

Семенюк Слава Денисович, д-р техн. наук,
заведующий кафедрой «Строительные конструкции
здания и сооружения», Белорусско-Российский
университет, г. Могилев.

Мельянцова Ирина Игоревна, аспирант,
Белорусско-Российский университет, г. Могилев

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ЛЕГКОГО БЕТОНА КЛАССА 16/20 НА ОСНОВЕ КЕРАМЗИТА БЕЛАРУСИ

STRENGTH AND DEFORMABILITY LIGHTWEIGHT CONCRETE OF CLASS 16/20 BASED ON CLAYDITE OF BELARUS

Аннотация

В статье приведены результаты экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик легких бетонов класса 16/20 при кратковременном центральном сжатии. По данным испытаний бетона в возрасте 7, 14, 28, 60 суток определены кубиковая и призмная прочностии, модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, пределы микротрещинообразования легкого бетона.

Abstract

The article presents the results of experimental and researches of the strength and deformation characteristics of lightweight concrete of class 16/20 during short-term axial compression. According to tests of concrete at the age of 7, 14, 28, 60 days were determined cube and prism strength, modulus of longitudinal and lateral deformations, shear modulus, limits of lightweight concrete microcrack formation.

ВВЕДЕНИЕ

Легкие бетоны средней прочности на основе керамзитового гравия широко используются в промышленном и гражданском строительстве, в частности, в монолитном домостроении, а также для производства стеновых панелей сельскохозяйственных, промышленных и гражданских зданий. Однако для соответствия белорусских нормативных документов с Еврокодом необходимо уточнить некоторые прочностные и деформативные характеристики легких бетонов, что для Республики Беларусь является актуальным. С этой

целью были проведены экспериментальные исследования образцов из легкого бетона класса 16/20 в виде кубов, цилиндров и призм на кратковременное центральное сжатие в соответствии с [1].

ХАРАКТЕРИСТИКА ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сегодня в Республике Беларусь заводы керамзитового гравия – Новолукомльский, Петриковский, Лидский и другие выпускают керамзит марок по насыпной плотности М250-М700 с относительной прочностью в цилиндре по СТБ 1217-2000 от 1 до 4 МПа [2].

Нами для выявления прочностных и деформативных характеристик легкого бетона класса 16/20 использовался керамзитовый гравий фракций 5–10 мм и 10–20 мм в качестве крупного заполнителя с относительной прочностью в цилиндре 2,68 МПа и 1,86 МПа соответственно. В качестве мелкого заполнителя служил песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр} = 1,8$, вяжущим служил портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500.

Состав керамзитобетонной смеси: Ц : П : Г = 1 : 1, 84 : 0,79 при водоцементном отношении В/Ц = 0,46. Плотность легкого бетона в возрасте 28 суток оказалась равной 1545 кг/м³.

Было заформовано и испытано 12 кубов с размерами ребра 150 мм, восемь кубов с размерами ребра 100 мм, восемь цилиндров диаметром 150 мм и высотой 310 мм, восемь призм размерами 150 × 150 × 600 мм. Экспериментальные образцы находились в естественных температурно-влажностных условиях лаборатории, где и выполнялось их исследование на кратковременное действие нагрузки. Испытания проводились в возрасте 7, 14, 28 и 60 суток.

В каждом возрасте испытывалось по три куба с размерами ребра 150 мм, два куба с размерами ребра 100 мм, две призмы размерами 150 × 150 × 600 мм и два цилиндра диаметром 150 мм и высотой 310 мм.

Для изготовления образцов использовались инвентарные металлические сборно-разборные формы. Бетонную смесь приготавливали в лабораторных условиях вручную. Составы дозировали по весу. Отформованные образцы, предназначенные для испытаний на сжатие, в течение четырех суток выдерживались в металлоформах, покрытых влажной тканью. Распалубливание проводилось на шестые сутки.

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями [1]. Нагружение призм образцов до их разрушения производилось с постоянной скоростью роста напряжений ($0,6 \pm 0,2$ МПа/с) ступенями, равными 10 %

от ожидаемой разрушающей нагрузки. Значение ожидаемой разрушающей нагрузки при испытании призм принималось равным 80–85 % от средней разрушающей нагрузки образцов-кубов. При испытании призм измерялись продольные деформации индикаторами часового типа, с ценой деления 0,01 мм при базе 370...375 мм, установленными вдоль оси по четырем граням. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм при базе 110..115 мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырех приборов механического действия) усреднялись. При отдельных отсчетах, резко отличавшихся от среднего, эти отсчеты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных деформаций исключались.

Средняя кубиковая прочность образцов в возрасте 7 суток составила 16,04 МПа; 14 суток – 18,1 МПа; 28 суток – 20,56 МПа; 60 суток – 21,47 МПа.

Средняя призмная прочность исследуемых образцов в возрасте 7 суток составила 13,11 МПа; 14 суток – 14,68 МПа; 28 суток – 16,21 МПа; 60 суток – 17,56 МПа, а коэффициенты призмной прочности – 0,82; 0,81; 0,79; 0,82 соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА ИССЛЕДУЕМОГО КЛАССА

В работах [3,4] показано, что зависимость «секущий модуль продольных деформаций – напряжение или уровень напряжений» ($E_c - \sigma$), ($E_c - \eta$) при кратковременном центральном сжатии бетонных призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с большей достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (1), а непосредственно вытекающая из нее зависимость «напряжение-деформация» – корреляционной зависимостью (2) гиперболического вида:

$$E_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{c(\sigma)}} = E_{c(0)} \cdot [1 - \lambda_{\sigma} \cdot \eta]; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{c(\sigma)} = \frac{\sigma}{E_{fc}} = \frac{\sigma}{E_{c(0)} \cdot \left[1 - \lambda_{fc} \cdot \frac{\sigma}{f_c} \right]}, \quad (2)$$

где η – уровень напряжений,

$E_{c(0)}$ – истинный модуль упругости бетона (секущий модуль деформации при $\sigma = 0$);

λ_{fc} – предельное значение коэффициента пластичности бетона при $\sigma = f_c$.

Приведенная статистическая обработка результатов испытаний бетонных призм показала, что линейные корреляционные зависимости «секущие модули деформаций-напряжений или уровень напряжений» имеют место и для поперечных и сдвиговых деформаций:

$$E_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{v(\sigma)}} = E_{v(0)} \cdot \left[1 - \lambda_{v(fc)} \cdot \eta \right]; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{v(\sigma)} = \frac{\sigma}{E'_{v(\sigma)}} = \frac{\sigma}{E_{v(0)} \left[1 - \lambda_{v(fc)} \frac{\sigma}{f_c} \right]}; \quad (4)$$

$$G_{\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{G(\sigma)}} = \frac{\sigma}{2 \left[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)} \right]} = G_{(0)} \left[1 - \lambda_{Gfc} \frac{\sigma}{f_c} \right]; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G(\sigma)} = \frac{\sigma}{G_0 \left[1 - \lambda_{G(fc)} \frac{\sigma}{f_c} \right]}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{G(\sigma)} = 2 \cdot \left[\varepsilon_{c(\sigma)} + \varepsilon_{v(\sigma)} \right], \quad (7)$$

где $E_{v(\sigma)}$, $G_{(\sigma)}$ – секущие модули поперечных упругопластических деформаций и деформаций сдвига;

$\varepsilon_{v(\sigma)}$, $\varepsilon_{G(\sigma)}$ – соответствующие вышеуказанным секущим модулям деформаций упругопластические поперечные деформации и деформации сдвига при сжатии;

$E_{v(0)}$, G_0 – испытанные значения модулей упругих поперечных и сдвиговых деформаций;

$\lambda_{v(fc)}$, $\lambda_{G(fc)}$ – коэффициенты пластичности по поперечным и сдвиговым деформациям при напряжении $\sigma = f_c$.

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (1), (3), (5) устанавливаются статистически методами линейной корреляции.

Величиной, выражающей прямолинейную зависимость между двумя свойствами, является коэффициент корреляции. Чем ближе коэффициент корреляции к единице, тем больше связь между изучаемыми свойствами.

Коэффициент корреляции r вычисляют по формуле:

$$r = \frac{\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_1^n X_c^2 \cdot Y_c^2}}, \quad (8)$$

где $\sum_1^n (X_c \cdot Y_c)$ – отклонений отдельных вариант V_x, V_y от соответствующих им средних арифметических M_x и M_y ;
 n – число наблюдений.

Средняя ошибка коэффициента корреляции определяется по формуле:

$$m_r = \pm \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

Достоверность коэффициента корреляции (линейного корреляционного уравнения или связи) оценивается отношением коэффициента корреляции r к его средней ошибке m_r . Если это отношение равно 4 или больше, то коэффициент корреляции считается достоверным и наличие связи между двумя свойствами доказано, в противном случае – нельзя сделать заключение о достоверности связи между изучаемыми свойствами.

Линейное корреляционное уравнение представлено следующей формулой:

$$Y = M_y + r \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (X - M_x), \quad (10)$$

где σ_x, σ_y – средние квадратические отклонения.

Статистика линейных корреляционных зависимостей по усредненным показателям для испытанных призм показала, что достоверность линейности довольно высока, то есть коэффициент корреляции близок к единице, а его достоверность значительно больше четырех.

Для выявления зависимостей и получения линейных уравнений были обработаны опытные данные для образцов в возрасте 14 суток, представленные в табл. 1 и 2 (для образцов остальных возрастов вычисления проводились аналогично).

Результаты проведенных исследований отражены в табл. 3.

По результатам обработки опытных данных, полученных при испытании призмных образцов, построены диаграммы зависимостей

Таблица 1

Сопоставление опытных и теоретических (опытно-корреляционных) значений продольных относительных деформаций ε , секущего модуля деформаций E' , касательного модуля деформаций E и коэффициента упругости бетона ν

| Опытная величина (по показаниям приборов) | | | | Теоретическая величина (корреляционная) | | | | Отклонение | | | | |
|---|--------------------|-----------------------------------|---------------------|---|-------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|-------|--------------------------|------------------------------|----------------|
| σ , МПа | Уровень нагружения | $\varepsilon \cdot 10^{-5}$, МПа | $E', 10^{-4}$, МПа | $E, 10^{-4}$, МПа | ν | $\varepsilon \cdot 10^{-5}$, МПа | $E', 10^{-4}$, МПа | $E, 10^{-4}$, МПа | ν | $\Delta \varepsilon$, % | $\Delta E' = \Delta \nu$, % | ΔE , % |
| 0,00 | 0,000 | 0,00 | — | 2,486 | 1,000 | 0 | 2,486 | 2,486 | 1,000 | 0 | 0 | 0 |
| 1,32 | 0,090 | 5,47 | 2,415 | 2,346 | 0,971 | 5,57 | 2,370 | 2,260 | 0,953 | 1,9 | -1,8 | -1,8 |
| 2,65 | 0,181 | 11,54 | 2,297 | 2,122 | 0,924 | 11,76 | 2,254 | 2,043 | 0,906 | 1,9 | -1,9 | -1,9 |
| 3,97 | 0,270 | 20,65 | 1,923 | 1,487 | 0,773 | 18,57 | 2,138 | 1,838 | 0,860 | -10 | 11,2 | 11,2 |
| 5,30 | 0,361 | 29,75 | 1,781 | 1,276 | 0,716 | 26,22 | 2,021 | 1,643 | 0,813 | 11,9 | 13,5 | 13,5 |
| 6,62 | 0,451 | 30,97 | 2,138 | 1,838 | 0,860 | 34,75 | 1,905 | 1,460 | 0,766 | 12,2 | -11 | -11 |
| 7,95 | 0,542 | 41,92 | 1,896 | 1,446 | 0,763 | 44,45 | 1,789 | 1,287 | 0,719 | 6,0 | -5,7 | -5,7 |
| 7,95 | 0,542 | 41,92 | 1,896 | 1,446 | 0,763 | 44,45 | 1,789 | 1,287 | 0,719 | 6,0 | -5,7 | -5,7 |
| 9,27 | 0,631 | 53,37 | 1,737 | 1,213 | 0,699 | 55,42 | 1,673 | 1,125 | 0,673 | 3,8 | -3,7 | -3,7 |
| 9,27 | 0,631 | 53,37 | 1,737 | 1,213 | 0,699 | 55,42 | 1,673 | 1,125 | 0,673 | 3,8 | -3,7 | -3,7 |
| 10,60 | 0,722 | 68,60 | 1,545 | 0,960 | 0,621 | 68,12 | 1,556 | 0,974 | 0,626 | -0,7 | 0,7 | 0,7 |
| 10,60 | 0,722 | 68,60 | 1,545 | 0,960 | 0,621 | 68,12 | 1,556 | 0,974 | 0,626 | -0,7 | 0,7 | 0,7 |
| 11,92 | 0,812 | 85,96 | 1,387 | 0,773 | 0,558 | 82,77 | 1,440 | 0,834 | 0,579 | -3,7 | 3,8 | 3,8 |
| 11,92 | 0,812 | 85,96 | 1,387 | 0,773 | 0,558 | 82,77 | 1,440 | 0,834 | 0,579 | -3,7 | 3,8 | 3,8 |
| 13,25 | 0,903 | 105,76 | 1,253 | 0,631 | 0,504 | 100,12 | 1,323 | 0,704 | 0,532 | -5,3 | 5,6 | 5,6 |
| 13,25 | 0,903 | 105,76 | 1,253 | 0,631 | 0,504 | 100,12 | 1,323 | 0,704 | 0,532 | -5,3 | 5,6 | 5,6 |
| 14,57 | 0,993 | 115,64 | 1,260 | 0,638 | 0,507 | 120,66 | 1,208 | 0,586 | 0,486 | 4,3 | -4,2 | -4,2 |
| 14,68 | 1,000 | 121,73 | 1,206 | 0,585 | 0,485 | 122,55 | 1,198 | 0,577 | 0,482 | 0,7 | -0,7 | -0,7 |

К вычислению коэффициента корреляции

| $V_x = \sigma$, МПа | ε | V_y | X_c | X_c^2 | Y_c | Y_c^2 | Z_c | Z_c^2 |
|-------------------------|---------------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 1,32 | 5,47 | 2,42 | 7,80 | 60,89 | -0,73 | 0,53 | 7,07 | 50,03 |
| 2,65 | 11,54 | 2,30 | 6,47 | 41,90 | -0,61 | 0,37 | 5,86 | 34,36 |
| 3,97 | 20,65 | 1,92 | 5,15 | 26,55 | -0,24 | 0,06 | 4,92 | 24,16 |
| 5,30 | 29,75 | 1,78 | 3,82 | 14,61 | -0,10 | 0,01 | 3,73 | 13,89 |
| 6,62 | 30,97 | 2,14 | 2,50 | 6,26 | -0,45 | 0,20 | 2,05 | 4,21 |
| 7,95 | 41,92 | 1,90 | 1,17 | 1,38 | -0,21 | 0,04 | 0,96 | 0,93 |
| 7,95 | 41,92 | 1,90 | 1,17 | 1,38 | -0,21 | 0,04 | 0,96 | 0,93 |
| 9,27 | 53,37 | 1,74 | -0,15 | 0,02 | -0,05 | 0,00 | -0,20 | 0,04 |
| 9,27 | 53,37 | 1,74 | -0,15 | 0,02 | -0,05 | 0,00 | -0,20 | 0,04 |
| 10,60 | 68,60 | 1,55 | -1,48 | 2,18 | 0,14 | 0,02 | -1,34 | 1,79 |
| 10,60 | 68,60 | 1,55 | -1,48 | 2,18 | 0,14 | 0,02 | -1,34 | 1,79 |
| 11,92 | 85,96 | 1,39 | -2,80 | 7,82 | 0,30 | 0,09 | -2,50 | 6,24 |
| 11,92 | 85,96 | 1,39 | -2,80 | 7,82 | 0,30 | 0,09 | -2,50 | 6,24 |
| 13,25 | 105,76 | 1,25 | -4,13 | 17,03 | 0,43 | 0,19 | -3,69 | 13,65 |
| 13,25 | 105,76 | 1,25 | -4,13 | 17,03 | 0,43 | 0,19 | -3,69 | 13,65 |
| 14,57 | 115,64 | 1,26 | -5,45 | 29,67 | 0,43 | 0,18 | -5,02 | 25,21 |
| 14,68 | 121,73 | 1,21 | -5,56 | 30,88 | 0,48 | 0,23 | -5,08 | 25,78 |

«секущий модуль деформаций – уровень нагружения». На рис. 1 изображена зависимость «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов в возрасте 14 суток.

При нагружении бетонного образца длительным напряжением, меньшим либо равным нижней границе микротрещинообразования, в бетоне не возникает микроразрушения. При действии напряжений в пределах границ нижнего и верхнего микротрещинообразований в бетоне возникают микроразрушения, но их количество не приводит к разрушению материала. Если длительное напряжение больше верхней границы микротрещинообразования, в бетоне происходит накопление и развитие микроразрушений вплоть до его разрушения.

Характеристика бетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей

| Возраст, сут | $f^G_{субе^2}$, МПа | $f_{дк^2}$, МПа | $f^v_{срс}$ | | $f^0_{срс}$ | | Зависимость | Уравнение, МПа | r | r/m_r |
|--------------|----------------------|------------------|-------------|-------|-------------|------|-----------------------------|-------------------------------|---------|---------|
| | | | η | МПа | η | МПа | | | | |
| 7 | 16,04 | 13,11 | 0,857 | 11,24 | 0,538 | 7,06 | $E_{\epsilon(\sigma)}-\eta$ | 1,795 (1-0,023 σ) | -0,9883 | 147,5 |
| | | | | | | | $E_{\nu(\sigma)}-\eta$ | 17,580 (1-0,073 σ) | -0,7921 | 7,36 |
| | | | | | | | $G_c-\eta$ | 0,808 (1-0,034 σ) | -0,9756 | 70,18 |
| 14 | 18,1 | 14,68 | 0,812 | 11,92 | 0,531 | 7,8 | $E_{\epsilon(\sigma)}-\eta$ | 2,4884 (1-0,035 σ) | -0,9523 | 42,16 |
| | | | | | | | $E_{\nu(\sigma)}-\eta$ | 14,474 (1-0,048 σ) | -0,9482 | 37,71 |
| | | | | | | | $G_c-\eta$ | 1,066(1-0,038 σ) | -0,9602 | 50,77 |
| 28 | 20,56 | 16,21 | 0,776 | 12,58 | 0,505 | 8,18 | $E_{\epsilon(\sigma)}-\eta$ | 1,687 (1-0,014 σ) | -0,9397 | 43,77 |
| | | | | | | | $E_{\nu(\sigma)}-\eta$ | 16,224 (1-0,05 σ) | -0,9357 | 60,2 |
| | | | | | | | $G_c-\eta$ | 0,843 (1-0,026 σ) | -0,9874 | 162,34 |
| 60 | 21,47 | 17,56 | 0,755 | 13,25 | 0,459 | 8,06 | $E_{\epsilon(\sigma)}-\eta$ | 1,749 (1-0,014 σ) | -0,9458 | 39,11 |
| | | | | | | | $E_{\nu(\sigma)}-\eta$ | 13,264 (1-0,041 σ) | -0,8479 | 13,15 |
| | | | | | | | $G_c-\eta$ | 1,205 (1-0,022 σ) | -0,9751 | 84,26 |

Верхний предел микротрещинообразования $f^v_{срс}$ определялся графически путем построения по экспериментальным данным зависимости «объемная деформация – уровень нагружения». По пиковой точке диаграммы $\epsilon^v-\eta$ находился верхний предел микротрещинообразования $f^v_{срс}$ (рис. 2).

Определение нижнего предела микротрещинообразования $f^0_{срс}$ также графически по экспериментальным данным. Сначала строилась зависимость «уровень нагружения – коэффициент Пуассона», при этом коэффициент Пуассона определялся как отношение поперечных относительных деформаций к продольным (рис. 3).

Путем нахождения первой $\frac{dv}{d\eta}$ и второй $\frac{d^2v}{d\eta^2}$ производных был графически определен предел нижнего микротрещинообразования (рис. 4 и 5).

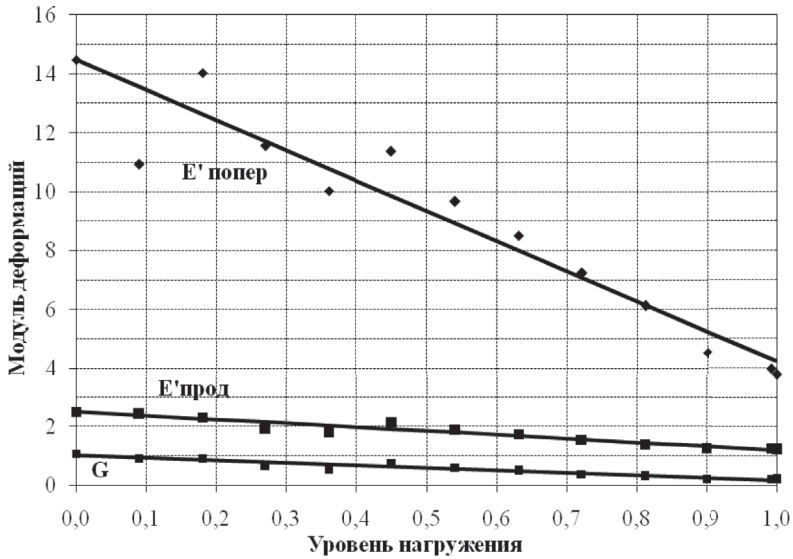


Рисунок 1. Опытные и теоретические зависимости «секущий модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов в возрасте 14 суток

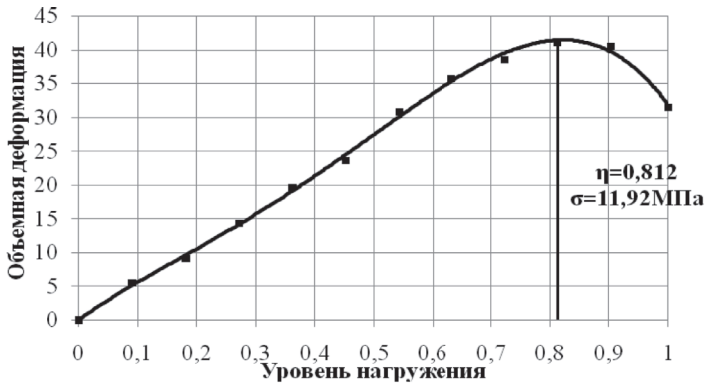


Рисунок 2. Корреляционные зависимости «уровень нагружения – объемные деформации» для образцов в возрасте 14 суток

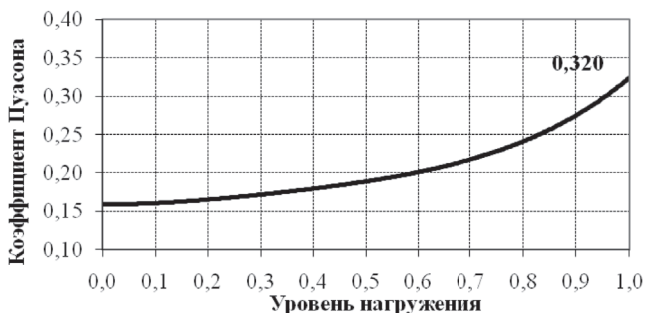


Рисунок 3. Корреляционные зависимости «уровень нагружения – коэффициент Пуассона» для образцов в возрасте 14 суток

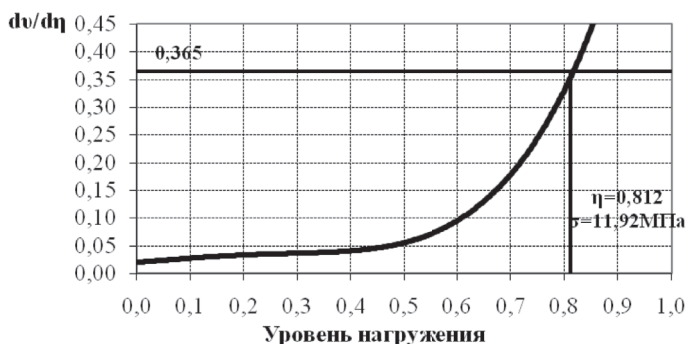


Рисунок 4. Корреляционные зависимости «первая производная» для образцов в возрасте 14 суток

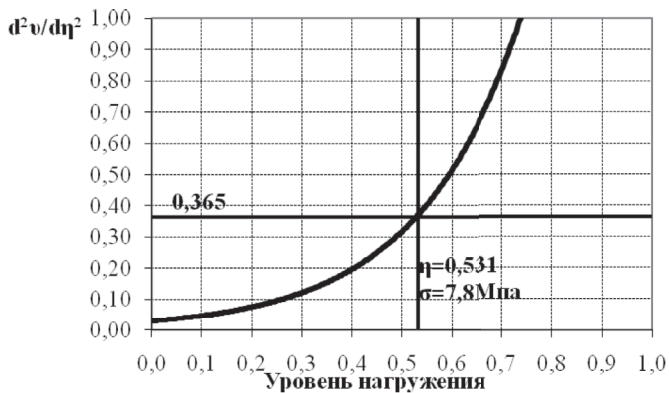


Рисунок 5. Корреляционные зависимости «вторая производная» для образцов в возрасте 14 суток

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных нами экспериментальных исследованиях для образцов из керамзитобетона класса 16/20 были определены следующие характеристики: кубиковая и призмная прочности, модули деформаций, модуль сдвига, объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования. Проведение дальнейших исследований в определении прочности и деформативности легких бетонов других классов позволит определить их нормативные и расчетные характеристики, а также получить трансформированные диаграммы деформирования легкого бетона на основе керамзитового гравия для различных классов.

Список использованных источников

1. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. ГОСТ 24452-80. – Госкомитет СССР по делам строительства – М., 1981. – 20 с.
2. Гравий, щебень и песок искусственные пористые. Технические условия. СТБ 1217-2000. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2001. – 18 с.
3. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2001. – № 1. – С. 40–44.
4. Семенюк, С.Д. Железобетонные и пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монография / С.Д. Семенюк. – Могилев: Белор.-Рос. Ун-т, 2003. – 269 с.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.

Статья поступила в редколлегию 02.12.2013