

В.Н. СТРОЦКИЙ✉, В.И. САВИН, В.В. ПОЛЕТАЕВ

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»,  
2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

## ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕГКОГО БЕТОНА НА ГРАНУЛИРОВАННОЙ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКЕ

### Аннотация

**Введение.** За последние 20–30 лет разработана широкая номенклатура эффективных пористых заполнителей с повышенным содержанием стеклофазы различных видов и на их основе низкотеплопроводных легких бетонов различных структур.

В АО «НИЦ «Строительство» за последние годы разработана новая высокоэффективная одностадийная технология по производству пористой гранулированной пеностеклокерамики (ПСКГ). Она основана на получении сырьевых гранул путем смешивания и гранулирования высокопористого порошка опал-кристобалитовой породы с натрийсодержащим раствором. Это обеспечивает максимальную площадь межфазной границы, максимально равномерное распределение всех компонентов на микроуровне и, как следствие, обеспечивает стеклообразование при температуре, не выходящей за интервал вспенивания готовой стеклофазы.

**Целью** исследования является изучение проблематики особенностей прочностных характеристик легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике (ПСКГ).

**Материалы и методы.** Прочность кубов из легкого бетона на ПСКГ при сжатии ( $R$ ) определяли на образцах размером  $10 \times 10 \times 10$  см и  $7 \times 7 \times 7$  см по ГОСТ 10180-2012 с оценкой прочности по ГОСТ 18105-2018.

Коэффициент призмной прочности ( $K_{\text{пр}}$ ) определяли по результатам испытаний на сжатие образцов-призм размерами  $10 \times 10 \times 40$  см и  $7 \times 7 \times 28$  см и изготовленных из одного замеса образцов-кубов размерами  $10 \times 10 \times 10$  см и  $7 \times 7 \times 7$  см.

Прочность на растяжение при изгибе ( $R_{\text{из}}$ ) и раскалывании ( $R_{\text{н}}$ ) определяли соответственно на образцах-призмах размером  $10 \times 10 \times 40$  см и образцах кубах размером  $10 \times 10 \times 10$  см по ГОСТ 10180-2012 с оценкой значений прочности по ГОСТ 18105-2018. Прочность на осевое растяжение ( $R_{\text{ос}}$ ) и раскалывание ( $R_{\text{н}}$ ) определяли соответственно на образцах-

призмах размером  $7 \times 7 \times 28$  см по ГОСТ 10180-2012. Прочность призм ( $R_{\text{пр}}$ ) определяли на образцах призмах  $10 \times 10 \times 40$  см по ГОСТ 24452-80.

**Результаты.** В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований основных прочностных свойств теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов на пеностеклокерамике гранулированной (ПСКГ) плотностью от 500 до 800 кг/м<sup>3</sup>, а также конструкционных легких бетонов плотностью до 1700 кг/м<sup>3</sup> оптимальных составов (призмной прочности на сжатие, коэффициента призмной прочности, прочности при осевом растяжении, прочности на растяжении при изгибе и раскалывании).

Проанализированы различные зависимости по оценке полученных экспериментальных данных и даны рекомендации по внесению в нормативные документы, в частности, в СП 351.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из легких бетонов. Правила проектирования».

**Выводы.** Получены опытные данные по более высокому коэффициенту призмной прочности для легкого бетона на ПСКГ, которые в перспективе могут быть основанием для увеличения нормативных расчетных сопротивлений прочности при осевом сжатии для такого вида легкого бетона.

Значения и формулы для определения призмной прочности и коэффициента призмной прочности легкого бетона испытанных составов на ПСКГ могут быть использованы при расчете и проектировании крупноформатных панелей стен нового типа.

Получены опытные и расчетные данные по прочности на растяжение испытанных составов легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ, которые могут быть учтены при корректировке нормативных документов.

При применении легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ для повышения усадочной трещиностойкости такого бетона для ограждающих конструкций целесообразно использовать дисперсное арми-

рование полимерной фиброй, повышающей также теплозащитные свойства таких конструкций.

**Ключевые слова:** легкий бетон, пеностеклокерамика гранулированная (ПСКГ), начальный модуль упругости, прочность на сжатие, призмочная прочность, предельные деформации при сжатии, прочность при осевом растяжении, прочность на растяжение при изгибе, прочность на растяжение при раскалывании

**Для цитирования:** Строчки В.Н., Савин В.И., Полетаев В.В. Прочностные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике // *Бетон и железобетон*. 2023. № 2 (616). С. 14–30. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2\(616\)-14-30](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2(616)-14-30)

#### Вклад авторов

Строчки В.Н. – проведение испытаний, написание статьи, анализ опытных данных, приведенных в статье. Савин В.И. – изготовление опытных образцов, анализ опытных данных, приведенных в статье. Полетаев В.В. – редакционная правка статьи.

#### Финансирование

Финансирование исследований осуществлялось на основании хозяйственного договора № 217/2021 от 24.05.2021 г. по теме: «Исследование физико-механических, деформативных и теплофизических свойств легких бетонов с низкой теплопроводностью и плотностью менее 800 кг/м<sup>3</sup> на гранулированной пеностеклокерамике для несущих и ограждающих конструкций нового типа».

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.02.2023

Поступила после рецензирования 01.03.2023

Принята к публикации 09.03.2023

V.N. STROTSKY✉, V.I. SAVIN, V.V. POLETAEV

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

## STRENGTH CHARACTERISTICS OF LIGHTWEIGHT CONCRETE BASED ON GRANULAR FOAM GLASS CERAMICS

#### Abstract

*Introduction.* Over the past 20–30 years, a wide range of effective porous aggregates with a high content of glass phase of various types and low-heat-conducting lightweight concretes of various structures based on them has been developed.

In recent years, JSC Research Center of Construction has developed a new highly efficient single-stage technology for the production of porous granular foam glass ceramics (UCS). It is based on the production of raw granules by mixing and granulating a highly porous powder of opal-cristobalite rock with a sodium-containing solution. This ensures the maximum area of the interfacial boundary, the most uniform distribution of all components at the micro level and, as a result, ensures glass formation at a temperature that does not exceed the foaming interval of the finished glass phase.

*The aim* of the publication is to study the problems of the features of the strength characteristics of lightweight concrete on granular foam glass ceramics.

*Materials and methods.* The strength of cubes made of light concrete on the UCS under compression ( $R$ ) was determined on samples with a size of 10 × 10 × 10 cm and 7 × 7 × 7 cm according to State Standard 10180-2012 with an assessment of strength according to State Standard 18105-2018.

The prismatic strength coefficient ( $K_{pp}$ ) was determined by the results of compression tests of samples-prisms with dimensions of 10 × 10 × 40 cm and 7 × 7 × 28 cm and samples made from the same batch-cubes with dimensions of 10 × 10 × 10 cm and 7 × 7 × 7 cm.

Bending tensile strength ( $R_{bt}$ ) (Figure 2) and splitting strength ( $R_{sp}$ ) were determined, respectively, on 10 × 10 × 40 cm prism samples and 10 × 10 × 10 cm cube samples according to

State Standard 10180-2012 with an assessment of strength values according to State Standard 18105-2018. Axial tensile strength ( $R_{tb}$ ) and splitting strength ( $R_{ts}$ ) were determined, respectively, on prism samples measuring  $7 \times 7 \times 28$  cm according to State Standard 10180-2012. The strength of the prisms (prismatic strength,  $R_b$ ) was determined on samples of prisms  $10 \times 10 \times 40$  cm according to State Standard 24452-80.

**Results.** The article presents the results of experimental and theoretical studies of the basic strength properties of thermal insulation and structural-thermal insulation lightweight concrete on granulated foam ceramic (UCS) with a density of 500 to 800 kg/m<sup>3</sup>, as well as structural lightweight concrete with a density of up to 1700 kg/m<sup>3</sup> of optimal compositions (prismatic compressive strength, prismatic strength coefficient, axial tensile strength, tensile strength during bending and splitting).

Various dependencies on the evaluation of the experimental data obtained are analyzed and recommendations are given for inclusion in regulatory documents, in particular, in SP 351.1325800.2017 "Concrete and reinforced concrete structures made of light concrete. Design rules".

**Conclusions.** Experimental data have been obtained on a higher prismatic strength coefficient for lightweight concrete at the UCS, which in the future may be the basis for increasing the standard design strength resistance under axial compression for this type of lightweight concrete.

The values and formulas for determining the prismatic strength and the prismatic strength coefficient of light concrete of the tested compositions at the UCS can be used in the calculation and design of large-format wall panels of a new type.

Experimental and calculated data on the tensile strength of the tested compositions of lightweight concrete of a porous structure at the UCS have been obtained, which can be taken into account when adjusting regulatory documents.

When using lightweight concrete of a porous structure on the UCS to increase the shrinkage crack resistance of such concrete for enclosing structures, it is advisable to use dispersed reinforcement with polymer fiber, which also increases the heat-protective properties of such structures. The article presents the results of studies of

the main strength properties of thermal insulation and structural-thermal insulation lightweight concretes on the UCS with a density of 500 to 800 kg/m<sup>3</sup>, as well as structural lightweight concretes with a density of up to 1700 kg/m<sup>3</sup> of optimal compositions.

Various dependencies on the evaluation of the experimental data obtained are analyzed and recommendations are given for inclusion in regulatory documents, in particular, in SP 351.1325800.2017 "Concrete and reinforced concrete structures made of light concrete. Design rules".

**Keywords:** lightweight concrete, granulated foam glass ceramics (UCS), initial modulus of elasticity, compressive strength, prismatic strength, ultimate compression deformation, axial tensile strength, bending tensile strength, splitting tensile strength

**For citation:** Strotsky V.N., Savin V.I., Poletaev V.V. Strength characteristics of lightweight concrete based on granular foam glass ceramics. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, no. 2 (616), pp. 14–30. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2\(616\)-14-30](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-2(616)-14-30)

#### Author contribution statements

Strotsky V.N. – conducting tests, writing an article, analyzing the experimental data given in the article.

Savin V.I. – production of prototypes, analysis of experimental data given in the article.

Poletaev V.V. – editorial revision of the article.

#### Funding

Research funding was carried out on the basis of the contract No. 217/2021 dated 24.05.2021 on the topic: "Investigation of physics-mechanical, deformative and thermophysical properties of lightweight concretes with low thermal conductivity and a density of less than 800 kg/m<sup>3</sup> on granular foam glass ceramics for load-bearing and enclosing structures of a new type".

#### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Received 07.02.2023

Revised 01.03.2023

Accepted 09.03.2023

Целью исследования является изучение проблематики особенностей прочностных характеристик легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике (ПСКГ). В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований призмной прочности на сжатие, коэффициента призмной прочности, прочности при осевом растяжении, прочности на растяжение при изгибе и раскалывании. Исследования проводились на основании договора № 217/2021 от 24.05.2021 г. по теме: «Исследование физико-механических, деформативных и теплофизических свойств легких бетонов с низкой теплопроводностью и плотностью менее 800 кг/м³ на гранулированной пеностеклокерамике для несущих и ограждающих конструкций нового типа».

### 1. Призмная прочность при сжатии, коэффициент призмной прочности

Прочность призм (призмную прочность  $R_b$ ) и коэффициент призмной прочности ( $K_{np}$ ) определяли по результатам испытаний на сжатие образцов-

призм размерами 10 × 10 × 40 см и 7 × 7 × 28 см по [1], а также изготовленных из одного замеса образцов-кубов размерами 10 × 10 × 10 см и 7 × 7 × 7 см, испытанных по [2].

Результаты испытания призм на сжатие приведены в табл. 1.1.

В [3] для определения предела призмной прочности в зависимости от кубиковой прочности бетона на стекловидных пористых заполнителях приведена следующая формула

$$R_b = 0,9523 \cdot R - 0,4343. \quad (1.1)$$

В [4] основную прочностную характеристику бетона (призмную прочность  $R_b$ ) предложено определять по формуле

$$R_b = 0,555 \cdot R + 0,3901. \quad (1.2)$$

В табл. 1.2 приведено сравнение расчетных значений, вычисленных по формулам (1.1) и (1.2), с опытными данными.

Таблица 1.1  
Table 1.1

Средние значения призмной прочности  $R_b$  и коэффициента призмной прочности  $K_{np}$   
Average values of the prismatic strength  $R_b$  and the prismatic strength coefficient  $K_{np}$

№ призм	Средняя плотность, кг/м³	Призмная прочность на сжатие, $R_b$ , МПа	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Коэффициент призмной прочности, $K_{np}$
ПК-1	551	1,311	1,6	0,82
ПК-2	572	2,245	2,4	0,935
ПК-4	618	2,93	3,8	0,77
ПК-5	595	2,33	2,675	0,87
ПК-6	690	3,20	4,8	0,67
ПК-8	756	3,83	4,4	0,87
ПК-9	742	3,08	3,65	0,84
ПК-10	794	4,25	5,67	0,75
ПК-12	795	4,425	5,53	0,80
ПК-14	755	3,6	4,57	0,788
ПК-17-2	744	2,25	3,70	–
ПК-17-3	744	2,43	3,70	0,66
ПК-18-1	603	1,20	1,27	0,945
ПК-18-2	651	1,71	1,40	–
ПК-18-3	628	1,26	1,27	0,99
ПК-19-2	602	1,40	1,40	1,0
ПК-19-3*	606	1,001	1,11	0,902
ПК-19-3	587	1,38	1,4	0,986
ПК-16	1596	15,5	16,40	0,945
ПК-16*	1708	16,8	16,50	1,02

Примечание: 1. Приведенные в табл. 1.1 данные по кубиковой прочности принимались с учетом результатов испытаний кубов размерами 7 × 7 × 7 см.

2. Указанные в табл. 1.1 призм ПК-16 (ПК-16-2, ПК-16-5, ПК-16-6) и ПК-16\* (ПК-16-8, ПК-16-4, ПК-16-X) изготовлены из легкого бетона плотной структуры на кварцевом песке.

Таблица 1.2  
Table 1.2Опытные и расчетные значения призмной прочности  
Experimental and calculated values of prismatic strength

№ призм	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Призмная прочность на сжатие, $R_b$ , МПа, (опыт)	Призмная прочность на сжатие, $R_{b, \text{расч}}$ , МПа, (расчет по ф-ле (1.1))	Призмная прочность на сжатие, $R_{b, \text{расч}}$ , МПа, (расчет по ф-ле (1.2))
ПК-1	551	1,6	1,311	1,09 (83%)	<b>1,28 (97,6%)</b>
ПК-2	572	2,4	2,245	1,85 (82,4%)	1,72 (76,6%)
ПК-4	618	3,8	2,93	3,18 (108,5%)	2,5 (85,3%)
ПК-5	595	2,675	2,33	2,113 (90,7%)	1,875 (80,5%)
ПК-6	690	4,8	3,20	4,14 (129,4%)	<b>3,05 (95,3%)</b>
ПК-8	756	4,4	3,83	3,76 (98,2%)	2,83 (73,9%)
ПК-9	742	3,65	3,08	3,04 (98,7%)	2,42 (78,6%)
ПК-10	794	5,67	4,25	4,965 (116,8%)	3,54 (83,3%)
ПК-12	795	5,53	4,425	4,83 (109,2%)	3,46 (78,2%)
ПК-14	755	4,57	3,6	3,92 (109%)	2,93 (81,4%)
ПК-17-2	744	3,70	2,25	3,09 (137,3%)	<b>2,44 (108,4%)</b>
ПК-17-3	744	3,70	2,43	3,09 (127,2%)	<b>2,44 (100,4%)</b>
ПК-18-1	603	1,27	1,20	0,775 (64,6%)	<b>1,095 (91,25%)</b>
ПК-18-2	651	1,40	1,71	0,9 (52,6%)	1,17 (68,4%)
ПК-18-3	628	1,27	1,26	0,775 (61,5%)	1,095 (86,9%)
ПК-19-2	602	1,40	1,40	0,9 (64,3%)	1,17 (83,6%)
ПК-19-3*	606	1,11	1,001	0,623 (62,2%)	1,01 (100,9%)
ПК-19-3	587	1,4	1,38	0,9 (65,2%)	1,17 (84,8%)
ПК-16	1596	16,40	15,5	15,18 (98%)	9,49 (61,2%)
ПК-16*	1708	16,50	16,8	15,28 (91%)	9,55 (56,8%)

Примечание: 1. Приведенные в табл. 1.2 данные по кубиковой прочности принимались с учетом результатов испытаний кубов размерами  $7 \times 7 \times 7$  см.

2. Указанные в табл. 1.2 призм ПК-16 (ПК-16-2, ПК-16-5, ПК-16-6) и ПК-16\* (ПК-16-8, ПК-16-4, ПК-16-X) изготовлены из легкого бетона плотной структуры на кварцевом песке.

Как показывают данные табл. 1.2, расчетные значения призмной прочности, вычисленные по формуле (1.1), коррелируют с опытными значениями при значениях кубиковой прочности  $R > 1,4$  МПа. Формула (1.2) дает хорошую сходимость только в отдельных случаях (выделенных жирным шрифтом), а также лучшую сходимость по сравнению с формулой (1.1) при малых значениях прочности  $R < 1,4$  МПа.

На рис. 1.1 по данным табл. 1.2 (с учетом значений, вычисленных по формуле (1.1)) построен график зависимости призмной прочности  $R_b$  от кубиковой прочности  $R$ .

На графике показана также линия аппроксимации опытных значений  $R_b$  с хорошей достоверностью  $R^2 = 0,9899$ , описывающая более уточненную по сравнению с формулой (1.1) зависимость

$$R_b = 1,0383 \cdot R - 0,9978, \quad (1.3)$$

которую можно использовать при практических расчетах.

Статистическая обработка данных табл. 1.2 для образцов ПК-18-1–ПК-19-3 с прочностью 1,4 МПа и менее позволила предложить формулу для определения призмной прочности легкого бетона на ПСКГ для  $R \leq 1,4$  МПа. Данная зависимость имеет вид степенной функции

$$R_b = 0,2134e^{1,3855R}. \quad (1.4)$$

По результатам проведенных испытаний коэффициент призмной прочности  $K_{\text{пр}}$  для испытанных составов ПСКГ (ПК-2–ПК-19) поризованной структуры отличается большим разбросом, значения  $K_{\text{пр}}$  находятся в широком диапазоне от 0,66 до 1,0 (табл. 1.1) при среднем значении  $K_{\text{пр}} = 0,85$ , что, на наш взгляд, связано с неоднородностью заполнителя.

Значения коэффициента призмной прочности для легкого бетона плотной структуры на кварцевом песке по данным испытаний отличаются несколько меньшим разбросом и расположены в области от 0,945 до 1,02 при средней величине 0,98.



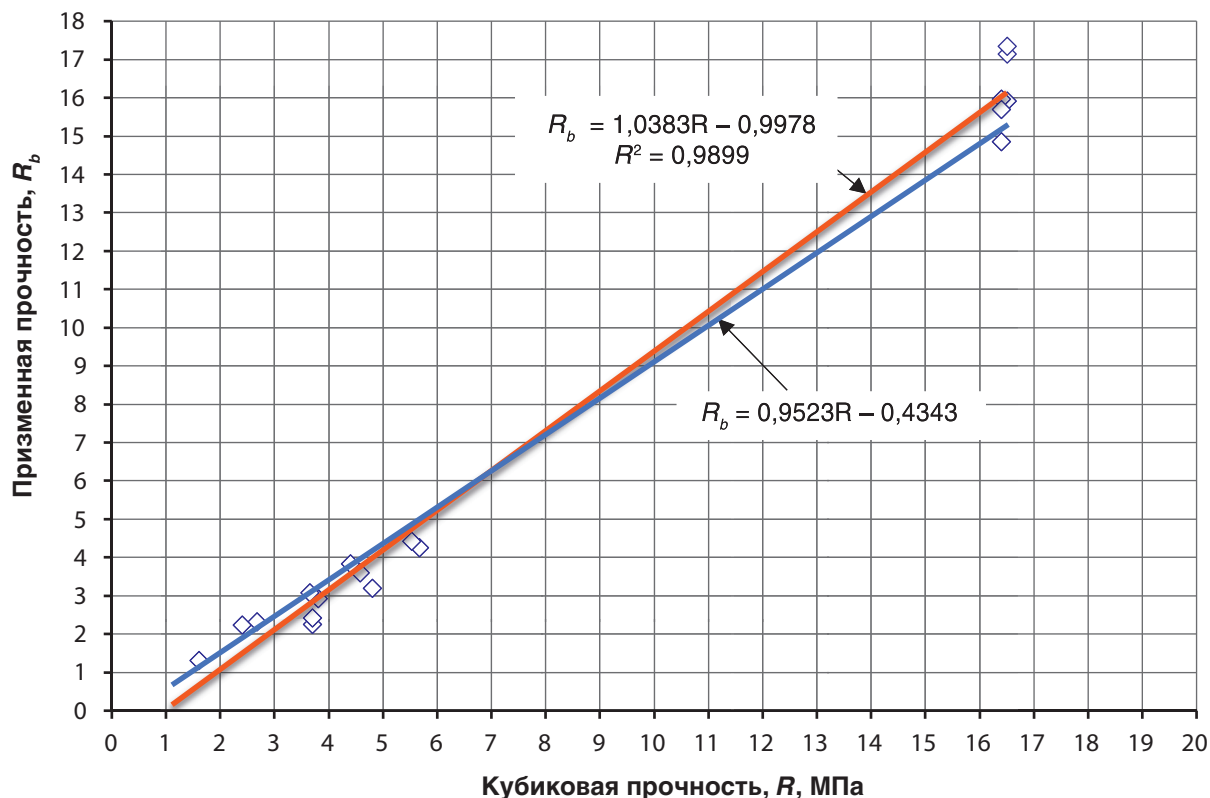


Рис. 1.1. Зависимость призменной  $R_b$  прочности от кубиковой прочности  $R$   
 Fig. 1.1. Dependence of prismatic strength  $R_b$  on cubic strength  $R$

Нормируемый коэффициент призменной прочности легкого бетона, с учетом изменчивости, определяется по формуле

$$K_{nn} = 0,77 - 0,001 \cdot R \geq 0,72, \quad (1.5)$$

где  $R$  – средняя кубиковая прочность, МПа.

Сопоставление опытных значений  $K_{nn}$  с расчетными приведено на графике, показанном на рис. 1.2 и 1.2а.

На графиках (рис. 1.2 и 1.2а) видно, что для поризованного бетона на ПСКГ при кубиковой прочности  $R < 3,5$  МПа и для бетона плотной структуры на кварцевом песке при  $R > 15$  МПа опытные значения  $K_{nn}$  в целом превышают вычисленные по формуле (1.5).

По данным Г.А. Бужевича [6] и Т.А. Кузмич [7], значение опытного коэффициента  $K_{nn}$  для легкого бетона получается больше, чем по формуле (1.5). Статистическая обработка опытных данных (в количестве 164) по значению коэффициента призменной прочности керамзитобетона на пористом песке при прочности от 2,5 до 12,5 МПа выявила тенденцию увеличения этого коэффициента до 0,83 при прочности бетона менее 5 МПа.

Коэффициент призменной прочности дацизитобетона (вулканического стекла) плотной структуры, по данным [8], составил 0,82–0,87; для бетонов поризо-

ванной структуры, в частности для дацизитогазобетона, коэффициент  $K_{nn}$  был в пределах 0,84–0,88, а для дацизитопенобетона  $K_{nn} = 0,78$ –0,87. То есть для дацизитобетонов классов по прочности от В2,5 до В10 значения коэффициента призменной прочности также превышали определяемые по формуле (1.5).

Математический анализ показал, что для значений призменной прочности  $K_{nn}$  в качестве функциональной зависимости лучше подходит полиномиальная функция, чем линейная, которая может быть записана в следующем виде

$$K_{nn} = 0,0051 R^2 - 0,0876 R + 1,0563. \quad (1.6)$$

Полученные опытные данные и формула (1.6) по коэффициенту призменной прочности для легкого бетона на ПСКГ могут быть в дальнейшем основанием для увеличения нормативных расчетных сопротивлений прочности при осевом сжатии для такого вида легкого бетона. На данный же момент времени, до накопления большего количества экспериментальных данных, можно сделать вывод о возможности применения [5] для нормирования призменной прочности  $R_b$ , коэффициента призменной прочности  $K_{nn}$  и, соответственно, нормативных и расчетных сопротивлений для легкого бетона на ПСКГ.

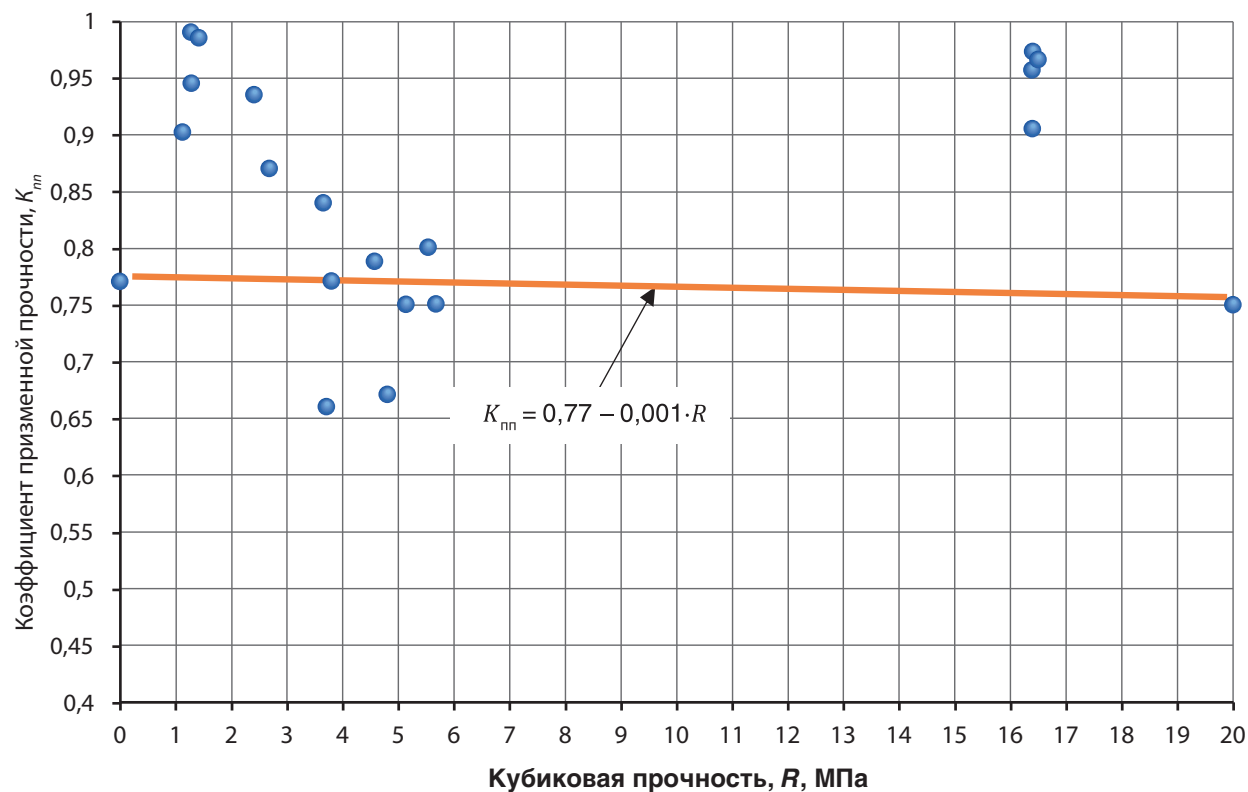


Рис. 1.2. График зависимости коэффициента призмочной прочности  $K_{nn}$  от кубиковой прочности  $R$

Fig. 1.2. Graph of the dependence of the prismatic strength coefficient  $K_{pp}$  on the cubic strength  $R$

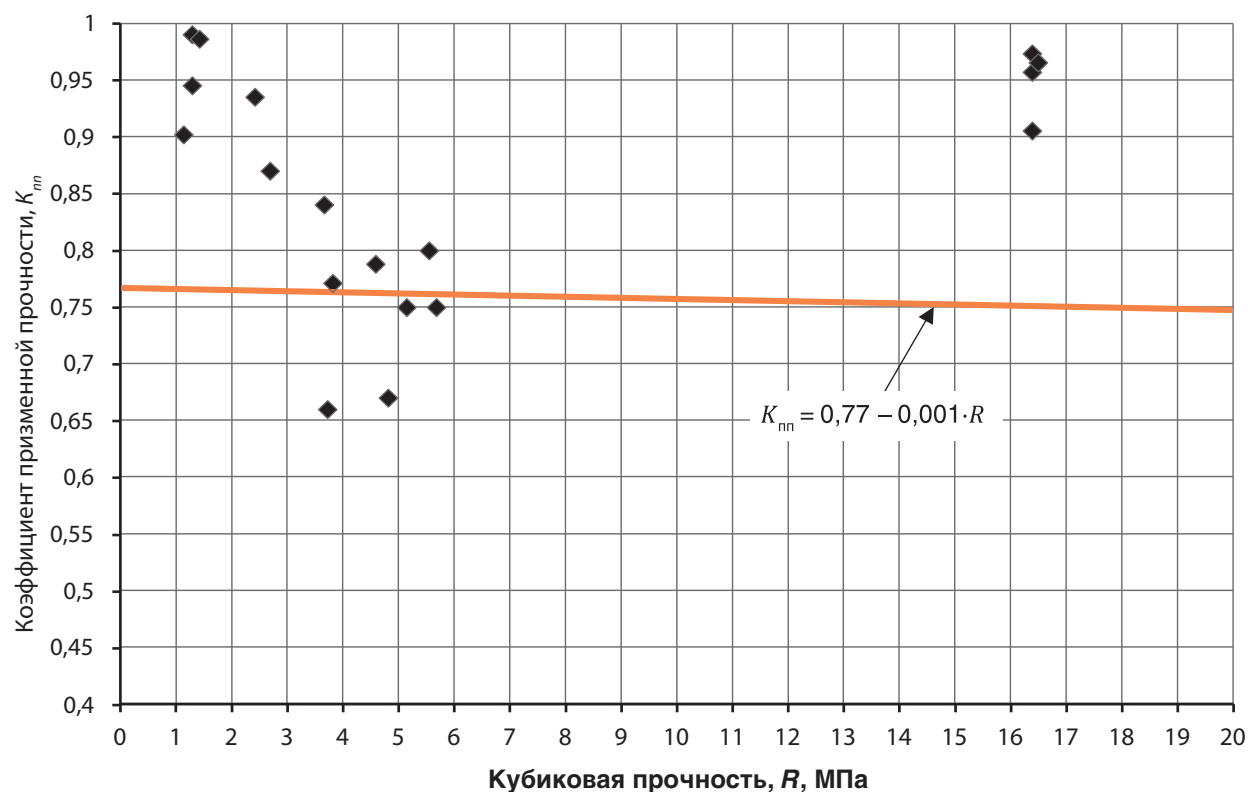


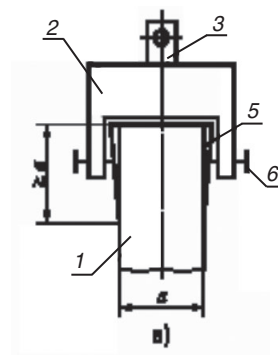
Рис. 1.2a. График зависимости коэффициента призмочной прочности  $K_{nn}$  от кубиковой прочности  $R$

Fig. 1.2a. Graph of the dependence of the prismatic strength coefficient  $K_{pp}$  on the cubic strength  $R$

## 2. Прочность на растяжение при осевом действии нагрузки, при изгибе, при раскалывании

Прочность на осевое растяжение ( $R_t$ ) определяли на образцах-призмах размером  $7 \times 7 \times 28$  см по [2] (рис. 2.1а, 2.1б).

Результаты испытания призм на осевое растяжение приведены в табл. 2.1.



**Рис. 2.1а.** Схемы зажимных захватов по [2]  
1 – образец; 2 – захват;  
3 – концевой элемент шарнира Гука; 4 – ось; 5 – цапга;  
6 – стягивающие винты  
**Fig. 2.1a.** Schemes of clamping grips according to [2]  
1 – sample; 2 – gripper;  
3 – end element of the Hook hinge;  
4 – axis; 5 – collet;  
6 – tightening screws



**Рис. 2.1б.** Общий вид при испытании на осевое растяжение образцов-призм размерами  $7 \times 7 \times 28$  см  
**Fig. 2.1b.** General view when testing for axial tension of a  $7 \times 7 \times 28$  cm prism samples

В соответствии с табл. 2.2 коэффициент перехода от прочности на сжатие  $R$  к прочности на осевое растяжение  $R_t$  составляет для поризованных бетонов 0,075–0,084, а для бетонов плотной структуры (ПК-16) этот коэффициент меньше и равен 0,05.

В соответствии с табл. Л.1 [2] коэффициент перехода от прочности на сжатие  $R$  к прочности на осевое растяжение  $R_t$  для тяжелых бетонов составляет 0,07.

По данным Г.А. Бужевича [6], отношение прочности легкого бетона при осевом растяжении к прочности при сжатии ( $R_t/R$ ) для бетонов низких классов (до В7,5) колеблется в интервале 0,12–0,17, а для более высоких классов по прочности этот коэффициент меньше и находится в диапазоне от 0,06 до 0,1.

На графике (рис. 2.2) приведены опытные значения прочности при осевом растяжении и зависимость  $R_t$  от кубиковой прочности на сжатие  $R$ , а также линия аппроксимации.

На основании математической обработки опытных данных нами была получена зависимость прочности на осевое растяжение  $R_t$  от кубиковой прочности на сжатие  $R$ , которая может быть с большой долей достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9786$  описана следующей формулой

$$R_t = 0,0405 \cdot R + 0,1413. \quad (2.1)$$

По данным [8], прочность дацизитобетона (на заполнителе из вулканического стекла) поризованной структуры имеет большой разброс в показателях  $R_t$ , которые в ряде случаев до 20 % ниже нормируемых показателей для легких бетонов плотной структуры.

В табл. 2.2 приведены сравнительные значения  $R_t$  легких бетонов поризованной и плотной структуры на ПСКГ и дацизитобетона.

Таблица 2.1  
Table 2.1

### Результаты испытаний образцов-призм на осевое растяжение Results of tests of prism samples for axial tension

Маркировка	Масса, $m$ , г	Размеры, см	Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Разрушающая нагрузка, $P$ , кН	Прочность, $R_t$ , МПа	$R_{tm}$ , МПа	$R^*$ , МПа	$K = R_{tm}/R$
ПК-13-1	1139	$7 \times 7 \times 28$	830	1,99	0,345	0,355	4,8	0,074
ПК-13-2	1166		850	2,16	0,375			
ПК-13-3	1125		820	1,99	0,345			
ПК-15-1	1043		760	1,30	0,2255	0,264	3,30	0,08
ПК-15-2	1125		820	1,40	0,243			
ПК-15-3	1128		822	1,51	0,262			
ПК-15-4	1139		830	1,88	0,326			
ПК-16-2	1596		1665	4,40	0,763	0,81	16,50	0,05
ПК-16-3	1665		1717	4,67	0,810			
ПК-16-7	1708		1741	4,90	0,850			

\* по результатам испытаний кубов  $7 \times 7 \times 7$  см.



Таблица 2.2  
Table 2.2

Прочности на осевое растяжение легких бетонов на ПСКГ и дацизитобетона  
(на заполнителе из вулканического стекла)  
Axial tensile strength of light concrete on UCS and dacite concrete (on volcanic glass aggregate)

Вид легкого бетона	Маркировка	Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Прочность на осевое растяжение, $R_t$ , МПа	$K = R_t/R$
Поризованный легкий бетон на ПСКГ	ПК-13	830	4,8*	0,36	0,075
	ПК-15	800	3,30*	0,277	0,084
Дацизитобетон низкопрочный и поризованный	ДГ-12	900	3,7	0,23	0,062
	Д-12	900	4,1	0,31	0,076
	ДП-13	900	5,0	0,38	0,076
Легкий бетон плотной структуры на ПСКГ с кварцевым песком	ПК-16	1700	16,50	0,83	0,05
Дацизитобетон средней прочности	Д-15	1100	8,0	0,62	0,078
	Д-16	1200	10,8	0,88	0,081
	Д-17	1200	15,5	1,28	0,082
	ДГ-13	1000	6,3	0,58	0,092
	ДГ-14	1100	8,8	0,75	0,085
	ДП-14	1000	7,8	0,56	0,072

\* по результатам испытаний кубов  $7 \times 7 \times 7$  см.

Как следует из табл. 2.2, полученные значения  $R_t$  для легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ кубиковой прочностью  $R = 3,30\text{--}4,8$  МПа (по данным испытаний кубиков  $7 \times 7 \times 28$  см) несколько превышают соответствующие значения для дацизитобетона прочностью  $R = 3,7\text{--}4,1$  МПа и практически корреспондируются при прочностях  $R = 4,8$  МПа и  $R = 5,0$  МПа (для дацизитобетона), а также, в целом, близки к нормируемым по [5] величинам  $R_{bt,n}$  и  $R_{bt,ser}$  ( $R_{bt,n} = 0,25$  МПа,  $R_{bt,ser} = 0,35$  МПа соответственно для В2,5 и В3,5 по табл. 6.3 [5] для легкого бетона на пористом песке).

В то же время значения  $R_t = 0,83$  МПа для легкого бетона на ПСКГ плотной структуры прочностью

16,5 МПа в ~1,5 раза меньше соответствующего значения для дацизитобетона прочностью 15,5 МПа и меньше нормируемой (по табл. 6.3 [5]) величины  $R_{bt,n} = 1,1$  МПа для легкого бетона на пористом песке.

Прочность на растяжение при изгибе ( $R_{tb}$ ) (рис. 2.3) и раскалывании ( $R_{tt}$ ) (рис. 2.4) определяли соответственно на образцах-призмах размером  $10 \times 10 \times 40$  см и образцах-кубах размером  $10 \times 10 \times 10$  см по [2] с оценкой значений прочности по [9].

Показатели прочности легкого бетона на растяжение при раскалывании и при изгибе приведены соответственно в табл. 2.3, 2.3а, 2.4, 2.4а.



Рис. 2.3. Общий вид при испытании образца-призмы на растяжение при изгибе размерами  $10 \times 10 \times 40$  см

Fig. 2.3. General view when testing of a  $10 \times 10 \times 40$  cm prism sample for tensile bending



Рис. 2.4. Общий вид при испытании на раскалывание образца-куба размерами  $10 \times 10 \times 10$  см

Fig. 2.4. General view during the splitting test of a  $10 \times 10 \times 10$  cm cube sample

Таблица 2.3

Table 2.3

Результаты испытаний образцов-кубов  $10 \times 10 \times 10$  см и  $7 \times 7 \times 7$  см на растяжение при раскалывании  
Results of the  $10 \times 10 \times 10$  cm and  $7 \times 7 \times 7$  cm cube samples tensile cracking tests

Маркировка состава	Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Разрушающая нагрузка, $P$ , кН	Прочность, $R_{tt}$ , МПа	$R_{ttm}$ , МПа	$K_{tt} = R_{ttm}/R$
ПК-1	550	10,0	9,9	10,0	556	1,6	5,8	0,34	0,35	0,22
	548	10,0	10,0	10,0	548		6,2	0,36		
	550	10,0	10,0	10,0	550		5,5	0,32		
ПК-2	564	9,9	10,0	10,1	564	2,4	5,8	0,34	0,335	0,14
	558	10,0	10,0	10,0	558		4,46	0,26		
	574	10,1	10,0	10,0	568		5,7	0,33		
ПК-3	580	10,0	10,0	9,9	586	2,2	6,55	0,38	0,385	0,175
	578	10,0	10,1	10,0	572		6,77	0,39		
	558	10,1	10,0	10,0	552		6,06	0,35		
ПК-4	572	10,0	10,0	10,0	572	2,8	6,6	0,39	0,395	0,14
	572	10,0	10,0	10,0	572		6,6	0,39		
	580	10,0	10,0	10,0	580		6,9	0,40		
ПК-5	566	10,0	10,0	10,0	566	3,1	6,4	0,37	0,385	0,124
	570	10,0	10,0	10,0	570		6,5	0,38		
	572	10,0	10,0	10,0	572		6,6	0,39		
ПК-6	614	10,0	10,0	10,0	614	2,8	7,7	0,45	0,42	0,15
	604	10,0	10,0	10,0	604		6,7	0,39		
	600	10,0	10,0	10,0	600		6,5	0,38		
ПК-8	698	10,0	10,0	10,1	691	4,4	10,3	0,60	0,59	0,134
	683	10,0	10,0	10,0	683		9,9	0,58		
	682	10,1	10,0	10,0	675		8,7	0,50		
ПК-9	656	10,0	10,0	10,0	656	4,1	7,1	0,42	0,54	0,13
	684	10,0	10,0	10,0	684		8,8	0,52		
	740	10,0	10,0	10,0	740		9,5	0,56		
ПК-10	672	10,0	10,0	10,0	672	3,7	8,3	0,49	0,56	0,15
	748	10,0	9,9	10,0	756		10,7	0,63		
	642	10,1	10,0	10,0	636		8,2	0,48		
ПК-12	750	10,0	10,0	9,9	758	4,20	9,5	0,56	0,545	0,13
	718	10,0	10,0	10,0	718		9,1	0,53		
	730	10,1	10,0	10,0	723		7,6	0,44		
ПК-13	774	10,0	10,0	10,0	774	4,90	9,9	0,58	0,61	0,1245
	722	9,9	10,0	10,0	729		9,9	0,59		
	787	10,0	10,0	10,0	787		10,8	0,63		
ПК-13	290	7,0	7,0	7,0	845	4,80	6	0,68	0,77	0,16
	299	7,0	7,0	7,0	872		6,9	0,78		
	280	7,0	7,0	7,0	816		6,7	0,76		
ПК-14	761	10,0	10,0	10,0	761	4,57	9,6	0,56	0,61	0,1335
	765	10,0	10,0	10,1	757		11,2	0,66		
	782	10,0	10,0	10,0	782		8,3	0,49		
ПК-15	739	10,0	10,0	10,0	739	2,90	7,1	0,42	0,49	0,17
	740	10,0	10,0	10,0	740		9,6	0,56		
	732	10,0	10,0	10,0	732		6,9	0,40		

Продолжение таблицы 2.3

Table 2.3 continuation

Маркировка состава	Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Разрушающая нагрузка, $P$ , кН	Прочность, $R_{tt}$ , МПа	$R_{ttm}$ , МПа	$K_{tt} = R_{ttm}/R$
ПК-15	284	7,0	7,0	7,0	828	3,30	7	0,79	0,66	0,20
	278	7,0	7,0	7,0	810		4,6	0,52		
	281	7,0	7,0	7,0	819		4,5	0,51		
ПК-16	1628	10,0	10,0	10,0	1628	16,40	34,9	2,04	1,88	0,115
	1608	10,0	10,0	10,0	1608		33,1	1,94		
	1598	10,0	10,0	10,0	1598		30,0	1,76		
	1539	10,0	10,0	10,0	1539		30,7	1,80		
	1567	10,0	10,0	10,0	1567		28,1	1,65		
	1549	10,0	10,0	10,0	1549		27,8	1,63		
ПК-17	556	10,0	10,0	10,0	556	3,70	9,5	0,56	0,57	0,154
	574	10,0	10,0	10,0	574		9,8	0,57		
	556	10,0	10,0	10,0	556		9,1	0,53		
ПК-18	609	10,0	10,0	10,0	609	0,88	3,3	0,19	0,22	0,25
	622	10,0	10,0	10,0	622		3,6	0,21		
	619	10,0	10,0	10,0	619		3,8	0,22		
ПК-19	797	10,0	10,0	10,0	797	1,09	3	0,18	0,22	0,202
	764	10,0	10,0	10,0	764		4,4	0,26		
	777	10,0	10,0	10,0	777		2,8	0,16		

Таблица 2.3а

Table 2.3a

Результаты испытаний образцов-кубов  $10 \times 10 \times 10$  см и  $7 \times 7 \times 7$  см на растяжение при раскалывании, осевом растяжении и изгибе

Results of the  $10 \times 10 \times 10$  cm and  $7 \times 7 \times 7$  cm cube samples tensile cracking, axial stretching and bending tests

Маркировка состава	Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Прочность на растяжение при раскалывании, $R_{tt}$ , МПа	$R_{ttm}$ , МПа	Прочность на осевое растяжение, $R_{ttm}$ , МПа	$K_{tt} = R_{ttm}/R_{tm}$	Прочность на растяжение при изгибе, $R_{tbt}$ , МПа	$K_{tbt} = R_{tbt}/R_{tbtm}$
ПК-13	774	10,0	10,0	10,0	774	4,90	0,58	0,61	0,36	1,69	0,94	0,65
	722	9,9	10,0	10,0	729		0,59					
	787	10,0	10,0	10,0	787		0,63					
ПК-13	290	7,0	7,0	7,0	845	4,80	0,68	0,77	0,36	2,14	0,94	0,82
	299	7,0	7,0	7,0	872		0,78					
	280	7,0	7,0	7,0	816		0,76					
ПК-15	739	10,0	10,0	10,0	739	2,90	0,42	0,49	0,277	1,77	0,58	0,845
	740	10,0	10,0	10,0	740		0,56					
	732	10,0	10,0	10,0	732		0,40					
ПК-15	284	7,0	7,0	7,0	828	3,30	0,79	0,66	0,277	2,38	0,58	1,14
	278	7,0	7,0	7,0	810		0,52					
	281	7,0	7,0	7,0	819		0,51					
ПК-16	1628	10,0	10,0	10,0	1628	16,40	2,04	1,88	0,83	2,265	2,50	0,75
	1608	10,0	10,0	10,0	1608		1,94					
	1598	10,0	10,0	10,0	1598		1,76					
	1539	10,0	10,0	10,0	1539		1,80					
	1567	10,0	10,0	10,0	1567		1,65					
	1549	10,0	10,0	10,0	1549		1,63					

Таблица 2.4

Table 2.4

**Результаты испытаний образцов-призм  $10 \times 10 \times 40$  см на растяжение при изгибе**  
**Results of  $10 \times 10 \times 40$  cm prism samples bending tension tests**

Маркировка состава	Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Разрушающая нагрузка, $P$ , кН	Прочность, $R_{tb}$ , МПа	$R_{tbm}$ , МПа	$K_{tb} = R_{tbm}/R$
ПК-1	2364	9,9	10,1	40,0	591	1,6	1,50	0,41	0,45	0,28
	2314	9,9	10,1	40,0	579		1,52	0,42		
	2334	10,0	10,0	40,0	584		1,75	0,48		
ПК-3	2564	9,8	10,2	40,0	641	2,2	2,17	0,59	0,665	0,30
	2410	9,9	10,0	39,9	610		2,07	0,58		
	2430	9,9	10,1	39,9	609		2,72	0,74		
ПК-4	2299	10,0	10,0	40,0	575	2,8	1,43	0,395	0,395	0,14
ПК-5	2302	10,0	10,0	40,0	576	3,1	2,49	0,687	0,687	0,22
ПК-6	2434	10,0	10,0	40,0	609	2,8	2,88	0,79	0,79	0,28
ПК-9	2773	10,0	10,0	40,0	693	4,1	1,49	0,41	0,41	0,1
ПК-10	2796	10,0	10,0	40,0	699	3,7	1,56	0,43	0,43	0,116
ПК-12	2812	10,0	10,0	40,0	703	4,20	1,59	0,44	0,44	0,105
ПК-13	3271	10,0	10,0	40,0	818	4,90	3,5	0,97	0,94	0,19
	3315	10,0	10,0	40,0	829		3,3	0,91		
ПК-14	3075	10,0	10,0	40,0	769	4,57	2,4	0,66	0,66	0,144
ПК-15	3032	10,0	10,0	40,0	758	2,90	2,0	0,55	0,58	0,20
	3092	10,0	10,0	40,0	773		2,2	0,61		
ПК-16	6269	10,0	10,0	40,0	1567	16,40	8,69	2,40	2,50	0,152
	6246	10,0	10,0	40,0	1562		7,77	2,14		
	6491	10,0	10,0	40,0	1623		9,74	2,69		

Таблица 2.4а

Table 2.4a

**Результаты испытаний образцов-призм  $10 \times 10 \times 40$  см на растяжение при изгибе, раскалывании и осевом растяжении**  
**Results of  $10 \times 10 \times 40$  cm prism samples tensile bending, splitting and axial stretching tests**

Маркировка состава	Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Прочность на растяжение при изгибе, $R_{tb}$ , МПа	$R_{tbm}$ , МПа	Прочность на осевое растяжение, $R_{tm}$ , МПа	Прочность на растяжение при раскалывании, $R_{tltm}$ , МПа	$K_{tb} = R_{tbm}/R$
ПК-13	3271	10,0	10,0	40,0	818	4,90	0,97	0,94	0,36	0,61	2,6
	3315	10,0	10,0	40,0	829		0,91			0,77	
ПК-15	3032	10,0	10,0	40,0	758	2,90	0,55	0,58	0,277	0,49	2,09
	3092	10,0	10,0	40,0	773		0,61			0,66	
ПК-16	6269	10,0	10,0	40,0	1567	16,40	2,40	2,50	0,83	1,88	3,01
	6246	10,0	10,0	40,0	1562		2,14				
	6491	10,0	10,0	40,0	1623		2,69				

В соответствии с табл. Л.1 [2] коэффициент перехода от прочности на сжатие  $R$  к прочности на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  составляет для тяжелого бетона  $K = 0,12$ , в то же время, согласно табл. 2.4, коэффициент перехода  $K_{ib}$  находится в диапазоне 0,1–0,30 и в среднем составляет  $K_{ib} = 0,185$ .

Коэффициент перехода от прочности на сжатие  $R$  к прочности на растяжение при раскалывании  $R_{it}$  по [2] для тяжелого бетона составляет 0,08, в соответствии же с табл. 2.3 значения коэффициента перехода  $K_{it}$  расположены в диапазоне 0,115–0,25 при среднем значении  $K_{it} = 0,158$ .

То есть для легкого бетона на ПСКГ указанные коэффициенты перехода  $K_{ib}$  и  $K_{it}$  больше, чем для тяжелого бетона, что, предположительно, связано с особенностями поризованной структуры легкого бетона. Что же касается легкого бетона ПСКГ плотной структуры (на кварцевом песке), то для него указанные коэффициенты  $K_{ib} = 0,152$  и  $K_{it} = 0,115$  несколько ближе к нормируемым значениям для тяжелого бетона (соответственно 0,12 и 0,08), приведенным в табл. Л.1 [2].

Коэффициент перехода от прочности на осевое растяжение  $R_t$  к прочности на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  для тяжелого бетона, согласно табл. Л.1 [2], равен 1,82. Соответствующий коэффициент  $K_{ibb}$  для легкого бетона на ПСКГ по табл. 2.4а находится в диапазоне 2,09–3,01 при среднем значении  $K_{ibb} = 2,57$ .

Коэффициент перехода от прочности на осевое растяжение  $R_t$  к прочности на растяжение при раскалывании  $R_{it}$  для тяжелого бетона, согласно табл. Л.1

[2], составляет 1,2. Коэффициент  $K_{iti}$  для легкого бетона на ПСКГ по табл. 2.3а равен 1,69–2,38 при среднем значении  $K_{iti} = 2,05$ .

Коэффициент перехода от прочности на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  к прочности на растяжение при раскалывании  $R_{it}$  для тяжелого бетона, согласно табл. Л.1 [2], составляет 0,67. По табл. 2.3а коэффициент  $K_{itb} = 0,65$ –1,14 при среднем значении 0,84.

На основании математического анализа опытных данных, приведенных в табл. 2.3–2.4а, следует, что зависимости прочности на растяжение при раскалывании  $R_{it}$  от кубиковой прочности на сжатие  $R$  с большой долей достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9692$  и  $R^2 = 0,9696$  могут быть описаны либо линейной функцией

$$R_{it} = 0,1067 \cdot R + 0,1398, \quad (2.2)$$

либо полиномиальной зависимостью

$$R_{it} = -0,0004 \cdot R^2 + 0,1145 \cdot R + 0,1205, \quad (2.3)$$

а зависимость прочности на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  от кубиковой прочности на сжатие  $R$  с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9199$  может быть описана полиномиальной зависимостью

$$R_{ib} = 0,0082 \cdot R^2 - 0,0151 \cdot R + 0,5362. \quad (2.4)$$

Известна также формула, приведенная в [10], для определения прочности на растяжение для легких бетонов на пористых заполнителях, которая имеет вид

$$R_t = 0,27 \cdot R^{0.6}. \quad (2.5)$$

В табл. 2.5 для сравнения приведены значения

Таблица 2.5  
Table 2.5

Прочности на растяжение легких бетонов на ПСКГ и на вулканическом стекле (дацизитобетона) при различных схемах испытаний  
Tensile strength of light concrete on UCS and on volcanic glass (dacite concrete) under various test schemes

Вид легкого бетона	Маркировка	Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Прочность на осевое растяжение, $R_t$ , МПа	Прочность на растяжение при раскалывании, $R_{it}$ , МПа	Прочность на растяжение при изгибе, $R_{ib}$ , МПа	$R_{it}/R_t$	$R_{ib}/R_t$	Прочность $R_{it}$ расч по формуле (2.5)	$R_{it}$	$R_{ib}$
Поризованный легкий бетон на ПСКГ	ПК-13	830	4,8*; 4,90	0,36	0,77; <b>0,61</b>	0,94	1,7–2,14	2,6	0,692; 0,70	<b>0,65;</b> 0,66	0,6526; 0,66
	ПК-15	800	3,30*; 2,90	0,277	0,66; <b>0,49</b>	<b>0,58</b>	1,77–2,4	2,09	0,553; 0,51	<b>0,49;</b> 0,45	<b>0,576;</b> <b>0,56</b>
Дацизитобетон низкопрочный и поризованный	ДГ-12	900	3,7	0,23	–	–	–	–	0,592	0,535	0,593
	Д-12	900	4,1	0,31	–	–	–	–	0,63	0,577	0,612
	ДП-13	900	5,0	0,38	–	–	–	–	0,71	0,67	0,6657
Легкий бетон плотной структуры на ПСКГ с кварцевым песком	ПК-16	1700	16,50	0,83	1,88	<b>2,50</b>	2,3	3,01	1,452	1,9	<b>2,52</b>
Дацизитобетон средней прочности	Д-15	1100	8,0	0,62	–	–	–	–	0,94	0,99	0,94
	Д-16	1200	10,8	0,88	–	–	–	–	1,126	1,29	1,33
	Д-17	1200	15,5	1,28	–	–	–	–	1,4	1,79	2,272
	ДГ-13	1000	6,3	0,58	–	–	–	–	0,815	0,812	0,77
	ДГ-14	1100	8,8	0,75	–	–	–	–	0,995	1,08	1,038
	ДП-14	1000	7,8	0,56	–	–	–	–	0,926	0,972	0,917

\* по результатам испытаний кубов  $7 \times 7 \times 7$  см.



прочности на растяжение, определенные при различных схемах испытаний, вычисленные по формуле (2.5), а также по формулам (2.2), (2.4).

Как следует из данных в табл. 2.5, полученные значения прочности на растяжение при раскалывании  $R_{rt}$  и изгибе  $R_{ib}$  для легкого бетона на ПСКГ превышают (в 1,3–3,01 раза) значения прочности при осевом растяжении  $R_p$ , а расчетные значения  $R_{p, расч}$ , вычисленные по формуле (2.5), соответственно, ближе к опытным величинам прочности на растяжение при раскалывании и изгибе. Для дацизитобетона значения прочности при осевом растяжении также меньше расчетных значений  $R_{p, расч}$  по формуле (2.5). Однако с увеличением прочности на сжатие опытные значения прочности при осевом растяжении для дацизитобетона приближаются к  $R_{p, расч}$ . Для бетона на ПСКГ такой тенденции не наблюдается.

Дополнительно были проведены испытания образцов, хранившихся в помещениях с влажностью, не превышающей 60 % (то есть в относительно сухом состоянии), прочности на растяжение которых оказались значительно меньше соответствующих значений для образцов, хранившихся до испытаний в камере нормального твердения при влажности более 90 %.

Результаты этих испытаний приведены в табл. 2.6, 2.9. Для сравнения в табл. 2.7, 2.8 приведены результаты испытаний на растяжение при изгибе образцов, хранившихся до испытаний в камере нормального твердения при влажности более 90 %.

Как показывает анализ данных в табл. 2.6, 2.7, 2.8, значения прочностей на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  для образцов, хранившихся в помещениях с влажностью, не превышающей 60 % (то есть в относительно сухом

Таблица 2.6

Table 2.6

**Результаты испытаний образцов–призм  $10 \times 10 \times 40$  см составов ПК–4, ПК–9, ПК–10 и ПК–12 на растяжение при изгибе, хранившихся при сухом влажностном режиме по истечении более 120 суток**  
**Results of  $10 \times 10 \times 40$  cm prism samples of the compositions PK–4, PK–9, PK–10 and PK–12, stored under dry conditions after more than 120 days, tensile bending tests**

Маркировка состава	Дата		Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кубиковая прочность, $R$ , МПа	Разрушающая нагрузка, $P$ , кН	Прочность, $R_{ib}$ , МПа	$R_{ibm}$
	Формование	Испытания									
ПК-4-1	13.04.21	28.09.21	2330	10	10	40	583	2,8	0,3	0,083	0,124
ПК-9-1	20.04.21	28.09.21	2743	10	10	40	686	4,1	0,58	0,16	
ПК-10-1	22.04.21	28.09.21	2589	10	10	40	647	3,7	0,51	0,14	
ПК-12-1	22.04.21	28.09.21	2691	10	10	40	673	4,2	0,41	0,113	

Таблица 2.7

Table 2.7

**Результаты испытаний образцов–призм  $10 \times 10 \times 40$  см составов ПК–4, ПК–9, ПК–10, ПК–12 на растяжение при изгибе, хранившихся до испытаний в камере нормального твердения при влажности более 90 %**  
**Results of  $10 \times 10 \times 40$  cm prism samples of PK–4, PK–9, PK–10, PK–12 compositions, stored before testing in a normal hardening chamber at a humidity of more than 90 %, bending tensile strength tests**

Маркировка состава	Дата		Масса, <i>m</i> , г	Размеры, см			Плотность в момент испы- тания, <i>ρ</i> , кг/м³	Кубиковая прочность, <i>R</i> , МПа	Разрушающая нагрузка, <i>P</i> , кН	Прочность, <i>R<sub>ib</sub></i> , МПа	<i>R<sub>ibm</sub></i>
	Формование	Испытания									
ПК-4	13.04.21	18.05.21	2299	10,0	10,0	40,0	575	2,8	1,43	0,395	0,42
ПК-9	20.04.21	18.05.21	2773	10,0	10,0	40,0	693	4,1	1,49	0,41	
ПК-10	22.04.21		2796	10,0	10,0	40,0	699	3,7	1,56	0,43	
ПК-12			2812	10,0	10,0	40,0	703	4,20	1,59	0,44	

Таблица 2.8

Table 2.8

**Прочность на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  образцов–призм составов ПК–11, хранившихся до испытаний в камере нормального твердения при влажности более 90 %**  
**Tensile strength during bending of  $R_{ib}$  samples–prisms of PK–11 compositions, stored before testing in a normal hardening chamber at a humidity of more than 90 %**

Маркировка состава	Дата		Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Разрушающая нагрузка, $P$ , кН	Прочность, $R_{ib}$ , МПа	$R_{ibm}$ , МПа
	Формование	Испытания								
ПК-11-1	22.04.21	06.07.2021	2366	10,0	10,0	40,0	592	1,33	0,37	0,39
ПК-11-2			2425	10,0	10,0	40,0	606	1,43	0,39	
ПК-11-3			2302	10,0	10,0	40,0	576	1,49	0,41	

Таблица 2.9  
Table 2.9

Результаты испытаний образцов-призм  $7 \times 7 \times 28$  см составов ПК-11 на осевое растяжение, хранившихся при сухом влажностном режиме по истечении более 120 суток  
Results of  $7 \times 7 \times 28$  cm prism samples of PK-11 compositions, stored under dry conditions after more than 120 days, axial stretching tests

Маркировка состава	Масса, $m$ , г	Размеры, см			Плотность в момент испытания, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Разрушающая нагрузка, $P$ , кН	Прочность, $R_t$ , МПа	$R_{tm}$ , МПа
ПК-11-2	821	7,0	7,0	28,0	598	0,49	0,085	0,085
ПК-11-3	812	7,0	7,0	28,0	592	0,49	0,085	

состоянии), оказались значительно меньше соответствующих значений для образцов, хранившихся до испытаний в камере нормального твердения при влажности более 90 %. В частности, для образцов-призм ПК-4-1, ПК-9-1, ПК-10-1, ПК-12-1, хранившихся при сухом влажностном режиме и испытанных на изгиб (табл. 4.6), значения  $R_{ib}$  в 3,9–4,8 раза меньше, чем у образцов этих же составов, хранившихся до испытаний в камере нормального твердения при влажности более 90 % (табл. 2.7), а также в среднем более чем в 3 раза меньше, чем у образцов состава ПК-11 с меньшей прочностью на сжатие, также хранившихся в камере нормального твердения.

Прочность на осевое растяжение  $R_t$  у образцов ПК-11-2, ПК-11-3 (табл. 2.9), хранившихся в сухом влажностном режиме, в 4,6–4,8 раза меньше, чем у образцов ПК-11-2, ПК-11-3, испытанных на изгиб и хранившихся при влажности более 90 %. При этом прочность  $R_t$  образцов ПК-11-2 и ПК-11-3, хранившихся при сухом влажностном режиме, достаточно хорошо совпадает с прочностью на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  для образца ПК-4-1, хранившегося в таких же условиях.

Такое значительное снижение прочности при растяжении для испытанных составов легкого бетона на ПСКГ может быть объяснено повышенной влажностной усадкой такого бетона, проявившейся за довольно

длительный промежуток времени и приведшей к большим собственным внутренним напряжениям в сечении образцов между их наружной поверхностью и бетоном внутри.

По результатам приведенных в табл. 2.6 пониженных значений  $R_{ib}$  построен график, показанный на рис. 2.9.

На основании данных, приведенных на рис. 2.9, следует, что зависимость прочности на растяжение при изгибе от кубиковой прочности на сжатие может быть описана полиномиальной зависимостью

$$R_{ib} = -0,0746 \cdot R^2 + 0,5566 \cdot R - 0,8912. \quad (2.8)$$

Полученные опытные и расчетные (по формуле (2.8)) данные по сниженной прочности на растяжение испытанных составов легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ должны быть учтены при внесении изменений в положения пункта 6.1.11 (табл. 6.3 и 6.4) [5].

Для применения легкого бетона на ПСКГ испытанных составов целесообразно для повышения усадочной трещиностойкости такого бетона в ограждающих конструкциях (крупноформатных стеновых панелей нового типа) использовать дисперсное армирование полимерной фиброй, одновременно увеличивающей теплозащитные свойства таких конструкций (путем некоторого снижения коэффициента теплопроводности легкого фибробетона за счет дополнительного воздухоовлечения).

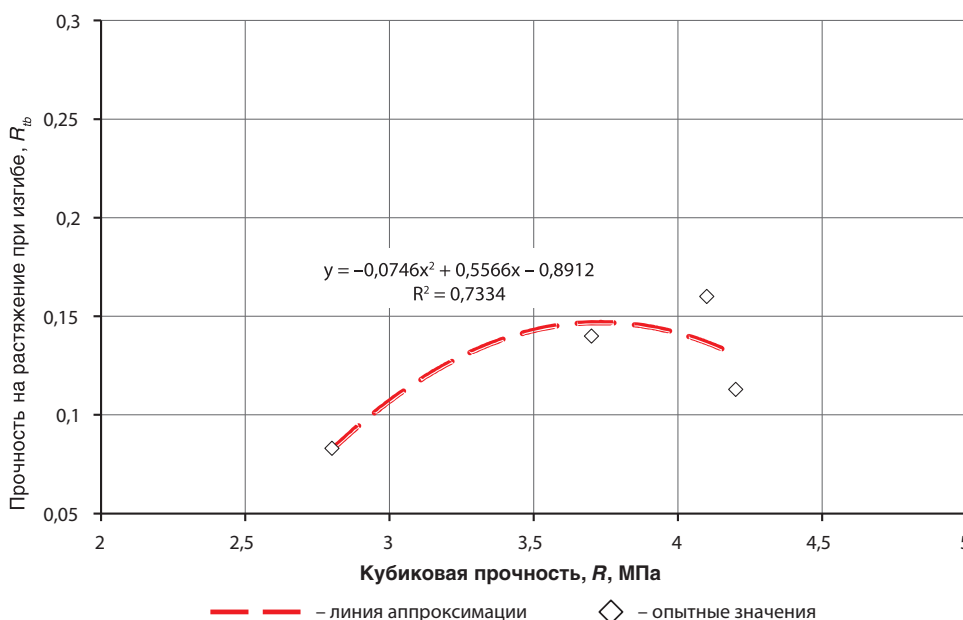


Рис. 2.9. Зависимость прочности на растяжение при изгибе  $R_{ib}$  от прочности бетона на сжатие  $R$   
Fig. 2.9. Dependence of the tensile strength during bending  $R_{ib}$  on the compressive strength  $R$  of concrete

## Общие выводы и предложения

1. Полученные опытные данные по более высокому коэффициенту призмочной прочности для легкого бетона на ПСКГ в перспективе могут быть основанием для увеличения нормативных расчетных сопротивлений прочности при осевом сжатии для такого вида легкого бетона. До накопления большего количества экспериментальных данных в настоящее время призмочную прочность и, соответственно, нормативные и расчетные сопротивления при осевом сжатии для легкого бетона на ПСКГ принимать в соответствии с [5].

Значения и формулы для определения призмочной прочности и коэффициента призмочной прочности легкого бетона испытанных составов на ПСКГ могут быть использованы при расчете и проектировании крупноформатных панелей стен нового типа (марок 1.НС.629.299.45-1 и 1.НС.809.302.45-1 по чертежам ООО «Индустриальные проектные решения»), рекомендованных ООО «Префабрика».

2. Полученные опытные и расчетные данные по прочности на растяжение испытанных составов легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ (табл. 2.6 и 2.9, формула (2.8) должны быть учтены при корректировке положения пункта 6.1.11 (табл. 6.3 и 6.4) [5].

При применении легкого бетона поризованной структуры на ПСКГ целесообразно для повышения усадочной трещиностойкости такого бетона для ограждающих конструкций (крупноформатных стеновых панелей нового типа (марок 1.НС.629.299.45-1 и 1.НС.809.302.45-1 по чертежам ООО «Индустриальные проектные решения») использовать дисперсное армирование полимерной фиброй, одновременно повышающей теплозащитные свойства таких конструкций.

## Список литературы

1. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Государственный комитет СССР по делам строительства; 1982.
2. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Министерство регионального развития; 2013.
3. Давидюк А.Н. Легкие конструктивно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях. Научное издание. Москва: Издательство Красная звезда; 2008. 208 с.
4. Черноусов Н.Н., Бондарев Б.А., Стурова В.А., Бондарев А.Б., Ливенцева А.А. Аналитические зависимости влияния плотности материала на прочность и деформативность конструкционного бетона при осевом сжатии // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>. EDN: NDKYMY
5. СП 351.1325800.2017. Бетонные и железобетонные конструкции из легких бетонов. Правила проектирования. Москва: Росстандарт; 2017.

6. Бужевич Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях Москва: Стройиздат; 1970. 272 с.

7. Кузмич Т.А. Коэффициент призмочной прочностинизкомарочного керамзитобетона/Совершенствование легких бетонов и конструкций из них: Сб. науч. тр. под ред. И.Е. Путляева, Ю.В. Чиненкова. Москва: НИИЖБ; 1988. 123 с.

8. Гнатусь Н.А. Дацизитобетон. Под ред. И.Е. Путляева. Москва: Недра; 1991. 124 с.

9. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Росстандарт; 2020.

10. Несветаев Г.В. Закономерности деформирования и прогнозирования стойкости бетонов при силовых и температурных воздействиях: Автореферат дисс. ... д.т.н. Ростов-на-Дону: РГСУ; 1998. 48 с.

## References

1. State Standard 24452-80. Concrete. Methods for determining the prismatic strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio. Moscow: USSR State Committee for Construction; 1982. (In Russian).
2. State Standard 10180-2012. Concrete. Methods for determining strength from control samples. Moscow: Ministry of Regional Development; 2013. (In Russian).
3. Davidiyuk A.N. Lightweight structural and thermal insulation concretes on vitreous porous aggregates. Scientific edition. Moscow: Krasnaya Zvezda Publishing House; 2008. 208 p. (In Russian).
4. Chernousov N.N., Bondarev B.A., Sturova V.A., Bondarev A.B., Liventseva A.A. Analytical dependences of the effect of material density on the strength and deformability of structural concrete under axial compression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022, no. 5, pp. 58–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-58-67>. EDN: NDKYMY
5. SP 351.1325800.2017. Concrete and reinforced concrete structures made of light concrete. Design rules. Moscow: Rosstandart; 2017. (In Russian).
6. Buzhevich G.A. Light concretes on porous aggregates. Moscow: Stroyizdat; 1970. 272 p. (In Russian).
7. Kuzmich T.A. The coefficient of prismatic strength of low-grade keramzit-concrete. Improvement of light concrete and structures made of them. Moscow: NIIZHB; 1988. 123 p. (In Russian).
8. Gnatus N.A. Dacite concrete. Edited by I.E. Putlyayev. Moscow: "Nedra"; 1991. 124 p. (In Russian).
9. State Standard 18105-2018. Concrete. Rules for strength control and evaluation. Moscow: Rosstandart; 2020. (In Russian).
10. Nesvetaev G.V. Regularities of deformation and prediction of concrete resistance under force and temperature influences: Abstract of dissertation ... Doctor of Technical Sciences. Rostov-on-Don: RGSU; 1998. 48 p. (In Russian).

**Информация об авторах /  
Information about the authors**

**Валерий Николаевич Строцкий** ✉, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией легких и ячеистых бетонов и конструкций № 5 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: np.ots@mail.ru

**Valeriy N. Strotsky** ✉, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of the Laboratory of Light and Cellular Concrete and Structures No. 5, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: np.ots@mail.ru

**Владимир Иванович Савин**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетона и железобетона № 13 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
**Vladimir I. Savin**, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher at the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete No. 13, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Владимир Васильевич Полетаев**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией легких и ячеистых бетонов и конструкций № 5 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
**Vladimir V. Poletaev**, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Light and Cellular Concrete and Structures No. 5, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author