



# Layer model of the cement composites deformation in the reinforced masonry structures

Korolev, A.S.<sup>1\*</sup>; Zyrianov, F.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

\* [korolev@sc74.ru](mailto:korolev@sc74.ru)

## Keywords:

Masonry, Reinforced masonry; Lightweight concrete; Deformation properties; Deformation modulus; Deformability; Elastic deformation, Plastic deformation; Layer model; Elastic modulus; Modulus of elasticity; Clay brick

## Abstract:

The object of the study is unreinforced and reinforced masonry made of ceramic block. The deformative properties of the object under a compressive load are studied. The elastic modulus' actual and calculated parameters were determined according to standard calculation methods and the proposed layer model. Based on the analysis of the obtained data, the layer calculation model's suitability is revealed, and an advanced method for predicting the elastic modulus of reinforced masonry, including using fiberglass reinforcement, is proposed. A prospective study of the suitability of the layer model for use in composite structures is performed.

## 1 Introduction

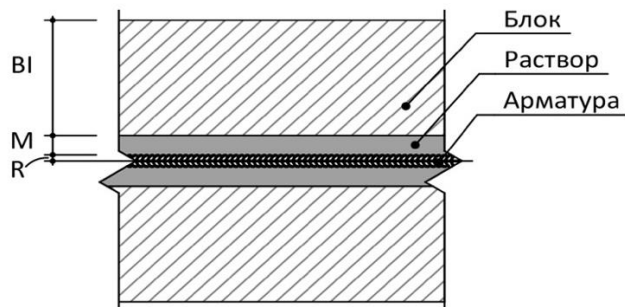
Прогнозирование деформативных свойств композитов, в том числе цементных композитов, остается актуальной задачей [1], [2], [3] поскольку именно точное прогнозирование деформативных свойств позволяет качественно оптимизировать проектные решения железобетонных и легкобетонных конструкций [4], [5].

Начиная с середины XX века и по сегодняшний день, предложено множество расчетных моделей деформативных свойств строительных конструкций, в том числе кладок и композитных материалов [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Многие из этих моделей апробированы [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], но в большинстве своем достаточно трудны для применения на практике. Все расчетные, в том числе и стандартизированные методы расчета или прогнозирования модуля упругости используют взаимосвязь с прочностью [21], [22], [23], [24], [25], что не учитывает множество факторов. В связи с этим, было принято решение о разработке метода, учитывающего разную деформативность компонентов структуры и для начальной апробации рассмотреть наиболее простой вариант макромодели многокомпонентной структуры – каменной кладки с последующей попыткой транслирования на композитную структуру.

Рассмотрим слоевую расчетную модель деформативных свойств армокаменной кладки (рис. 1), в которой в качестве слоев рассматриваются: 1 – слой «блок», 2 – слой «раствор», 3 – слой «арматура» с соответствующими деформативными свойствами.

Руководствуясь принципом равнонапряженности слоев кладки, определим общую деформацию кладки как сумму частных деформаций каждого слоя

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma}{E_b} = \sum_1^n \frac{\sigma}{E_i} \delta_i \quad (1)$$



**Рис. 1. Расчетная слоевая модель деформативных свойств кладки**  
**Figure 1. Calculated layer model of the masonry deformative properties.**

Тогда зависимость модуля упругости армированной кладки по слоевой модели с количеством слоев  $i=n$ , модулем упругости слоя  $E_i$  и относительной толщиной слоя  $\delta_i$  примет вид

$$E_c = \frac{E_1 E_2 \dots E_n}{\eta_{\Sigma} \delta_i \frac{E_1 \dots E_n}{E_i}} \quad (2)$$

В последующем исследовании проведем апробацию данной слоевой модели на экспериментальных кладках, а также сделаем попытку адаптировать слоевую модель к композитным структурам на примере легких бетонов с близкими с кладкой деформативными свойствами.

## 2 Materials and Methods

Для определения модуля упругости и прочности при сжатии бетонов различных классов применялись стандартные методы ГОСТ 24452-80, ГОСТ 22690-2015. При определении модуля упругости кладки испытания проводились на 5-рядной кладке с размерами 1000\*500\*1100 мм из керамического блока М125 230x380x250 мм и кладочного раствора М100 со ступенчатым нагружением по 10% от разрушающей нагрузки и определением деформаций с помощью датчиков перемещения на каждой ступени на базе измерения 300 мм (рис. 2). Для армирования применялись стальная сетка Врl с диаметром проволоки 2,5 мм и шагом 50 мм ОАО ММК и кладочная базальтопластиковая сетка с диаметром стержней 2,5 мм и шагом 50 мм производства ООО СКМ.

При определении деформативных свойств легких бетонов использовались керамзитовый гравий с модулем упругости  $E_{ag2}=7*10^3$  МПа, керамзитовый песок с модулем упругости  $E_{ag1}=10*10^3$  МПа Винзилинского завода, портландцемент В42,5 производства группы ЮУГПК с нормальной плотностью 25% и прочностью цементного камня с В/Ц нормальной плотности в марочном возрасте  $R_{cem}=100$  МПа и модулем упругости  $E_{cem}=50*10^4$  МПа.

Аналитический метод применялся при выборе и оценке расчетной схемы слоевой модели кладок и композитов. В качестве базовой методики расчета применялась методика по методике СП 15.13330.2012 Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81\* (с Изменениями N 1, 2, 3).

## 3 Results and Discussion

### 3.1 Апробация слоевой модели на кладках

Для проведения исследования деформативных свойств были изготовлены три вида кладок из керамического блока и кладочного раствора: 1 – неармированная кладка, 2 – кладка, армированная кладочной стальной сеткой, 3 – кладка, армированная кладочной базальтопластиковой сеткой.

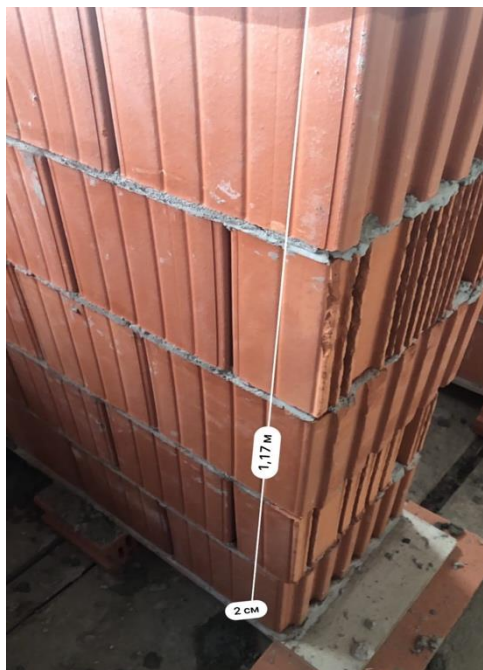


Рис. 2. Образец испытываемой кладки  
Figure 2. Sample of tested masonry

В этом случае, согласно слоевой модели, модуль упругости кладки составит

$$E_b = \frac{E_{bl}E_mE_r}{rE_{bl}E_m + blE_mE_r + mE_{bl}E_r} \quad (3)$$

$E_{bl}$  – модуль упругости керамического блока М125,  $4,4 \cdot 10^3$  МПа;

$E_m$  – модуль упругости раствора кладочного М100,  $13,5 \cdot 10^3$  МПа;

$E_r$  – модуль упругости арматуры, стальной –  $208 \cdot 10^3$  МПа, базальтопластиковой –  $55 \cdot 10^3$  МПа;

$r = \mu = 0,005$  – коэффициент армирования кладки,

$bl = \frac{bl}{m+bl+r} = \frac{230}{20+230} = 0,92$  – относительная толщина слоя керамического блока;

$m = \frac{m}{m+bl+r} = \frac{20}{20+230} = 0,08$  – относительная толщина слоя керамического блока.

Таблица 1. Расчетные и стандартные характеристики модуля упругости каменных кладок  
Table 1. Calculated and standard characteristics of the modulus of elasticity of masonry

Вид кладки	$E_{bl}$ , $10^3$ МПа	$E_m$ , $10^3$ МПа	$E_r$ , $10^3$ МПа	$bl$	$m$	$\mu$	$E_b$	$E_{aver}$	$E_{st}$	$E_{fact}$
Без арматуры	4,4	13,5	208	0,92	0,08	0	4,65	5,12	4,42	4,52
Армирование стальной сеткой	4,4	13,5	208	0,92	0,0795	0,0005	4,652	5,22	4,46	4,57
Армирование базальтопластиковой сеткой	4,4	13,5	55	0,92	0,0795	0,0005	4,651	5,15	4,56	5,3

Для указанных видов кладки были определены модули упругости:  $E_b$  – предложенным расчетным методом по формуле 3,  $E_{aver}$  – средневзвешенный по слоям,  $E_{st}$  – по методике СП 15.13330.2012,  $E_{fact}$  – фактический, определенный на кладке по трем образцам экспериментально (рис. 2). Данные расчетов и эксперимента приведены в табл. 1.

Как видно из результатов, растворный слой и армирование вносит свой вклад в повышение модуля упругости, расчет по слоевой модели неармированной кладки укладывается в 5% отклонения от факта, при этом точность не меньше, чем по методике СП 15.13330.2012. Расчет средневзвешенного не дает точности. Вместе с тем, на армированной кладке прирост модуля значительно выше в сравнении с любыми данными расчета.

Армированная кладка характеризуется непропорциональным развитием деформаций, что говорит о сдерживании поперечных деформаций арматурой и, за счет этого, развития продольных деформаций и роста упругих свойств. Поэтому при рассмотрении армированных слоев, необходимо арматуру рассматривать не как отдельный слой, а рассматривать работу и принимать в расчет деформативные свойства единого армированного слоя. В связи с этим, было принято решение рассмотреть кладку как 2-слойную модель.

При этом в качестве двух деформативных слоев для каменной кладки следует принять слои «блок» и «раствор», для армокаменной кладки – «блок» и «армированный раствор».

В этом случае, по двуслойной модели модуль упругости кладки составит

$$E_b = \frac{E_{bl}E_m}{blE_m + mE_{bl}} \quad (6)$$

$E_{bl}$  – модуль упругости керамического блока М125,  $4,4 \cdot 10^3$  МПа;

$E_m$  – модуль упругости раствора кладочного М100,  $13,5 \cdot 10^3$  МПа или армированного раствора ;

$E_{mr} = E_m + 0,8R_r \mu / 100$  – где  $R_r$  временное сопротивление арматуры разрыву, стальной – 400 МПа, базальтопластиковой – 1000 МПа;

$\mu = 0,06$  – коэффициент армирования раствора,

$bl = \frac{bl}{m+bl+r} = \frac{230}{20+230} = 0,92$  – относительная толщина слоя керамического блока;

$m = \frac{m}{m+bl+r} = \frac{20}{20+230} = 0,08$  – относительная толщина слоя кладочного раствора.

В этом случае обеспечивается высокая сходимость расчетных и фактических деформативных свойств как на армированной так и на неармированной кладке (табл. 3). В результате проведенной аналитической и экспериментальной работы подтверждена пригодность слоевой модели для оценки модуля упругости каменных кладок.

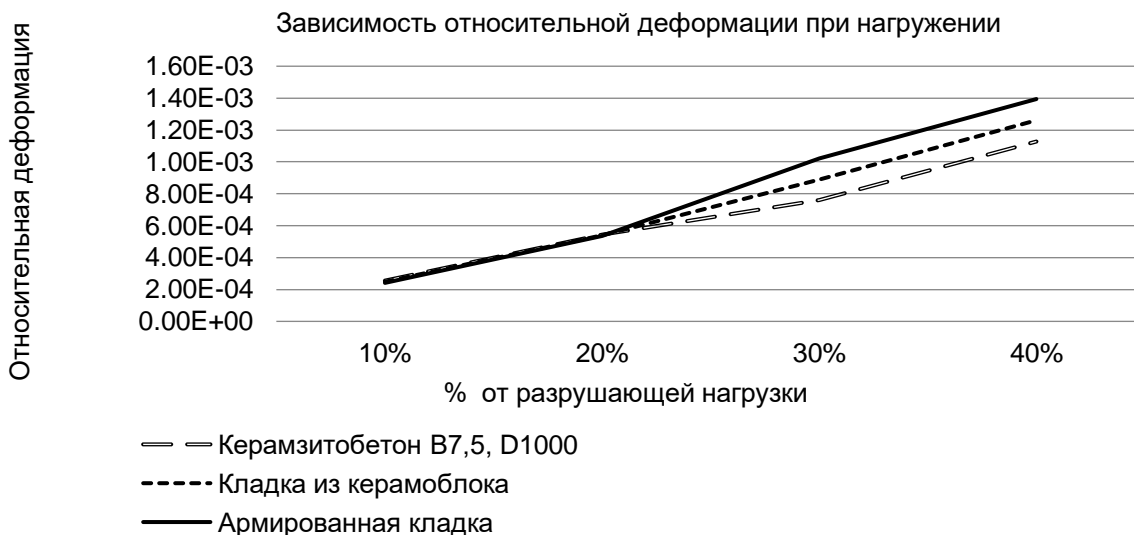
**Таблица 2. Расчетные и стандартные характеристики модуля упругости каменных кладок по двуслойной модели**

**Table 2. Calculated and standard characteristics of the modulus of elasticity of masonry according to a two-layer model**

Вид кладки	$E_{bl}$ , $10^3$ МПа	$E_m$ , $10^3$ МПа	$bl$	$m$	$E_b$	$E_{st}$	$E_{fact}$
Без арматуры	4,4	13,5	0,92	0,08	4,65	4,42	4,52
Армирование стальной сеткой	4,4	32,7	0,92	0,08	4,73	4,46	4,57
Армирование базальтопластиковой сеткой	4,4	61,5	0,92	0,08	4,75	4,56	5,3

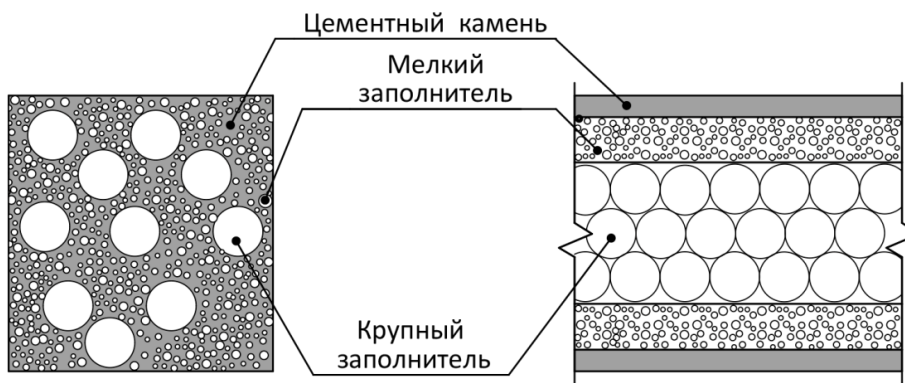
### 3.2 Перспективная оценка применимости слоевой модели при оценке деформативных свойств легких композитов

Рассмотрим деформативные свойства легких бетонов с целью апробации слоистой модели на композитной структуре. Рассмотрение графической зависимости относительной продольной деформации при нагружении кладки и легкого керамзитобетона В7,5 (рис. 3) показывает то, что неармированные материалы со сходной прочностью и плотностью имеют очень близкий характер упругих деформаций.



**Рис. 3. Зависимость относительной деформации под степенью нагружения**  
**Figure 3. Dependence of the relative deformation under the degree of loading**

Предложим 3-слойную расчетную модель деформативных свойств легкого керамзитобетона, в которой в качестве слоев рассмотрим цементный камень, мелкий заполнитель и крупный заполнитель (рис. 4).



**Рис. 4 - Расчетная слоевая модель деформативности бетона на легком заполнителе**  
**Figure 4 - Design layer model of concrete deformability on lightweight aggregate**

Согласно предложенной расчетной модели, зависимость модуля упругости легкого бетона примет вид

$$E_c = \frac{E_{cem} E_{ag1} E_{ag2}}{cem E_{ag1} E_{ag2} + ag1 E_{cem} E_{ag2} + ag2 E_{cem} E_{ag1}} \quad (4)$$

$E_{cem}$  – модуль упругости слоя цементного камня;

$E_{ag1}$  – модуль упругости слоя «мелкий заполнитель»;

$E_{ag2}$  – модуль упругости слоя «крупный заполнитель»;

$cem$ ,  $ag1$ ,  $ag2$  – относительные толщины слоев цементного камня, мелкого и крупного заполнителей.

Относительные толщины определяем из условия равенности площадей поверхности в зонах контакта между слоями  $S_{itz}$  с толщинами  $\delta$

$$cem = \frac{\delta_{cem}}{\delta_{mv}} = \frac{S_{itz}\delta_{cem}}{S_{itz}(\delta_{cem}+\delta_{agg})} = \frac{V_{cem}}{V_{cem}+V_{agg}} = \frac{V_{cem}}{V_c} \quad (5)$$

$V_{cem}$  – объем цементного камня;

$V_c$  – объем бетона.

По такому же принципу определяются относительные толщины слоев заполнителей

$$ag1 = \frac{V_{ag1}}{V_c};$$

$$ag2 = \frac{V_{ag2}}{V_c}.$$

Для апробации модели были изготовлены легкие бетоны в двух вариантах:

- 1) крупный заполнитель – керамзитовый гравий, мелкий заполнитель – кварцевый песок,
- 2) крупный заполнитель – керамзитовый гравий, мелкий заполнитель – керамзитовый песок.

Для апробации были использованы рабочие составы легких бетонных смесей собственного бетоно-смесительного завода классов В7,5 D1000 и В15 D1600. В таблице 1 приведены данные последовательного расчета модуля упругости  $E_c$  легких бетонов по слоевой модели по показателям модуля составляющих и состава легкогобетонной смеси – относительных толщин  $cem$ ,  $ag1$ ,  $ag2$ . Для оценки точности применялись нормативные значения модуля упругости  $E_{st}$  по классам согласно СНиП 2.03.01-84\*(1996), также модуль упругости  $E_{fact}$  определялся экспериментально на образцах-балках по стандартной методике.

**Таблица 3. Расчетные и стандартные характеристики модуля упругости легких бетонов**  
**Table 3. Calculated and standard characteristics of the modulus of elasticity of lightweight concrete**

$B$	$D$	$E_{cem}$ , МПа, $10^3$	$E_{ag1}$ , МПа, $10^3$	$E_{ag2}$ , МПа, $10^3$	$C$ , кг/м <sup>3</sup>	$Ag1$ , кг/м <sup>3</sup>	$Ag2$ , кг/м <sup>3</sup>	$cem$	$Ag1$	$Ag2$	$E_c$ , МПа, $10^3$	$E_{st}$ , МПа, $10^3$	$E_{fact}$ , МПа, $10^3$
15	1600	50	40	7	540	940	100	0,28	0,45	0,27	14,1	14	15
7,5	1000	50	10	7	470	180	230	0,24	0,3	0,46	7,2	7,2	7,5

Как видно из данных табл. 2 расчет дает хорошую сходимость в прогнозировании модуля упругости, отклонения не превышают 10%.

Апробация показала применимость расчетной слоевой модели в композитных структурах. При прогнозировании деформативных свойств бетонов допустимым является рассмотреть структуру из непрерывных слоев с фактическими соотношениями в составе и показателями деформативности компонентов.

## 4 Conclusions

Сравнительный анализ результатов определения фактических деформативных свойств керамических кладок и предложенных методов расчета показал применимость слоевой структурной модели. Предложен уточненный метод расчета модуля упругости кладки, армированной композитными материалами на основе двухслойной модели.

Применение слоевой модели на легких бетонах с близкими с кладкой деформативными свойствами показало высокую сходимость результатов с экспериментальными данными, что делает перспективным применение слоевой модели при прогнозировании модуля упругости любых цементных композитов в зависимости от их состава.

## 5 Acknowledgements

Работа выполнена в рамках государственного задания FENU-2020-0019 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### References

1. Sideris, K.K., Manita, P., Sideris, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2004. 26(6). Pp. 623–631. DOI:10.1016/S0958-9465(03)00084-2. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946503000842> (date of application: 6.09.2020).
2. Yıldırım, H., Sengul, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. *Construction and Building Materials*. 2011. 25(4). Pp. 1645–1652. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061810005040> (date of application: 6.09.2020).
3. Brooks, J.J. *Concrete and Masonry Movements*. Elsevier Inc., 2014. 1–599 p. ISBN:9780128017678.
4. Silva, R.V., de Brito, J., Dhir, R.K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2016. 112. Pp. 2171–2186. DOI:10.1016/j.jclepro.2015.10.064. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615015358> (date of application: 6.09.2020).
5. Topçu, İ.B., Bilir, T., Boğa, A.R. Estimation of the modulus of elasticity of slag concrete by using composite material models. *Construction and Building Materials*. 2010. 24(5). Pp. 741–748. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.034. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061809003717> (date of application: 6.09.2020).
6. Sorour, M.M., Parsekian, G.A., Duchesne, D., Paquette, J., Mufti, A., Jaeger, L., Shrive, N.G., Memorial, K. EVALUATION OF YOUNG'S MODULUS FOR STONE MASONRY WALLS UNDER COMPRESSION Public Works and Government Services Canada. 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Ontario, May 31- June 3, 2009. 2009. URL: [http://canadamasonrydesigncentre.com/download/11th\\_symposium/B1-5.pdf](http://canadamasonrydesigncentre.com/download/11th_symposium/B1-5.pdf) (date of application: 6.09.2020).
7. Zahra, T., Jelvehpour, A., Thambou, J.A., Dhanasekar, M. Interfacial transition zone modelling for characterisation of masonry under biaxial stresses. *Construction and Building Materials*. 2020. 249. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.118735.
8. Sprince, A., Pakrastins, L., Gailitis, R. Long-Term Parameters of New Cement Composites. RILEM Bookseries. 24. Springer, 2020. Pp. 85–94.
9. Jurowski, K., Grzeszczyk, S. The Influence of Concrete Composition on Young's Modulus. *Procedia Engineering*. 2015. 108. Pp. 584–591. DOI:10.1016/j.proeng.2015.06.181. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815011352> (date of application: 6.09.2020).
10. Noguchi, T., Nemati, K.M. Relationship between compressive strength and modulus of elasticity of high-strength concrete. *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*. 2007. 3. Pp. 1305–1311.
11. Li, G., Zhao, Y., Pang, S.-S. Four-phase sphere modeling of effective bulk modulus of concrete. *Cement and Concrete Research*. 1999. 29(6). Pp. 839–845. DOI:10.1016/S0008-8846(99)00040-X. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888469900040X> (date of application: 6.09.2020).
12. Zhu, X., Gao, Y., Dai, Z., Corr, D.J., Shah, S.P. Effect of interfacial transition zone on the Young's modulus of carbon nanofiber reinforced cement concrete. *Cement and Concrete Research*. 2018. 107. Pp. 49–63. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.02.014. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884617308839> (date of application: 6.09.2020).
13. Pirsaeheb, H., Javad Moradi, M., Milani, G. A Multi-Pier MP procedure for the non-linear analysis of in-plane loaded masonry walls. *Engineering Structures*. 2020. 212. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.110534.
14. STEPANOVA, V.F., BUCHKIN, A.V., IURIN, E.U., NIKISHOV, E.I., ISHCHUK, M.K., GRANOVSKII, A.V., DZHAMUEV, B.K., AIZIATULLIN, K.A. Composite Polymer Mesh for Stone Masonry. *Stroitel'nye Materialy*. 2019. 774(9). Pp. 44–50. DOI:10.31659/0585-430X-2019-774-9-

Korolev, A.S.; Zyrianov, F.A.

Layer model of the cement composites deformation in the reinforced masonry structures;

2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 92 Article No 9202. doi: 10.18720/CUBS.92.2

44-50.

15. Usanova, K. Properties of Cold-Bonded Fly Ash Lightweight Aggregate Concretes. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. 70. Pp. 507–516. DOI:10.1007/978-3-030-42351-3\_44.
16. Usanova, K., Barabanshchikov, Y.G. Cold-bonded fly ash aggregate concrete. Magazine of Civil Engineering. 2020. 95(3). Pp. 104–118. DOI:10.18720/MCE.95.10.
17. Yarmakovskiy, V.N. Fiziko -himicheskie i strukturno -tehnologicheskie osnovy polucheniya vysokoprochnykh i vysokodolgovechnykh konstrukcionnykh legkih betonov. Stroitel'nye materialy. 2016. Pp. 6–11.
18. Matrosov, Y.A., Yarmakovskiy, V.N. Energetic efficiency of buildings when using modified light-weight concretes. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo. 2005.
19. Fládr, J., Bílý, P., Trtík, T. Analysis of the influence of supplementary cementitious materials used in UHPC on modulus of elasticity. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 522(1). DOI:10.1088/1757-899X/522/1/012010.
20. Kabancev, O.V. Deformacionnye svoystva kamennoy kladki kak raznomodul'noj kusochno-odnorodnoy sredy. Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2013. Pp. 36–40. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_20229281\\_99729134.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_20229281_99729134.pdf).
21. Varlamov, A.A., Rimshin, V.I., Tverskoi, S.Y. The modulus of elasticity in the theory of degradation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 463(2). DOI:10.1088/1757-899X/463/2/022029.
22. Nesvetaev, G.V., Kardumyan, G.S. Modul' uprugosti cementnogo kamnya s superplastifikatorami i mineral'nymi modifikatorami s uchetom ego sobstvennykh deformatsij pri tverdenii. Beton i Zhelezobeton. 2013. (5). Pp. 6–8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26657791>.
23. Makridin, N.I., Kalachnikov, V.I., Maksimova, I.N., Tarakanov, O. V., Polubarova, J. V. Inner friction and dynamic modulus of elasticity of structural concrete. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. DOI:10.3923/jeasci.2016.1545.1548.
24. Makridin, N. I., Maksimova, I.N. Mekhanicheskoe povedenie konstrukcionnogo keramzitobetona pri osevom szhatii. Stroitel'nye materialy. 2009. Pp. 51–53.
25. Adishchev, V.V., Kucherenko, I.V., Gracheva, M.S. Modelirovanie fizicheskikh harakteristik kirpichnykh kladok. Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo. 2013. (2–3). Pp. 94–102. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_19432120\\_90007607.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_19432120_90007607.pdf).