

УДК 691.327.32

СТРУКТУРА, ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ КЕРАМЗИТА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

СТРУКТУРА, МІЦНІСТЬ І МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ ЛЕГКИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ КЕРАМЗИТУ І НАУКИ УКРАЇНИ

STRUCTURE, STRENGTH AND FRACTURE MECHANICS OF LIGHT CONCRETE BASED ON CLAYDITE OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Семенюк С. Д., д.т.н., проф., ORCID ID: 0000-0002-4107-2452 Москалькова Ю. Г., к.т.н., доц., ORCID ID: 0000-0001-8854-5408 Ржевуцкая В. А., аспирант (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь)

Семенюк С. Д., д.т.н., проф., Москалькова Ю. Г., к.т.н., доц., Ржевуцкая В. А., аспирант (Білорусько-Російський університет, м. Могильов, Республіка Білорусь)

Semenyuk S. D., D. Sc. in Engineering, Professor, Moskalkova Yu. G., PhD. in Engineering, Assistant Professor, Rzhhevutskaya V.A., postgraduate student (Belarusian-Russian University, Mogilev, the Republic of Belarus)

В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния характеристик заполнителей на прочностные и деформативные свойства легкого бетона, а также аналитический обзор работ разных исследователей по данной теме. Рассмотрены особенности формирования структуры легкого бетона, механики его разрушения, особенности формирования и развития микротрещин, основные принципы описания полной диаграммы деформирования.

У статті наведені результати експериментальних досліджень впливу характеристик заповнювачів на міцність і деформативні властивості легкого бетону, а також аналітичний огляд робіт різних дослідників з даної теми. Розглянуто особливості формування структури легкого бетону, механіки його руйнування, особливості формування і розвитку мікротріщин, основні принципи опису повної діаграми деформування.

The paper provides the experimental studies results of the aggregate characteristics effect on the strength and deformation properties of lightweight concrete. There is an analytical review of various researchers' studies on this topic. The formation features of the lightweight concrete

structure, the mechanics of its fracture, the features of the formation and microcracks development, and the basic principles for describing a complete deformation diagram are considered. It is extremely important in the production of structural lightweight concrete to observe the preparation technology of concrete mixture. It is also necessary to pre-wet the porous aggregate in order to avoid self-drying concrete. The porous coarse aggregate and dense fine aggregate (natural sand) are used to obtain structural lightweight concrete. The use of porous fine aggregate does not allow to obtain lightweight concrete with high strength. An increase in the coarse aggregate fraction negatively affects on the deformation properties of expanded clay concrete, and the water-cement ratio does not significantly affect either the strength or deformation characteristics. Assessment of the average particle diameter of the porous aggregate can serve as an indirect method for assessing the basic deformation characteristics of lightweight concrete. The density of expanded clay concrete has a significant effect on its deformation property, in particular, on the values of microcracking formation, which can be taken into account in the calculation. The density and porosity of lightweight concrete are inversely proportional.

Ключевые слова: легкий бетон, керамзит, коэффициент Пуассона, модуль упругости, крупный заполнитель, прочность, деформативность
легкий бетон, керамзит, коефіцієнт Пуассона, модуль пружності, крупний заповнювач, міцність, деформативність
lightweight concrete, claydite, Poisson's ratio, modulus of elasticity, coarse aggregate, strength, deformation property

Введение. В современную эпоху использование энергоэффективных и энергосберегающих материалов стало основополагающей политикой в большинстве стран из-за растущего во всем мире спроса на энергоносители и нехватки доступных энергоресурсов. Строительная отрасль является одной из наиболее быстро растущих отраслей промышленности ввиду высоких требований современной инфраструктуры, и, следовательно, улучшение тепловых свойств бетона может значительно снизить потери тепла в зданиях, а значит уменьшить высокие энергетические потребности зданий и повысить экологическую безопасность и стабильность.

Для производства легких бетонов используются пористые заполнители с меньшей плотностью по сравнению с традиционно применяемым гравием и щебнем. Легкие заполнители различаются по плотности, прочности, водопоглощению, типу поверхности и форме. Все эти различия влияют на прочностные и деформативные характеристики получаемого бетона. Одна из проблем при производстве легких бетонов с применением керамзита заключается в том, что реологические свойства зависят от сорбционных свойств такого заполнителя. Исследования [1] показали, что 24-часовое

водопоглощение составляет от 6,0 % до 30,5 %. Если заполнители предварительно не смачиваются, много воды может быть потеряно из-за абсорбции во время смешивания, а при воздействии вибрации бетон может полностью потерять работоспособность.

Керамзит представляет собой легкий заполнитель, получаемый путем вспенивания натуральной глины при температуре около 1200 °С во вращающейся печи [2]. Форма частиц керамзита сферическая, она имеет закрытую, слегка пористую внешнюю поверхность и внутреннюю структуру высокой пористости черного цвета.

В процессе смешивания и уплотнения бетона может происходить сегрегация, всплывание легкого заполнителя из цементной пасты, что приводит к получению неоднородных смесей с плохими прочностными свойствами.

Влияние пористого заполнителя на прочность легкого бетона. В работе [3] приведен подробный обзор легких заполнителей, в результате которого установлено, что включение керамзита в состав бетонной смеси уменьшает механическую прочность, усадку, плотность, проникновение хлоридов, сопротивление замерзанию/оттаиванию и улучшает удобоукладываемость, звуко- и теплоизоляцию и огнестойкость легкого бетона. Получаемый конструкционный керамзитобетон должен иметь прочность на сжатие не менее 17 МПа и сухую плотность 1120–1920 кг/м³ в возрасте 28 суток [2].

Исследования [4] показали, что использование пористого крупного заполнителя вместо плотного (исследовался керамзит с максимальной фракцией 12,5 мм) снижает прочность бетона на сжатие на 34,5 %. При увеличении содержания цемента на 30 % (с 350 до 450 кг/м³) снижение прочности бетона на сжатие уменьшается до величины 15,2 %. То есть для конструкционного керамзитобетона требуется корректировка состава бетонной смеси.

Если же керамзит вводится в качестве и крупного, и мелкого заполнителя, то для количества цемента 450 кг/м³ прочность легкого бетона в возрасте 28 суток снижается на 50,8 % [5] по сравнению с тяжелым бетоном. Эти результаты подтверждены также в работе [6], в которой эмпирически доказано, что для производства конструкционного легкого бетона обязательно необходимо применение плотного мелкого заполнителя.

В [7] отмечено, что при прочих равных факторах, определяющих состав бетона, и при одинаковых условиях твердения его прочность определяется только водоцементным отношением (В/Ц). В то же время И. Н. Ахвердов [8] установил, что при увеличении размеров крупного заполнителя, прочность легкого бетона уменьшается незначительно.

Несмотря на то, что свойства керамзитобетонов тщательно изучаются, недостаточно изучены свойства самого керамзита. Исследования обычно основаны на косвенных измерениях и методах гомогенизации. Этим

вопросом заинтересовались [9]. Они утверждают, что диаметр частиц играет важную роль из-за изменения соотношения между толщиной наружного слоя и пористой внутренней структурой (рисунок 1). Пористость бетона значительно влияет на его механические и теплоизоляционные свойства. Тепловые характеристики улучшаются для бетона с большим объемом пор.

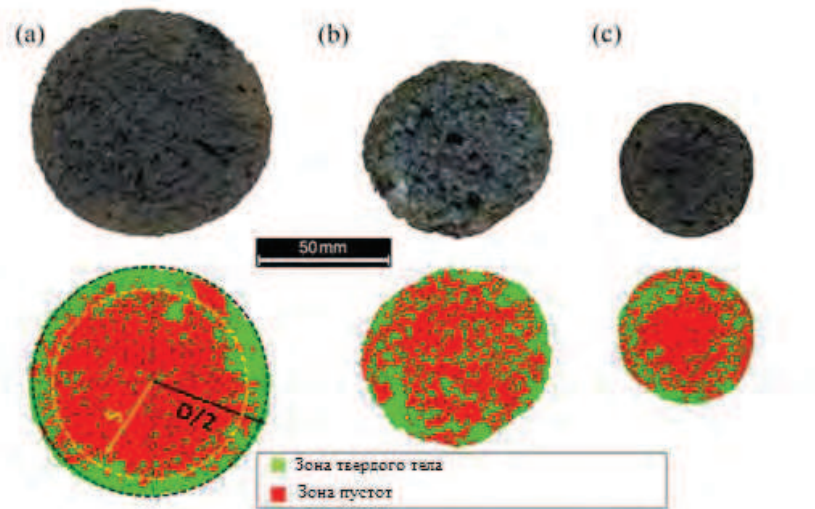


Рис. 1. Соотношения между толщиной наружного слоя и пористой внутренней структурой [9]

В работе [4] отмечена обратно пропорциональная зависимость между пористостью легкого бетона и его плотностью: очевидно, что чем выше плотность, тем ниже будет пористость (рисунок 2).

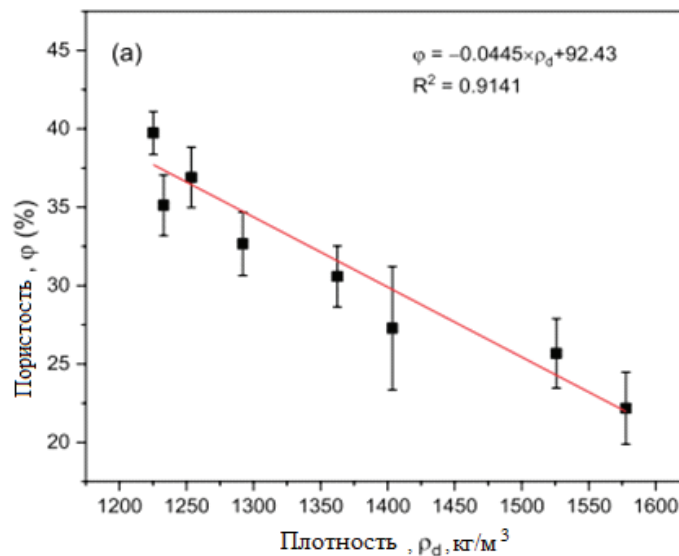


Рис. 2. Зависимость пористости керамзитобетона ϕ от плотности ρ_d [4]

Влияние компонентов легкого бетона на его деформативность. Деформации бетона зависят только от содержания крупного заполнителя, не зависят от его вида и от водоцементного отношения (В/Ц) [10]. Влияние вида и свойств заполнителя на модуль упругости и предельную деформативность

отмечено в [11]: при варьировании В/Ц от 0,37 до 0,85 при постоянных Ц : П (Ц : П от 1,1 до 1,3) и постоянном соотношении мелкого и крупного заполнителей в бетоне, установлено, что увеличение крупного заполнителя в бетоне приводит к росту деформаций, а изменение В/Ц практически не влияет на характер деформирования.

Ф. Слэйт [12] показал, что трещины на контакте «крупный заполнитель – матрица» образуются в ненагруженном бетоне и при малых напряжениях сжатия, при которых диаграмма деформирования практически линейна. Причем при увеличении размера крупного заполнителя снижается напряжение начала микротрещинообразования. Уменьшение абсолютного значения границ микротрещинообразования наблюдается при увеличении водоцементного отношения, что отмечено в [7]. Таким образом, применение крупных пористых заполнителей с большим размером зерна нерационально и приводит к ухудшению прочностных и деформативных характеристик бетона.

Однако вид применяемого крупного заполнителя также оказывает существенное влияние на процесс трещинообразования. Например, А. С. Дмитриев [7] получил, что при использовании известняка в качестве крупного заполнителя границы микротрещинообразования выше и трещинообразование протекает интенсивнее, чем для бетона на гранитном заполнителе, поскольку более слабые зерна известняка не могут замедлить процесс трещинообразования, следствием чего является увеличение деформаций в процессе разрушения. Похожая ситуация наблюдается при применении керамзитового щебня: за счет пористой структуры керамзита отсутствует четкая граница по контакту между заполнителем и цементной матрицей, что значительно повышает значения границ микротрещинообразования [6, 13]. Данное утверждение подтверждено также собственными исследованиями: экспериментально установлено, что плотность керамзитобетона оказывает влияние на величину напряжений, соответствующих границам микротрещинообразования, и этот факт может быть учтен в расчете при помощи частных поправочных коэффициентов [14].

Стоит отметить, что использование керамзита влияет не только на прочностные, но и на деформативные характеристики керамзитобетона. Использование прямого метода для определения упругих механических свойств в керамзите затруднено из-за изменения формы заполнителя в разных опытных образцах. Это может привести к различным выводам при оценке свойств. В связи с этим были разработаны различные косвенные методы для оценки упругих характеристик этих заполнителей. В исследовании [9] предложен косвенный подход к оценке упругих механических свойств в сферических ячеистых материалах. Исследователи пришли к выводу, что диаметр сфер играет решающую роль в значении модуля Юнга, в то время как коэффициент Пуассона не меняет

существенного значения в результате изменения диаметра керамзита. Результаты испытаний представлены на рисунке 3.

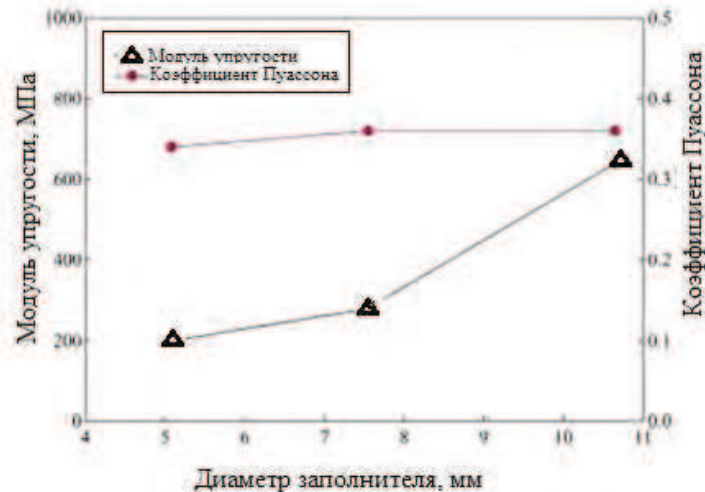


Рис. 3. Зависимость модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν от диаметра частиц заполнителя испытанных образцов керамзита [9]

В результате проведения собственных экспериментальных исследований для керамзитобетонов классов LC 8/10 – LC 30/33 были получены зависимости «Диаметр заполнителя d_g – модуль упругости E_{lc} », «Диаметр заполнителя d_g – коэффициент Пуассона ν_{lc} » иного вида. Эти зависимости представлены на рисунке 5. Размер частиц заполнителя принят по среднему значению используемой фракций, секущий модуль упругости определен для уровня нагружения 0,4. Исходные данные приведены в таблице 1 [15].

Таблица 1

Средний размер частиц заполнителя, опытные значения среднего модуля упругости и коэффициента Пуассона для керамзитобетона различных опытных серий

Класс керамзитобетона	Диаметр заполнителя d_g , мм	Средний модуль упругости E_{lc} , ГПа		Коэффициент Пуассона ν_{lc}	
LC 25/28	7,5	23,9	27,2	0,198	0,196
LC 25/28	7,5	27,2		0,196	
LC 30/33	7,5	30,5		0,194	
LC 8/10	11,25	13	14,3	0,161	0,159
LC 12/15	11,25	14,5		0,174	
LC 16/18	11,25	15,4		0,141	
LC 10/12	15	10,4	10,5	0,173	0,174
LC 10/12	15	10,5		0,174	

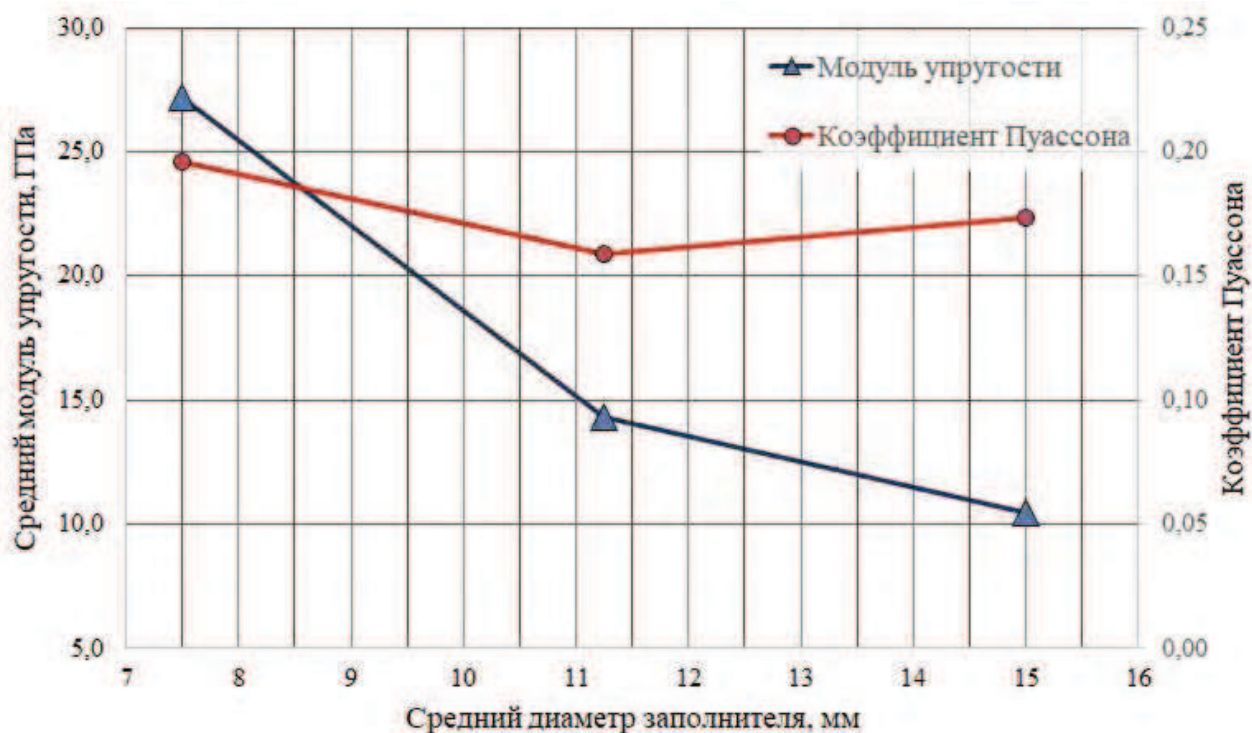


Рис. 4. Зависимость модуля упругости E_{1c} и коэффициента Пуассона ν_{1c} от диаметра частиц заполнителя d_g для испытанных стандартных цилиндрических образцов из керамзитобетона

По полученным данным, очевидно (рисунок 4), что чем мельче фракция керамзита, используемого в качестве крупного заполнителя, тем выше модуль упругости керамзитобетона вне зависимости от класса бетона (с увеличением диаметра зерен керамзитового гравия значение модуля упругости уменьшается более чем в 2 раза). Величина коэффициента Пуассона изменяется незначительно (примерно на 10 %).

Диаграмма деформирования бетона. В Еврокод 2 предложен следующий подход к описанию диаграммы деформирования легких бетонов: за основу принимается диаграмма деформирования бетона на плотных заполнителях с корректировкой параметрических точек путем установления классов легких бетонов (LC) и введением системы специальных частных коэффициентов (например, поправочного коэффициента для расчета модуля упругости η_E) [16].

Отношение модулей E_{lc0}/E'_{1c} разными исследователями принимать постоянным и равным 2 в [17], равным 2,65 в [18], равным 3 в [19]. Однако по данным, приведенным в [20], отношение модулей не является постоянной величиной и может принимать значения от 1,3 до 4,0 при изменении прочности бетона на плотных заполнителях от 7 до 70 МПа.

Значение деформаций ϵ_{1c1} также предлагалось принимать постоянными, однако снова разные ученые получали различные значения: 2 % в [12], 2,5 % в [21], 3 % в [18], 5,5 % в [17]. Согласно Еврокоду 2 величина деформаций ϵ_{1c1} , соответствующих пределу кратковременной прочности легкого бетона,

не остается величиной постоянной и зависит от прочности легкого бетона, модуля упругости, плотности, а также от применяемых заполнителей. Величину ε_{lc1} рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$\varepsilon_{lc} = \frac{k f_{lcm}}{E_{cm} \eta_E}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, принимаемый равным 1,1 для бетона с мелким заполнителем из природного песка; равным 1,0 для бетона с легкими мелким и крупным заполнителями;

f_{lcm} – средняя прочность легкого бетона при осевом кратковременном сжатии, МПа;

E_{cm} – средний модуль упругости бетона на плотных заполнителях;

η_E – поправочный коэффициент для расчета модуля упругости:

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2, \quad (2)$$

здесь ρ – плотность после сушки в печи согласно EN 206-1 (раздел 4) и [16].

Примечательно, что согласно Еврокоду 2 предельные деформации легкого бетона для полной диаграммы деформирования ε_{lcu1} принимаются равными ε_{lc1} [16]. Объяснить это можно тем, что верхняя граница микротрещинообразования очень близка к пределу кратковременной прочности, а при ее достижении накопление деформаций происходит лавинообразно, так как пористый заполнитель не может в достаточной степени замедлить их развитие, что было отмечено также в [7].

Выводы. При производстве конструкционных легких бетонов крайне важно соблюдать рецептуру бетонной смеси и технологию приготовления, в частности, необходимо предварительно увлажнять пористый заполнитель во избежание самовысыхания бетона.

Для получения конструкционных легких бетонов применяются пористый крупный заполнитель и плотный мелкий заполнитель (природный песок). Использование пористого мелкого заполнителя не позволяет получить легкий бетон высокой прочности.

Увеличение фракции крупного заполнителя негативно сказывается на деформативных свойствах керамзитобетона, а величина водоцементного отношения не оказывает существенного влияния ни на прочностные, ни на деформативные характеристики.

Оценка среднего диаметра частиц пористого заполнителя может служить косвенным методом оценки основных деформативных характеристик легкого бетона.

Плотность керамзитобетона оказывает существенное влияние на его деформативность, в частности, на значения границ микротрещинообразования, что может быть учтено в расчете. Плотность и пористость легкого бетона – обратно пропорциональные величины.

1. Rumšys, D. Comparison of Material Properties of Lightweight Concrete with Recycled Polyethylene and Expanded Clay Aggregates / D. Rumšys, D. Bačinskas, E. Spudulis, A. Meškešnas // *Procedia Engineering*, 2017. – Vol. 172. – Pp. 937–944.

2. Ardakani, A. Applied Clay Science The relation between particle density and static elastic moduli of lightweight expanded clay aggregates / A. Ardakani, M. Yazdani // *Applied Clay Science*, 2014. – Vol. 93–94. – Pp. 28–34.

3. Rashad, A.M. Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview / A.M. Rashad // *Construction and Building Materials*, 2018. – Vol. 170. – Pp. 757–775.

4. Ahmad, M.R. B. Experimental research on the performance of lightweight concrete containing foam and expanded clay aggregate / M.R. Ahmad, B. Chen // *Composites Part B: Engineering*, 2019. – Vol. 171. – Pp. 46–60.

5. Hawreen, A. Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes / A. Hawreen, J.A. Bogas // *Construction and Building Materials*, 2019. – Vol. 198. – Pp. 70–81.

6. Chandra, S. Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications / S. Chandra, L. Berntsson. – Norwich, New York, U.S.A.: Noyes Publications / William Andrew Publishing, 2002. – 407 p.

7. Дмитриев, А.С. Деформации и напряжение крупного заполнителя в нагруженном бетоне и методика их исследований / А.С. Дмитриев // *Методы испытания пористых заполнителей легкобетонных смесей и легких бетонов на пористых заполнителях: сб. тр.* – Москва: Стройиздат, 1967. – С. 61–68.

Dmitriev, A.S. Deformacii i napryazhenie krupnogo zapolnitelya v nagruzhennom betone i metodika ih issledovanij / A.S. Dmitriev // *Metody ispytaniya poristyh zapolnitelej legkobetonnyh smesey i legkih betonov na poristyh zapolnitelyah : sb. tr.* – Moskva : Strojizdat, 1967. – S. 61–68.

8. Ахвердов, И.Н. Механика деформирования и разрушения бетона в свете новых исследований по структурообразованию цементного камня / И.Н. Ахвердов // *Доклады на 4 конференции по бетону и железобетону – Рига, 1966.* – С. 51–56.

Ahverdov, I.N. Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya betona v svete novyh issledovanij po strukturoobrazovaniyu cementnogo kamnya / I.N. Ahverdov // *Doklady na 4 konferencii po betonu i zhelezobetonu – Riga, 1966.* – S. 51–56

9. Carneiro, V.H. Inverse engineering approach to determine the elastic properties of lightweight expanded clay / V.H. Carneiro, J. Pereira, V. Lopes, C. Jesus, H. Puga // *Construction and Building Materials*, 2019. – Vol. 216. – Pp. 11–18.

10. Kaplan, M.K. Stresses and strains of concrete at Initiation of cracking and near failure / M.K. Kaplan // *Proceedings, Journal of American Concrete Institute*, 1963. – Vol. 60 (7). – Pp. 853–880.

- 11.** Попов Н.А. Новые виды легких бетонов / Н.А. Попов. – М.: Госстройиздат, 1959. – 83 с.
Popov N.A. Novye vidy legkih betonov / N.A. Popov. – M.: Gosstrojizdat, 1959. – 83 s.
- 12.** Slate, F.S. X-rays for study of internal structure and microcracking of concrete / F.S. Slate, S. Olsefski // Journal of the American Concrete Institute, Proc, 1963. – Vol. 60. – Pp. 575–588.
- 13.** Clarke, J.L. Structural Lightweight Aggregate Concrete / J.L. Clarke. – Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. – 161 p.
- 14.** Semenyuk, S.D. Calculation Method for the Formation of Microcracks Taking Into Account the Density of Claydite Concrete / S.D. Semenyuk, Yu.G. Moskal'kova // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – Voronezh: VSTU, 2019. – Issue No 41 (1). – Pp. 59–67. – Available at: <http://vestnikvgasu.wmsite.ru/Issues/issue-1-41-2019>.
- 15.** Семенюк, С.Д. К определению коэффициента Пуассона и модуля деформаций керамзитобетона / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Москалькова // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць / НУВГП ; редкол. : Є.М. Бабич [та інш.]. – Рівне: Вид-во «Волинські обереги», 2018. – Вип. 35. – С. 111–122.
Semenyuk, S.D. K opredeleniyu koefficienta Puassona i modulya deformacij keramzitobetona / S.D. Semenyuk, YU.G. Moskal'kova // Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi: zb. nauk. prac" / NUVGP ; redkol. : Є.М. Babich [ta insh.]. – Rivne: Vid-vo «Volins'ki oberegi», 2018. – Vip. 35. – S. 111–122.
- 16.** Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1: Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009* (02250). Еврокод 2. – Переиздание (июнь 2015 г.) с Изменением № 1 (введено в действие с 01.04.2015): введ. 01.01.2010. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва РБ, 2015. – 205 с.
Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij. CHast' 1-1: Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy: ТКП EN 1992-1-1-2009* (02250). Evrokod 2. – Pereizdanie (iyun' 2015 g.) s Izmeneniem № 1 (vvedeno v dejstvie s 01.04.2015): vved. 01.01.2010. – Minsk: M-vo arhitektury i str-va RB, 2015. – 205 s.
- 17.** Hsu, T.C. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve / T.C. Hsu, F.O. Slate, G.M. Sturman, G. Winter // Proc. Am. Concr. Inst. , 1963. – Vol. 60 (2). – Pp. 209–224.
- 18.** Sehleicher, K. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik / K. Sehleicher // Journal de Mathématiques et de Physique appliqués, 1925. – Vol. 154. – Pp. 219–240.
- 19.** Smith, G.M. Ultimate flexural analysis based on stress-strain curves of cylinders / G.M. Smith, L.E. Young // Journal of American Concrete Institute, 1956. – Vol. 53 (6). – Pp. 597–609.
- 20.** Desayi, P. Equation of the stress-strain curve of concrete / P. Desayi, S. Krishnan // Journal of American Concrete Institute, 1964. – Vol. 61(9). – Pp. 1229-1235.
- 21.** Turner, P.W. Stiff constant stain mate, testing machine / P.W. Turner, P.P. Barnard // The Engineer, 1962. – Vol. 214. – Pp. 146–148.