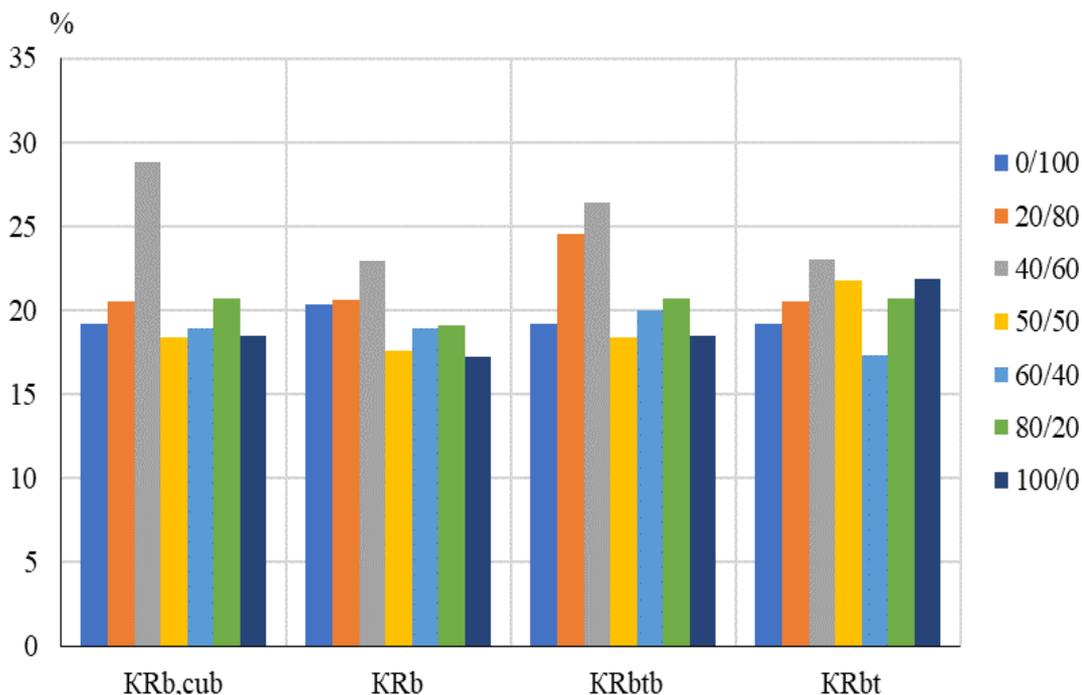
**Таблица 4.** Параметры состава бетонной смеси  
**Table 4.** Concrete composition parameters

| Наименование параметра   | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Водоцементное отношение  | 0,38               |
| Абсолютный объем цементного теста, л                                   | 319                |
| Абсолютный объем заполнителей, л, при соотношении $r = \Pi/\Psi = 0,4$ | 1805               |
| Расход цемента на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг                  | 400                |
| Расход щебня на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг                    | 1290               |
| Расход песка на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, кг                    | 515                |

**Таблица 5.** Результаты экспериментальных исследований влияния зернового состава крупного заполнителя на коэффициенты прочностной и деформативной вариатропной эффективности центрифугированных бетонов

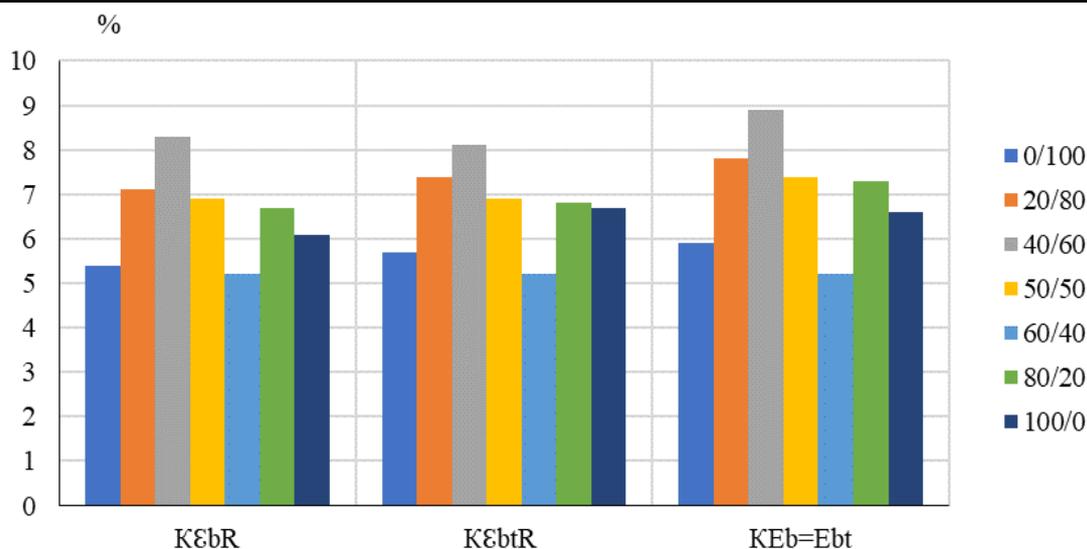
**Table 5.** Results of experimental studies of the effect of the grain size composition of a large aggregate on the strength and deformation coefficients of the variatropic efficiency of centrifuged concretes

| Характеристики опытных образцов |   | Зерновой состав крупного заполнителя, представленный различным содержанием фракций 5–10 и 10–20 относительно друг друга, % |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|---|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |   | 0/100  | 20/80 | 40/60 | 50/50 | 60/40 | 80/20 | 100/0 |
| $K_{R_{b,cub}}$                 | $R_{b,cub}$ , МПа                                   | 57,8   | 59,1  | 65,2  | 62,7  | 61,2  | 56,1  | 58,9  |
|                                 | $\bar{R}_{b,cub}$ , МПа                             | 68,9   | 71,2  | 79,1  | 74,2  | 72,8  | 67,7  | 69,8  |
| $K_{R_b}$                       | $R_b$ , МПа   | 43,4   | 44,3  | 48,2  | 47,0  | 45,9  | 42,1  | 44,2  |
|                                 | $\bar{R}_b$ , МПа                                   | 52,2   | 53,5  | 59,3  | 55,3  | 54,6  | 50,1  | 51,8  |
| $K_{R_{btb}}$                   | $R_{btb}$ , МПа                                     | 6,9  | 7,1   | 7,8   | 7,5   | 7,3   | 6,7   | 7,1   |
|                                 | $\bar{R}_{btb}$ , МПа                               | 8,3  | 8,8   | 9,9   | 8,9   | 8,8   | 8,1   | 8,4   |
| $K_{R_{bt}}$                    | $R_{bt}$ , МПа                                      | 4,0  | 4,1   | 4,6   | 4,4   | 4,3   | 3,9   | 4,1   |
|                                 | $\bar{R}_{bt}$ , МПа                                | 4,8  | 5,0   | 5,6   | 5,3   | 5,1   | 4,7   | 5,0   |
| $K_{\varepsilon_{bR}}$          | $\varepsilon_{bR}$ , мм/м · 10 <sup>-3</sup>        | 1,85   | 1,83  | 1,69  | 1,75  | 1,74  | 1,79  | 1,81  |
|                                 | $\bar{\varepsilon}_{bR}$ , мм/м · 10 <sup>-3</sup>  | 1,75   | 1,7   | 1,55  | 1,63  | 1,65  | 1,67  | 1,7   |
| $K_{\varepsilon_{btR}}$         | $\varepsilon_{btR}$ , мм/м · 10 <sup>-4</sup>       | 1,22   | 1,21  | 1,11  | 1,16  | 1,15  | 1,18  | 1,2   |
|                                 | $\bar{\varepsilon}_{btR}$ , мм/м · 10 <sup>-4</sup> | 1,15   | 1,12  | 1,02  | 1,08  | 1,09  | 1,1   | 1,12  |
| $K_{E_b=E_{bt}}$                | $E_b = E_{bt}$ , ГПа                                | 35,7   | 36,1  | 39,3  | 37,7  | 38,1  | 1,2   | 36,5  |
|                                 | $\bar{E}_b = \bar{E}_{bt}$ , ГПа                    | 37,8   | 38,9  | 42,8  | 40,5  | 40,1  | 39,6  | 38,9  |



**Рис. 1.** Зависимость величин коэффициентов прочностной вариатропной эффективности центрифугированных бетонов от зернового состава крупного заполнителя

**Fig. 1.** Dependence of the values of the coefficients of the strength variatropic efficiency of centrifuged concretes on the grain size composition of the coarse aggregate



**Рис. 2.** Зависимость величин коэффициентов деформативной вариатропной эффективности центрифугированных бетонов от зернового состава крупного заполнителя

**Fig. 2.** Dependence of the values of the coefficients of the deformative variatropic efficiency of centrifuged concretes on the grain size composition of the coarse aggregate

Анализ дифференциальных прочностных и деформативных характеристик показал, что применение крупного заполнителя с данным зерновым составом позволяет добиться максимальной вариатропии. Так, разница между прочностными характеристиками внутреннего и среднего слоя составляет 23%, внутреннего и внешнего – 48%, среднего и внешнего – 17%.

Что касается деформативных характеристик и модуля упругости, разница между внутренним и средним слоем составляет 19%, между внутренним и внешним – 42%, а между средним и внешним – 23%.

Для контрольного состава разница между прочностными характеристиками внутреннего и среднего слоя центрифугированного бетона составляет 22%, внутреннего и внешнего – 31%, среднего и внешнего – 25%. Что касается деформативных характеристик и модуля упругости, то разница между внутренним и средним слоем составляет 21%, между внутренним и внешним – 34%, а между средним и внешним – 29%.

#### Закключение

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы. Зависимость коэффициента вариатропной эффективности

напрямую зависит от степени вариатропии. Как уже известно, вариатропия, возникающая вследствие центробежного уплотнения бетонной смеси, когда тяжелые фракции заполнителя и иные компоненты бетона мигрируют к внешней части элемента, а легкие фракции – к внутренней части, носит более положительный характер по сравнению с вариатропией при вибрировании, потому что все внешние слои по всему сечению элемента приобретают наиболее высокие прочностные характеристики бетона, который, как правило, и несет основную нагрузку на центрифугированные железобетонные элементы – чаще всего сжатые при таком виде уплотнения. Но даже в случае изгибаемых элементов такого рода вариатропия бетона по высоте его сечения не будет препятствовать или ухудшать их работу под нагрузкой.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М. Современная технология бетона // Технологии бетонов. 2005. № 1. С. 6–8.

2. Сулейманова Л.А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструк-

- ции // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 1. С. 9–16. <http://doi.org/10.12737/22637>.
3. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Экспериментальные исследования деформативности изгибаемых железобетонных элементов различных поперечных сечений // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 4. С. 56–59. [http://doi.org/10.12737/article\\_58e61337b86486.82545138](http://doi.org/10.12737/article_58e61337b86486.82545138).
4. Радайкин О.В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 29–39. [http://doi.org/10.34031/article\\_5db33945315bb4.76965991](http://doi.org/10.34031/article_5db33945315bb4.76965991).
5. Крючков А.А., Жданов А.Е. Подходы к оценке деформативности изгибаемых железобетонных элементов на основе итерационных методов расчета // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 1. С. 73–76. <http://doi.org/10.12737/23294>.
6. Щуцкий В.Л., Дедух Д.А., Гриценко М.Ю. Исследование физико-механических свойств центрифугированного бетона [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2-2. С. 24. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_81\\_Shucki.pdf\\_4abcf9232c.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81_Shucki.pdf_4abcf9232c.pdf) (02.08.2021).
7. Kim J-J., Yoo D-Y. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 103. p. 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006>.
8. Li K., Li L. Crack-altered durability properties and performance of structural concretes // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 124. p. 105811. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105811>.
9. Kirthika S.K., Singh S.K. Durability studies on recycled fine aggregate concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 250. p. 118850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118850>.
10. Jurowski K., Grzeszczyk S. Influence of Selected Factors on the Relationship between the Dynamic Elastic Modulus and Compressive Strength of Concrete // *Materials*. 2018. Vol. 11. p. 477. <https://doi.org/10.3390/ma11040477>.
11. Nesvetaev G., Lesniak E., Kolleganov A., Kolleganov N. On the Influence of Cross-Section and Reinforcement of Reinforced Concrete Constructions on the Concentration of Coarse Aggregate in Concrete with Frame Structure // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1011. P. 66–71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1011.66>.
12. Khalaf M.A., Ban C.C., Ramli M. The constituents, properties and application of heavy-weight concrete: A review // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. P. 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.146>.
13. Maruyama I., Lura P. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123. 105770. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.015>.
14. Королев А.С., Ворошилин А.А., Трофимов Б.Я. Повышение прочностных и теплоизоляционных свойств ячеистого бетона путем направленного формирования вариатропной структуры // *Строительные материалы*. 2005. № 5. С. 8–9.
15. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодник М.Г., Халюшев А.К., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Рекомендации по учету вариатропии при расчете, проектировании и изготовлении центрифугированных конструкций из тяжелого бетона [Электронный ресурс] // *Вестник евразийской науки*. 2018. Т. 10. № 4. С. 6. URL: <https://esj.today/PDF/07SAVN418.pdf> (03.08.2021).
16. Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Shuyskiy A.I., Nazhnev M.P. Theoretical and practical aspects of the formation of the variational structure of centrifuged products from heavy concrete // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931. p. 502–507. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.502>.
17. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Khalyushev A.K., Smolyanichenko A.S., Sysoev A.K., et al. Investigation of integral and differential characteristics of variatropic structure heavy concretes by ultrasonic methods // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. № 8. p. 3591. <https://doi.org/10.3390/app11083591>.
18. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Nazhnev M.P. Setting a diagram approach to calculating Vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged reinforced concrete columns with a variatropic structure // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021. № 1 (49). p. 30–44. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.49.1.003>.

## REFERENCES

1. Bazhenov YuM. Modern concrete technology. *Tekhnologii betonov = Concrete technology*. 2005;1:6-8. (In Russ.).
2. Suleimanova LA. High-quality energy-saving and competitive building materials, products and constructions. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017;1:9-16. (In Russ.). <http://doi.org/10.12737/22637>.
3. Obernihin DV, Nikulin AI. The experimental researches of the deformability of the bending reinforced concrete elements with the various cross sections. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017;4:56-59. (In Russ.). [http://doi.org/10.12737/article\\_58e61337b86486.82545138](http://doi.org/10.12737/article_58e61337b86486.82545138).
4. Radaikin OV. Comparative analysis of various diagrams of concrete deformation according to the criterion of energy consumption for deformation and destruction. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019;10:29-39. (In Russ.). [http://doi.org/10.34031/article\\_5db33945315bb4.76965991](http://doi.org/10.34031/article_5db33945315bb4.76965991).
5. Kryuchkov AA, Zhdanov AE. Approach to an estimation deformability of bending concrete elements based on iterative calculation method. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017;1:73-76. (In Russ.). <http://doi.org/10.12737/23294>.
6. Shhuckij VL, Gritcentko MYu, Dedukh DA. Investigation of physical and mechanical properties of spun concrete. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2015;2:24. (In Russ.). Available from: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_81\\_Shucki.pdf\\_4abcf9232c.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81_Shucki.pdf_4abcf9232c.pdf) [Accessed 02<sup>nd</sup> August 2021].
7. Kim J-J, Yoo D-Y. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2019;103:213-223. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.006>.
8. Li K, Li L. Crack-altered durability properties and performance of structural concretes. *Cement and Concrete Research*. 2019;124:105811. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105811>.
9. Kirthika SK, Singh SK. Durability studies on recycled fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2020;250:118850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118850>.
10. Jurowski K, Grzeszczyk S. Influence of Selected Factors on the Relationship between the Dynamic Elastic Modulus and Compressive Strength of Concrete. *Materials*. 2018;11:477. <https://doi.org/10.3390/ma11040477>.
11. Nesvetaev G, Lesniak E, Kolleganov A, Kolleganov N. On the Influence of Cross-Section and Reinforcement of Reinforced Concrete Constructions on the Concentration of Coarse Aggregate in Concrete with Frame Structure. *Materials Science Forum*. 2020;1011:66-71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1011.66>.
12. Khalaf MA, Ban CC, Ramli M. The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. p. 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.146>.
13. Maruyama I, Lura P. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. *Cement and Concrete Research*. 2019;123:105770. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.015>.
14. Korolev AS, Voroshilin AA, Trofimov BYa. Increasing the strength and thermal insulation properties of aerated concrete by the directional formation of a variatropic structure. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials*. 2005;5:8-9. (In Russ.).
15. Mailyan LR, Stel'makh SA, Kholodnyak MG, Khalyushev AK, Shcherban' EM, Nazhnev MP. Recommendations on accounting variatropy the calculation, design and manufacture of centrifuged structures of heavy concrete. *Vestnik evrazijskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2018;10(4):6. (In Russ.). Available from: <https://esj.today/PDF/07SAVN418.pdf> [Accessed 03<sup>rd</sup> August 2021].
16. Stel'makh SA, Shcherban EM, Shuyskiy AI, Nazhnev MP. Theoretical and practical aspects of the formation of the variational structure of centrifuged products from heavy concrete. *Materials Science Forum*. 2018;931:502-507. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.502>.
17. 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>.
18. Mailyan LR, Stel'makh SA, Shcherban EM, Nazhnev MP. Setting a diagram approach to

calculating Vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged reinforced concrete columns with a variotropic structure. *Russian Journal of Building*

*Construction and Architecture*. 2021;1(49):30-44. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.49.1.003>.

**Сведения об авторах**

**Information about the authors**

**Черных Дмитрий Сергеевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры автомобильных дорог,  
Донской государственной технической  
университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: d.s.chernykh@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0503-7761>

**Dmitrii S. Chernykh,**

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor  
of the Department of Roads,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: d.s.chernykh@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0503-7761>

**Строев Дмитрий Александрович,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры автомобильных дорог,  
Донской государственной технической  
университет,  
344022, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Социалистическая, 162, Россия,  
e-mail: mr.stroev@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0557-9416>

**Dmitrii A. Stroev,**

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor  
of the Department of Roads,  
Don State Technical University,  
162 Sotsialisticheskaya St., Rostov-on-Don,  
344022, Russia,  
e-mail: mr.stroev@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0557-9416>

**Чернильник Андрей Александрович,**

аспирант,  
Ростовский государственный университет  
путей сообщения,  
344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского  
Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,  
Россия,  
e-mail: chernila\_a@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0103-2587>

**Andrei A. Chernil'nik,**

Graduate student,  
Rostov State Transport University,  
2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo  
Opolcheniya Sq., Rostov-on-Don, 344038,  
Russia,  
e-mail: chernila\_a@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0103-2587>

**Ельшаева Диана Михайловна,**

магистрант,  
Донской государственной технической  
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 государственной технической  
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>

#### **Заявленный вклад авторов**

Черных Д. С., Строев Д. А., Чернильник А. А.,  
Ельшаева Д. М., Жеребцов Ю. В., Доцен-  
ко Н. А. имеют равные авторские права.  
Жеребцов Ю. В. несет ответственность за  
плагиат.

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

Chernykh D. S., Stroeve D. A., Chernil'nik A. A.,  
El'shaeva D. M., Zherebtsov Yu. V., Dotsen-  
ko N. A. have equal author's rights.  
Zherebtsov Yu. V. bears the responsibility for  
plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта ин-  
тересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests re-  
garding the publication of this article.

Статья поступила в редакцию 04.06.2021.  
Одобрена после рецензирования 01.07.2021.  
Принята к публикации 06.07.2021.

The article was submitted 04.06.2021  
Approved after reviewing 01.07.2021.  
Accepted for publication 06.07.2021.