

В. И. ПЕТРОВ, А. В. БИЛЬЧЕНКО, Р. А. КОТИКЯН

О КОЭФФИЦИЕНТЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

При исследовании влияния ползучести на напряженно-деформированное состояние элементов конструкций, работающих в условиях многократного воздействия нагрузок, вопросы определения коэффициентов поперечных деформаций бетона  $\nu_1(\tau)$  и  $\nu_2(t, \tau)$  занимают первостепенное значение. Наряду с основными физическими характеристиками бетона  $E(\tau)$  и  $C(t, \tau)$  эти коэффициенты входят в уравнения теории упруго-ползучего тела в общем случае трехмерного напряженного состояния. В предположении одинаковой ползучести бетона при растяжении и сжатии указанные характеристики связаны [1] между собой зависимостью  $\sigma(t, \tau) = 2C(t, \tau)[1 - \nu_2(t, \tau)]$  без каких-либо ограничений величины коэффициента поперечной деформации ползучести  $\nu_2(t, \tau)$ .

На современном этапе развития теории ползучести бетона решения ее основных задач в основном получены при условии равенства во времени коэффициентов  $\nu_1(\tau)$  и  $\nu_2(t, \tau)$

$$\nu_1(\tau) = \nu_2(t, \tau) = \nu = \text{const} \quad (1)$$

Проведенные к настоящему времени исследования показывают, что принятая в теории упруго-ползучего тела предпосылка (1) экспериментально не подтверждается. Так, в опытах одних авторов [5, 6] коэффициент  $\nu_2(t, \tau)$  был равен нулю, других [10] — находился в пределах  $0 < \nu_2(t, \tau) = \nu_2(\tau)$ , а в некоторых [2, 3, 7, 8, 9] — был больше  $\nu_2(\tau)$ . В настоящих исследованиях для более точного определения значений коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  авторы стремились к выполнению двух основных условий: разработке способов измерения таких малых величин, какими являются поперечные деформации ползучести, а также устранению влияния концентратора на их развитие. Общепринятая методика исследования ползучести бетона на линейных элементах (призмах) не устраняет этих недостатков, так как никакие прокладки не могут полностью исключить влияние трения между бетоном и нагружающими поверхностями, а точность измерительных приборов, устанавливаемых на малой базе в поперечном направлении образца, зачастую оказывается соизмеримой с величинами поперечных деформаций ползучести.

В работе [4] была разработана методика проведения длительных испытаний на плоских образцах, позволяющая в значительной степени

устранить перечисленные выше недостатки. Эта методика и была принята при проведении описываемых ниже опытов.

Исследовались деформации ползучести неизолированного бетона, повергнутого одноосному и двухосному сжатию, а также особенности развития коэффициентов  $\nu_1(\tau)$  и  $\nu_2(t, \tau)$  в зависимости от величины сжимающих напряжений. В качестве экспериментальных образцов были применены плиты с размерами  $220 \times 220 \times 30$  мм, изготовленные из тяжелого бетона марки 300 состава 1:1, 7:3.4 (по весу)  $B_{12} = 0.49$  на мелком гранитном щебне. Продольные и поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0.001 мм, установленными на базе 100 мм попарно во взаимно перпендикулярных направлениях одновременно с двух сторон. Крепление индикаторов осуществлялось при помощи винтов к металлическим закладным деталям, заложенным в образцы при их бетопировании.

Нагружение образцов осуществлялось по торцам при помощи двух пар резиновых камер, заполненных жидкостью под давлением, создаваемым и поддерживаемым в течение всего эксперимента рычажно-гидравлической установкой. При отключении одной пары камер осуществлялось одноосное нагружение.

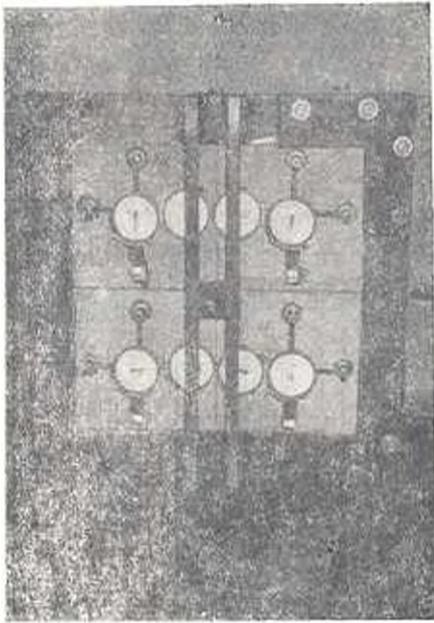
Давление жидкости на все стороны было одинаковым, торцы резиновых камер упирались в жесткую металлическую обойму. Толщина стенок резиновой камеры была 2–3 мм, поэтому в зазоре между металлической рамкой и плиткой резина не выдвигалась. Что касается касательных усилий, которые могут появляться у пластин за счет того, что коэффициент Пуассона резины больше, чем бетона, то ими можно пренебречь, так как при выбранной методике эксперимента не вызываются большие деформации резины. Таким образом, усилия, действующие на торцы резиновых камер не могли передаваться на бетонные пластины (фиг. 1).

Для определения усадочных деформаций параллельно были поставлены ненагруженные образцы-близнецы. Возраст бетона к моменту нагружения составлял 7 и 8 суток.

Результаты измерений коэффициента поперечной деформации  $\nu(\tau)$ , определенного как отношение полных поперечных деформаций к продольным в процессе нагружения плит, приведены на фиг. 2. При определении  $\nu(\tau)$  из продольных и поперечных деформаций не были исключены деформации ползучести, появляющиеся в процессе нагружения образцов. Представленные на графиках значения  $\nu(\tau)$  не равны значениям коэффициента поперечных упругих деформаций  $\nu_1(\tau)$ , а несколько меньше его, так как в направлении действия нагрузки деформации ползучести всегда больше, чем в поперечном. Тем не менее на основании полученных данных можно сделать вывод, что при нагрузках  $\sigma = (0.15 - 0.5)R_{\text{пр}}$ , соответствующих границе трещинообразования  $R_{\text{тр}}$ , коэффициент  $\nu(\tau)$  изменяется незначительно (от 0.15 до 0.2) и может быть принят постоянным, не зависящим от уровня сжимающих

напряжений и равным своему среднему значению  $\nu(\tau) = 0.175$ . Поэтому при  $\sigma \leq R_0$  за величину коэффициента  $\nu_1(\tau)$  в исследуемом диапазоне возрастов бетона к моменту нагружения можно принять значение  $\nu(\tau)$  и считать его постоянным и не зависящим от  $\tau$ :

$$\nu_1(\tau) = \nu(\tau) = \nu = \text{const} \quad (2)$$



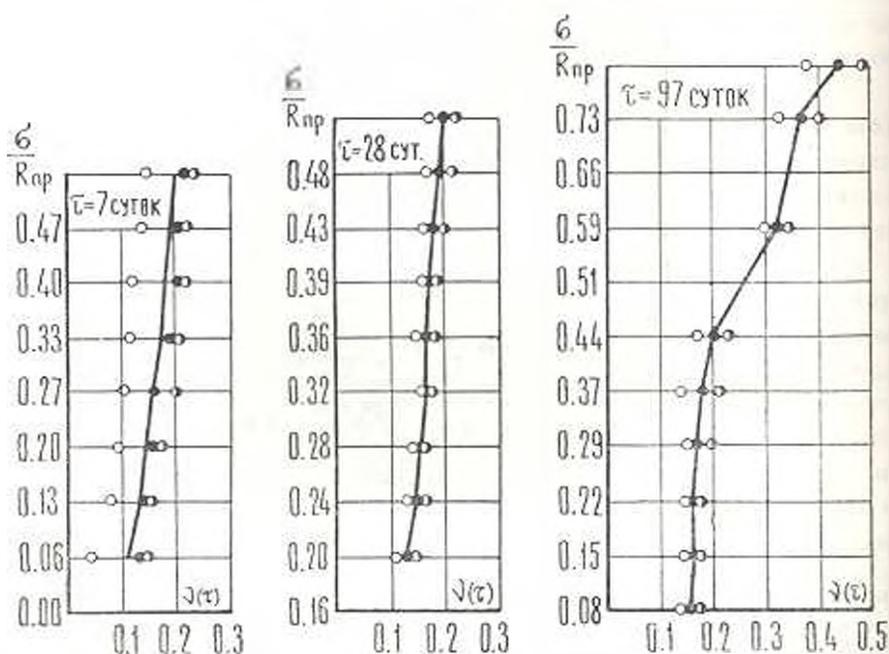
Фиг. 1.

При напряжениях  $\sigma > (0.45 - 0.5)R_{np}$  значения коэффициента  $\nu(\tau)$  начинают резко возрастать, что свидетельствует о появлении необратимых микротрещин, и при напряжениях  $\sigma \sim 0.88 R_{sp}$  достигают величины  $\approx 0.45$ .

На фиг. 3 представлены результаты измерений продольных и поперечных (в плоскости образца) деформаций одноосно нагруженных плит. К сожалению, из-за незначительной толщины (30 мм) не удалось проследить развитие поперечных деформаций ползучести плиты и определить степень влияния анизотропии бетона (плиты бетонировались в горизонтальном положении) на характер изменения коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$ .

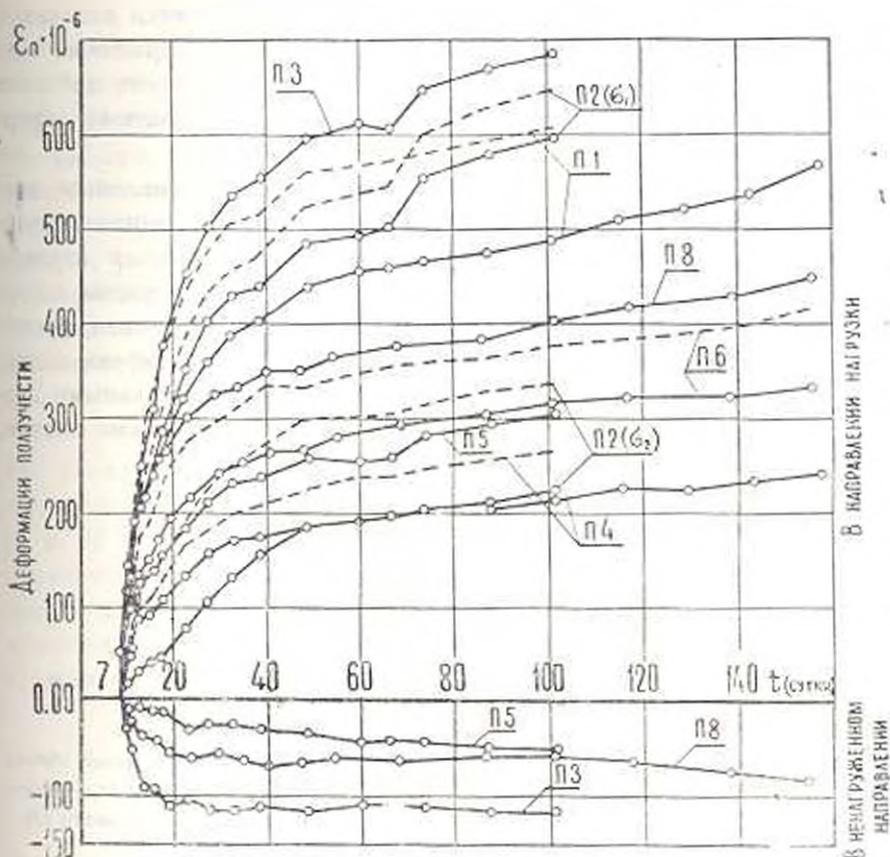
Из графиков видно, что поперечные деформации ползучести наиболее интенсивно нарастали в течение первых 20—30 суток с момента нагружения, в дальнейшем их рост замедлялся и наблюдалась тенденция к стабилизации. В направлении действия нагрузки активный рост деформаций ползучести наблюдался значительно дольше (примерно 50—55 суток), что и предопределяло характер изменения коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  во времени (фиг. 4).

Коэффициент поперечной деформации ползучести  $\nu_2(t, \tau)$ , определенный как отношение поперечных деформаций ползучести к продольным, достиг своего максимального значения в первые сутки после нагружения, а затем постепенно уменьшился до величины, примерно равной значению коэффициента  $\nu_2(\tau)$ , что объясняется большей скоростью затухания поперечных деформаций ползучести по сравнению с продольными. При  $t = \tau > 90$  суток значения коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  оставались практически неизменными и постоянными во времени. При этом большему значению относительных сжимающих напряжений соответствовала и большая величина коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$ . Аналогичный характер



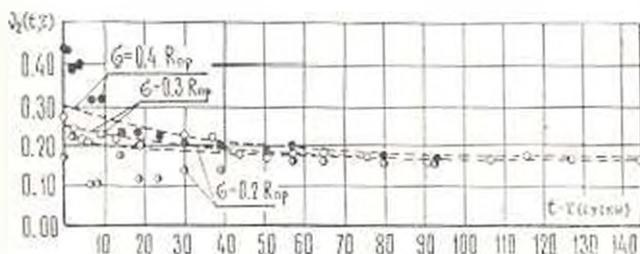
Фиг. 2. Изменение коэффициента поперечной деформации  $\nu(\tau)$  при кратковременных испытаниях плит.

изменения коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  во времени был отмечен и другими исследователями [2, 3, 7]. Так в опытах С. В. Александровского [2], О. Я. Берга и А. И. Рожкова [3] и А. В. Яшина [7] с призмами начальный период резкого увеличения коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  составил от 2–4 до 15–20 сут. соответственно. С увеличением значений относительных сжимающих напряжений величина этого периода уменьшалась и при  $\sigma > R_p$  приближалась к одним суткам. В опытах авторов получено одно существенное отличие в очертаниях кривых в начальный после нагружения период. Коэффициент поперечной деформации ползучести резко возрос в первые сутки после нагружения (фиг. 4). Причина такого различия, по нашему мнению, заключается в отсутствии сдерживающего влияния сил трения на контакте бетона с нагружающими поверхностями на развитие поперечных деформаций ползучести.



Фиг. 3. Опытные кривые деформации ползучести плит. Условные обозначения: П1 ( $\sigma_x = \sigma_y = 0.4 R_{np}$ ); П2 ( $\sigma_x = 0.4 R_{np}$ ,  $\sigma_y = 0.2 R_{np}$ ); П3 ( $\sigma_x = 0.4 R_{np}$ ,  $\sigma_y = 0.0$ ); П4 ( $\sigma_x = \sigma_y = 0.2 R_{np}$ ); П5 ( $\sigma_x = 0.2 R_{np}$ ,  $\sigma_y = 0.0$ ); П6 ( $\sigma_x = \sigma_y = 0.3 R_{np}$ ); П8 ( $\sigma_x = 0.3 R_{np}$ ,  $\sigma_y = 0.0$ ).

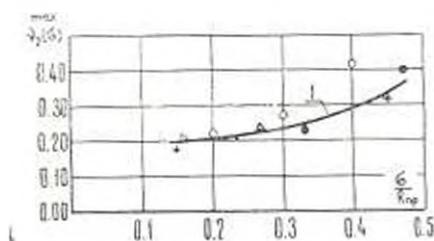
— кривые, построенные с использованием принципа наложения.



Фиг. 4. Развитие во времени коэффициентов поперечной деформации ползучести бетона  $\nu_2(t, \tau)$  (пунктиром показаны кривые по зависимости (5)).

Уменьшение периода начального роста коэффициента поперечной ползучести  $\gamma_2(t, \tau)$  в работах [2, 3, 7] при напряжениях, близких к границе трещинообразования, объясняется появлением обратимых микротрещин\* и разрывов в плоскостях, параллельных плоскости действия нагрузки, что приводит к интенсивному развитию поперечных деформаций ползучести.

На фиг. 5 нанесены точки, соответствующие максимальным значениям коэффициента поперечной ползучести  $\gamma_2(t, \tau)$  для незакаленного бетона естественного твердения, полученные в опытах авторов и других исследователей. Несмотря на значительные различия в составах бетонов, их прочности, возраста к моменту загрузки, расположение точек на графиках достаточно закономерно. Из графика видно, что существует четкая нелинейная связь между максимальными значениями коэффициента поперечной ползучести и напряжениями сжатия,



Фиг. 5. Изменение максимальных значений коэффициента  $\gamma_2^{max}(\sigma)$ . Условно обозначения: о — опыты авторов, ● — опыты О. Я. Берга и А. И. Рожкова, △ — опыты Гопалакришнана К. С., + — опыты Ханафта Д. Я. 1 — кривая по зависимости (3).

а естественный разброс опытных данных относительно их средней величины не выходит за допустимые пределы. Рост коэффициента поперечной ползучести в начальный после нагружения период тем значительнее, чем больше величина приложенного к образцу напряжения. Это характеризуется появлением обратимых микротрещин и сдвигов в плоскостях, параллельных плоскости действия нагрузки, и определяется интенсивным развитием поперечных деформаций ползучести. Отсюда, для заданных уровней напряжений одноосного сжатия ( $\sigma < R_{т0}^0$ ) оказалось возможным максимальные значения коэффициента  $\gamma_2(t, \tau)$  определять по предлагаемой авторами зависимости

$$\gamma_2^{max}(\sigma) = \frac{\gamma_1(\tau)}{1 - 1,1 \frac{\sigma}{R_{т0}}} \quad (3)$$

где  $\gamma_1(\tau) = \gamma(\tau) \cdot \nu = 1/6 = \text{const}$ ,  $\sigma$  — напряжение, приложенное к образцу в момент времени  $\tau$ .

\* Под обратимыми микротрещинами понимаются трещины, появляющиеся в раннем возрасте под нагрузкой, которые в процессе твердения бетона закрываются и исчезают совсем.

Кривая, построенная по зависимости (3), удовлетворительно согласуется с опытными данными.

Последующее уменьшение коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  по времени от своего максимального значения  $\nu_2^{\max}(\tau)$  до величины, примерно равной  $\nu_1(\tau)$ , происходило наиболее интенсивно в первые 40–50 сут и через 90–100 сут выдержки под нагрузкой наступала его стабилизация. Это явление связано с процессами непрерывного уплотнения структуры бетона в области линейной ползучести [3], самозалечиванием микротрещин, увеличением модуля деформаций бетона и характеризуется уменьшением его объема. Поэтому изменение коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  во времени предлагается определять по убывающей экспоненциальной зависимости

$$\nu_2(t, \tau) = \nu_1(\tau) + [\nu_2^{\max}(\tau) - \nu_1(\tau)] e^{-\gamma t} \quad (4)$$

где  $\gamma$  — параметр, характеризующий скорость изменения коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  по времени. Обработка опытов авторов и других исследователей [3, 8, 9] показала, что в области линейной ползучести параметр  $\gamma$  практически не зависит от уровня напряженного состояния, возраста бетона к моменту нагружения, а также от его состава и может быть принят равным своей средней величине  $\gamma = 0.027$ .

Подставив в формулу (4) выражение для  $\nu_2^{\max}(\tau)$ , получим

$$\nu_2(t, \tau) = \nu_1(\tau) + 1.1 \frac{\sigma}{R_{\text{пр}}} \frac{\nu_1(\tau)}{1 - 1.1 \frac{\sigma}{R_{\text{пр}}}} e^{-0.027 t} \quad (5)$$

Построенные по зависимости (5) кривые удовлетворительно согласуются с опытными данными (фиг. 4).

В опытах авторов деформации ползучести (на фиг. 3 пунктирные линии), полученные путем наложения поперечных деформаций ползучести одноосно сжатых плит на деформации ползучести двухосно нагруженных элементов, оказались на 12–16% меньше опытных значений деформаций ползучести одноосно сжатых плит. Такая разница находится в пределах допустимого разброса опытных данных для бетонных элементов. Кроме этого, при наложении поперечных деформаций ползучести одноосно сжатых плит, полученных с использованием равенства (1), на деформации ползучести двухосно сжатых элементов различие между опытными значениями деформации ползучести одноосно сжатых плит в начальный после нагружения период (60–70 суток) составит около 25–30%, что также не выходит за пределы допустимого разброса опытных данных. Это подтверждает возможность применения принципа наложения при двухосном сжатии длительно действующей нагрузкой.

Таким образом, применение равенства (1) при решении задачи плоского напряженного состояния с использованием реологических

уравнений теории упруго-ползучего тела не внесет больших погрешностей по сравнению с экспериментальными данными.

Проведенные авторами исследования позволили сделать следующие основные выводы:

1. Экспериментально установлено увеличение коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$  в начальный после нагружения период в зависимости от уровней напряжений одноосного сжатия. Предложена аналитическая зависимость для определения коэффициента  $\nu_2(t, \tau)$ .

2. Доказана возможность применения принципа наложения воздействий для деформаций ползучести бетона при двухосном сжатии.

3. Доказана правомерность применения условия (1) при решении задачи плоского напряженного состояния с использованием реологических уравнений теории упруго-ползучего тела.

Институт механики АН  
Армянской ССР

Поступила 28 I 1974

Չ. Ի. ՊԵՏՐՈՎ, Ա. Վ. ԲԻԼՉԵՆԿՈ, Բ. Ա. ԿՈՏԻԿՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՂԻՐԻ ԼԱՅՆԱՅԻՆ ԳԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆԵՐԻ ԳՈՐՈՒՄՆԻ ԿՈԵՖԻՑԻԵՆՏԻ

Ա մ փ ո թ լ ը

Աշխատանքում բերվում են բետոնի սողրի լայնական զեֆորմացիաների գործակիցի էրապերիմենտայ հետադաստոյան արդյունքները: Ստացված է, որ  $\nu_2(t, \tau)$  գործակիցը բեռնախորման սկզբում մեծանում է և ապա փոքրանալով հավասարվում է  $\nu_1(\tau)$ -ի արժեքին:  $\nu_2(t, \tau)$  գործակիցի սրտչման համար առաջարկված է անալիտիկ արտահայտություն կախված գործող լարումներից:

Երկառանգը սեղմման դեպքում բետոնի սողրի զեֆորմացիաների համար ապացուցվում է վերադրման սկզբունքի կիրառելիությունը:

## ON THE COEFFICIENT OF TRANSVERSE DEFORMATION OF CONCRETE CREEP

V. I. PETROV, A. V. BILCHENKO, R. A. KOTIKYAN

### S u m m a r y

The results of experimental studies on the coefficient of transverse deformation in concrete creep,  $\nu_2(t, \tau)$ , are examined showing its increase at the period initial after loading with a subsequent decrease to the value of  $\nu_1(\tau)$ . An analytical dependence is suggested for the definition of  $\nu_2(t, \tau)$  as a function of the level of operating stresses. The principle of superposition of effects is proved to be valid for concrete creep deformation under two-axial compression.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Госстройиздат, М., 1952.
2. Александровский С. В., Попкова С. М. О коэффициенте поперечной деформации бетона при длительном действии нагрузки. Ползучесть и усадка бетона. Материалы совещания, подготовленного НИИЖБ Госстроя СССР, М., 1969.
3. Берг О. Я., Рожков И. А. Исследование неупругих деформаций и структурных изменений высокопрочного бетона при длительном действии сжимающих напряжений. Тр. Всесоюзного НИИ транспортного строительства. Изд-во «Транспорт», М., 1969.
4. Бильченко А. В., Младченко Г. А., Петров В. И. О методике испытания двухосе обжатых образцов при длительном нагружении. «Строительные конструкции», вып. XXI. Изд-во «Будівельник», Киев, 1973.
5. Котляк Р. А. Ползучесть бетона при двухосном растяжении. Изв. АН Армянской ССР, Механика, т. XXI, № 1, 1968.
6. Прокопович И. Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние конструкций. Госстройиздат, М., 1963.
7. Яшин А. В. Прочность бетона при длительном нагружении и закономерности его разрушения и деформаций. VI конференция по бетону и железобетону, НИИЖБ, вып. 1. Стройиздат, М., 1965, 19—21.
8. Sopulakrishnan K. S., Neville Adam, Ghali Amin. Creep Poissons Ratio of Concrete under Multiaxial Compression. J. of the American Concrete Institute Proceedings, v. 66, № 12, 1969.
9. Hannant D. I. Creep and Creep Recovery of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stress. J. of the American Concrete Institute, No. 5, May, 1969, Proceedings, v. 66.
10. Duke C. M., Davis H. E. Some Properties of Concrete under Test Materials, 44, 1944.