

**ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ВЫЗВАННУЮ ДЕСОРБЦИЕЙ  
ВЛАГИ ПОЛЗУЧЕСТЬ СТАРОГО БЕТОНА ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ**

**Карапетян К.А., Клекчян Д.Г., Манукян Е.С.**

**Ключевые слова:** десорбция, напряжение, деформация, ползучесть, масштабный фактор  
**Key words:** desorption, stress, deformation, creep, scale factor.

**Կարապետյան Կ.Ա., Կլեկչյան Դ.Գ., Մանուկյան Ե.Ս.**

**Մասշտաբային գործոնի ազդեցությունը խոնավության դեսորբցիայով պայմանավորված սողքի վրա  
հին բետոնի միառանցք սեղմման դեպքում**

Քննարկվում են 18 տարի հիդրոմեկուսացված վիճակում պահված և բեռնավորման պահին ապամեկուսացված լիթոիդպեմզաբետոնն զլանային տարրերի սողքի հետազոտության արդյունքները հաշվի առնելով մասշտաբային գործոնը:

Ստացված արդյունքների համեմատական վերլուծության հիման վրա բացատրված են փորձնականորեն բացահայտված երևույթները:

**Karapetyan K.A., Klekchyan D.H., Manukyan E.S.**

**The influence of the scale factor on the creep of the aged concrete under one-axial compress caused by the desorbition of damp**

The results of an experimental investigation of creep of litoid-pumice concrete cylindrical elements, stored after the remoulding during 28 years in hydroisolated condition and released from the isolation at the moment of loading taking into account the scale factor are considered.

On the base of the comparative analysis of the obtained experimental data the explanation of the detected phenomena is given.

Рассматриваются результаты экспериментального исследования ползучести литоидпемзобетонных цилиндрических элементов разных диаметров, хранившихся после расформовки в течение 28 лет в гидроизолированном состоянии и освобождённых от изоляции к моменту нагружения.

На основе сравнительного анализа полученных экспериментальных данных дано объяснение обнаруженных явлений.

Сопоставление результатов многочисленных исследований показывает, что в условиях свободного влагообмена со средой с невысокой влажностью ( $W < 75\%$  [1]) на способность деформироваться во времени при одноосном сжатии наряду с другими причинами весьма существенна роль десорбции химически несвязанной влаги из пор и капилляров бетона. Из такого сравнения также следует, что для оптимальной оценки влияния упомянутого процесса на закономерность изменения деформации ползучести бетона в зависимости от масштабного фактора необходимо при экспериментировании по возможности исключить влияние других факторов (вязкость гелевой структурной составляющей цементного камня, микротрещинообразование и т.д.).

В работе приводятся и обсуждаются результаты экспериментального исследования, вызванной десорбцией влаги ползучести весьма старых бетонных элементов с разными размерами поперечного сечения.

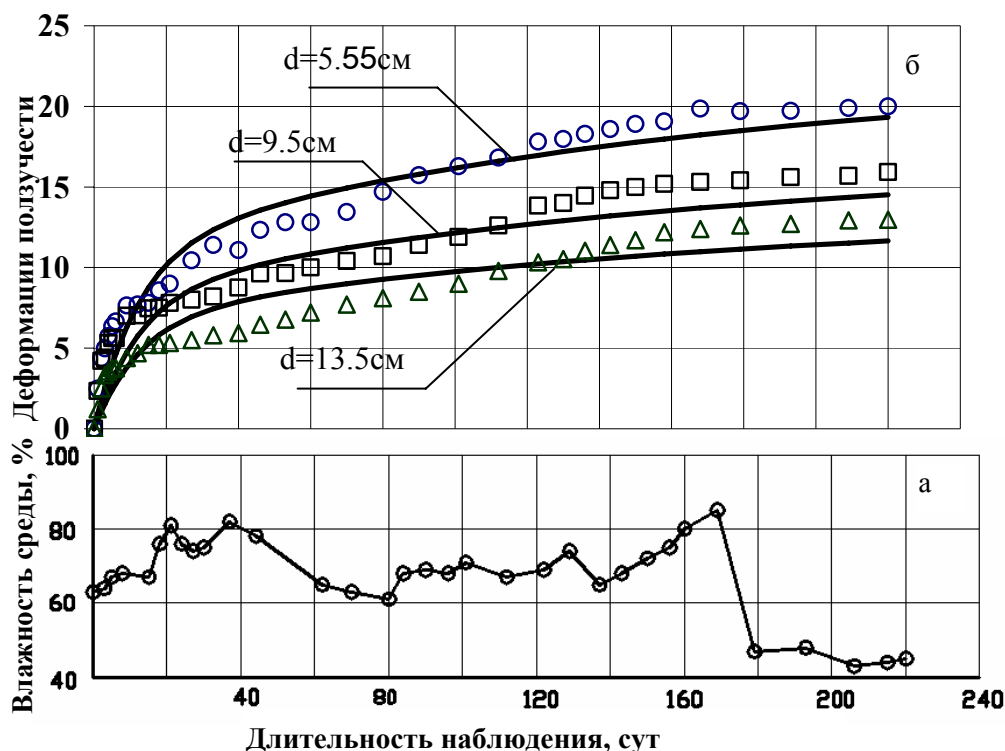
В качестве опытных образцов были использованы цилиндры с диаметрами 5,55см, 9,5см и 13,5см и высотами 22см, 38см и 54см соответственно. Они были получены из исходных литоидпемзобетонных цилиндров с диаметром 14см и высотой 60см, которые сразу после расформовки были гидроизолированы и в течение 28 лет в таком состоянии хранились в лабораторном помещении. Использовался вибрированный бетон состава в массе 1 : 1,539 : 2,400,  $W/C = 0,95$ ,  $C = 295 \text{ кг/м}^3$ . Для приготовления бетона были применены песок ( $\gamma_n = 1090 \text{ кг/м}^3$ ),

щебень ( $\gamma_{щ} = 820 \text{ кг/м}^3$ ) с фракцией 10-40мм из литоидной пемзы, взятой из карьера Джабер (Республика Армения) и портландцемент активностью 40МПа. Кубиковая прочность бетона в месячном возрасте составляла 20,4 МПа.

Опытные образцы сразу после изготовления были нагружены постоянным сжимающим напряжением  $\sigma = 4 \text{ МПа}$ , под воздействием которого они находились в течение 220сут. Параллельно на ненагруженных образцах-близнецах измеряли усадочные деформации. В течение проведения экспериментов периодически фиксировалась влажность лабораторного помещения.

Результаты исследований в виде точек приведены на фиг.1. Ординаты этих точек на фиг.1.б соответствуют величинам среднего арифметического значения данных, полученных на трёх образцах-близнецах в каждом случае. При этом, максимальный разброс составлял в +4,3% и -4,9%, который наблюдался у отдельных образцов с диаметром 5,55см.

По проведённым измерениям мера влажности  $w$ , использованная в исследованиях литоидпемзобетона в возрасте 28 сут., составила 13,3%. Проведённые расчёты на основе метода, изложенного в работе [2], показали, что в случае надёжной гидроизоляции влажность бетона в возрасте 28 лет должна была составить приблизительно 11,4%. Однако, измерения показали, что в указанном возрасте фактическая влажность исходных элементов, а следовательно, и полученных из них опытных образцов, составила около 6,5%, что свидетельствует о ненадёжной гидроизоляции.



Фиг.1. Кривые изменения влажности лабораторного помещения (а) и деформаций ползучести литоидпемзобетонных цилиндрических элементов разных диаметров (б)

Согласно приведённым на фиг.1 экспериментальным данным с началом процесса десорбции влаги из пор и капилляров литоидпемзобетонных образцов имеет место проявление и развитие во времени значительных деформаций ползучести.

Из этой фигуры с очевидностью следует, что бурное развитие с существенной переменной скоростью деформаций ползучести наблюдается в течение первых 40 сут. после загрузки образцов. Указанное явление оказывается тем существеннее, чем меньше диаметр опытных цилиндрических элементов. Отметим также, что в течение вышеуказанного срока наблюдения образцы набирают существенную часть от величины деформаций ползучести, приобретаемой ими через 220 сут. после нахождения под постоянной нагрузкой, т.е. к концу завершения опытов. Указанная доля деформаций для образцов с диаметрами 5,55см; 9,5см и 13,5см составляет, соответственно, более чем 60%; 54% и 46%.

Сравнение данных, представленных на фиг.1, показывает, что в течение промежутка времени, начиная с 40 дней и до конца завершения опытов наблюдается монотонное развитие с умеренно затухающей скоростью деформаций ползучести, конечная величина которой обусловлена размерами поперечного сечения опытных образцов. При этом, изменение величин деформаций ползучести образцов рассматриваемых диаметров в течение указанного промежутка времени происходит одинаково, и разница между значениями этих деформаций, накопленная образцами до этого, практически сохраняется.

Выше отмечалось, что при проведении исследований ползучести на опытных образцах-близнецах параллельно измеряли усадочные деформации.

Согласно результатам этих измерений, максимально возможную величину усадочных деформаций, обусловленную, главным образом, десорбцией исходно содержащейся влаги, литоидпемзобетонные цилиндры приобретают в течение 143 сут., начиная с начала наблюдений. Как показало сравнение опытных данных, дальнейшее существенное убывание или возрастание усадочных деформаций было обусловлено, в основном, соответственно возрастанием или убыванием влажности лабораторного помещения в течение этого промежутка времени. Указанное колебание влажности среды, однако, как следует из фиг.1, практически не повлияло на деформационное поведение образцов, находящихся под нагрузкой.

В работе К.С. Карапетяна [3] приводятся результаты исследований влияния масштабного фактора на ползучесть литоидпемзобетона при его свободном влагообмене со средой с невысокой влажностью в условиях постоянно действующего сжимающего напряжения  $\sigma = 1 \text{ МПа}$ .

В этих исследованиях в качестве опытных образцов были использованы цилиндрические элементы диаметрами 14см и 25см и высотой 60см, изготовленные из литоидпемзобетона. После освобождения от металлических форм, образцы до начала проведения исследований в возрасте 28 сут. хранились во влажных опилках.

Следует отметить, что некоторое количество из упомянутых выше элементов диаметром 14см и высотой 60см после расформовки сразу были гидроизолированы и в таком состоянии они были оставлены в лабораторном помещении. Из этих элементов в возрасте 28 лет методом механической обработки были получены цилиндрические опытные образцы разных диаметров, с использованием которых нами были проведены рассматриваемые здесь исследования.

Согласно приведенным в работе [3] экспериментальным результатам, деформации ползучести у цилиндрических образцов диаметром 14см оказались существенно больше, чем у образцов диаметром 25см в течение всего времени нахождения их под нагрузкой.

С целью выявления основной причины обнаруженного явления автором работы [3] были исследованы деформации ползучести в течение 550 дней гидроизолированных сразу после расформовки литоидпемзобетонных цилиндрических образцов диаметром 14см, а также аналогичных неизолированных образцов, нагруженных сжимающим напряжением  $\sigma = 2 \text{ МПа}$  в возрасте 28 сут.

Сопоставляя результаты упомянутых выше экспериментальных данных и исходя из признанной многочисленными исследователями гипотезы о механизме ползучести

бетона [4], в работе [3] выражается мнение, что обнаруженная существенная разница в величинах деформаций ползучести литоидпемзобетонных цилиндрических элементов с диаметром 14см и 25см, в основном, связана с капиллярными процессами. Одновременно автором этой работы не исключается и влияние других факторов на наблюдаемое явление, среди которых отмечается изменение в течение проведения экспериментов степени вязкости гелевой структурной составляющей цементного камня.

Возвращаясь к обсуждению представленных на фиг.1.б экспериментальных данных, отметим следующее: появление и развитие во времени значительных деформаций ползучести при сжатии старых литоидпемзобетонных цилиндрических элементов, гидроизолированных сразу после расформовки и освобождённых от изоляции к моменту нагружения в возрасте 28 лет, можно объяснить, главным образом, накоплением со временем деформаций, обусловленных снижением прочности и показателя упругих свойств бетона вследствие десорбции химически несвязанной влаги [5]. Влияние же масштабного фактора на деформации ползучести в этом случае можно объяснить сравнительным ослаблением интенсивности процесса десорбции влаги, обусловленного увеличением размеров поперечного сечения бетонных элементов. Прямым подтверждением сказанного могут служить результаты проведённых измерений. Согласно этим измерениям потеря изначально содержащейся в порах и капиллярах исходной влаги литоидпемзобетонными цилиндрическими элементами с диаметрами 5,55см; 9,5см и 13,5см после нахождения их под сжимающей нагрузкой в течение 220 сут. в условиях невысокой влажности составляла 1,42%; 0,99% и 0,84% соответственно. Величина же объёмной массы этих образцов к началу проведения экспериментов составляла 1558; 1554 и 1552кг/м<sup>3</sup> соответственно.

Интересно отметить, что отношение величин деформаций ползучести и количества потерянной влаги у образцов одного и того же диаметра к концу проведения опытов не зависело от размеров поперечного сечения литоидпемзобетонных элементов и составляло примерно  $0,96 \times 10^{-5}/\text{кг}$ .

С.В. Александровским [6] экспериментально было показано, что большое влияние на происходящие в бетоне раннего возраста ( $\tau < 28$  сут.) явления, связанные с процессами усадки и ползучести, может оказать и продолжительность его нахождения под нагрузкой: а именно, этот фактор приводит к изменению во времени размеров пор в “молодом” бетоне, тем самым, влияя на режим его высыхания. В частности, им было установлено, что призматические образцы из тяжелого бетона с поперечным сечением 5х5см, имевшие возраст 4 сут. к моменту нагружения, в течение 11 дней нахождения их под постоянным сжимающим напряжением, теряют около 20% больше влаги, чем ненагруженные образцы-близнецы [6].

Явление, качественно аналогичное вышеуказанному, наблюдалось и при проведении нами исследований влажностной усадки и ползучести старых литоидпемзобетонных цилиндрических элементов с разными диаметрами. При этом было установлено, что среднеарифметическое значение разницы в величинах потери влаги, находящихся под нагрузкой и ненагруженных цилиндрических образцов-близнецов, практически не зависит от масштабного фактора и составляет примерно 16,2%.

Сравнение экспериментальных данных, приведённых в вышеуказанной работе [3] и на фиг.1.б, позволяет составить представление о влиянии возраста бетона на его способность деформироваться во времени в условиях одноосного сжатия.

По проведённым расчётам на основе данных, представленных в работе [3] и на фиг.1, значение меры ползучести через 220 сут. нахождения под нагрузкой у литоидпемзобетонных цилиндров с диаметром 14см, хранившихся до начала проведения исследований в возрасте 28 сут. во влажных опилках, составляет примерно  $22 \times 10^{-5}$ , а у цилиндров с диаметром 13,5см, хранившихся после

расформовки в гидроизолированном состоянии и освобождённых от изоляции к моменту нагружения в возрасте 28 лет, – около  $3,3 \times 10^{-5}$ .

Учитывая, что опытные образцы до момента начала проведения исследований в одном случае хранились во влажных опилках, а в другом – в гидроизолированном состоянии, разница в величинах площадей их поперечного сечения, составляющая менее 7%, не может служить препятствием для сравнения данных фиг.1 с данными работы [3]. Кроме того, исходя из величины действующего на опытные образцы сжимающего напряжения, можно утверждать, что проявление деформаций ползучести, обусловленных микротрещинообразованием, в указанных обоих случаях испытаний, исключается.

Исходя из вышеизложенного, существенную разницу мер ползучести цилиндрических образцов упомянутых диаметров, зафиксированную в работе [3] и представленную на фиг.1, можно объяснить, в основном, возрастом бетона к началу проведения исследований, поскольку, чем позже производится загрузка образца, тем меньше его способность деформироваться во времени [7], и это, в данном случае, обусловлено, главным образом, капиллярными явлениями, а также вязкостью гелевой структурной составляющей цементного камня [4]. Первый из указанных факторов сильно зависит от степени влажности бетона к моменту испытания, а второй можно характеризовать значением модуля упругости материала к началу проведения экспериментов. Отметим, что влажность и модуль упругости литоидпемзобетона в возрасте 28 сут. составили соответственно 13,3% и 9500МПа, а в возрасте 28 лет – 6,5% и 16000Мпа.

Известно, что аналитическое выражение меры ползучести, предложенное Н.Х. Арутюняном [8] для стареющих материалов, в том числе и бетонов, имеет следующий вид:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \cdot f(t - \tau) \quad (1)$$

где  $\tau$  – возраст материала к моменту нагружения,

$t - \tau$  – длительность нахождения материала под нагрузкой,

$\varphi(\tau)$  – функция старения,

$f(t - \tau)$  – функция длительности нахождения материала под нагрузкой.

Формула (1) в раскрытом виде пишется так [8]:

$$C(t, \tau) = \left( C_0 + \frac{A}{\tau} \right) \left[ 1 - e^{-\gamma(t - \tau)} \right], \quad (2)$$

где  $C_0$  – значение  $C$  при  $\tau \rightarrow \infty$ ,  $A$  и  $\gamma$  – параметры, определяемые из опытных данных.

Следует отметить, что выражение (2) достаточно успешно используется при проведении исследований ползучести стареющих материалов. Одновременно автор работы [8] высказывает мнение, что для более корректного аналитического описания опытных данных ползучести в некоторых случаях может оказаться необходимым в вышеуказанных выражениях  $\varphi(\tau)$  и  $f(t - \tau)$  сохранить не два, а больше членов ряда, или для  $\varphi(\tau)$  принять другой вид зависимости.

Проведённые К.С. Карапетяном разносторонние исследования [9] показали, что, введя некоторые изменения, выражение (2) можно представить в следующем виде:

$$C(t, \tau) = \left( C_0 + \frac{A}{\tau} \right) \left[ 1 - 0,5 \left( e^{-\gamma_1(t-\tau)} + e^{-\gamma_2(t-\tau)} \right) \right]. \quad (3)$$

Преимуществом формулы (3) является то, что она становится более гибкой при описании данных ползучести, особенно в начальный период опытов и число содержащихся в ней опытных параметров всего лишь три  $(A, \gamma_1, \gamma_2)$ , в то время как в выражениях меры ползучести, предложенных другими исследователями, число указанных параметров может достигать семи (напр., см. [10]).

В работе [9] также было показано, что выражение меры ползучести, с учётом влияния масштабного фактора на ползучесть бетона, может быть представлено в виде

$$C(t, \tau, a) = \varphi(\tau, a) \cdot f(t - \tau), \quad (4)$$

где  $a$  – наименьший размер поперечного сечения бетонного элемента.

Учитывая вышеизложенное, для аналитического описания представленных на фиг.1.6 экспериментальных данных ползучести литоидпемзобетонных цилиндрических элементов разных диаметров была использована следующая формула:

$$\varepsilon_n(t, \tau, d) = \left( \frac{A}{d} + B \right) \left[ 1 - 0,5 \left( e^{-\gamma_1(t-\tau)} + e^{-\gamma_2(t-\tau)} \right) \right] \times \sigma \times 10^{-5}, \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр испытуемого образца в см,  $\sigma$  – действующее на образец напряжение в МПа, а для опытных параметров аппроксимации приняты следующие значения:

$$A = 18 \text{ см}, \quad B = 2, \quad \gamma_1 = 0,006 \text{ 1/сут.}, \quad \gamma_2 = 0,08 \text{ 1/сут.}$$

Кривые ползучести, построенные согласно аппроксимации (5), на фиг.1.6 показаны сплошными линиями.

Как видно из фиг.1.6, применение формулы (5) для описания вызванной десорбцией влаги ползучести старого бетона, с учётом масштабного фактора, в целом, можно считать приемлемым, несмотря на значительное расхождение значений опытных данных от аналитически рассчитанных их величин, наблюдаемое в течение первых 80 сут. после нагружения образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. М.: Госстройиздат России. ГУП ЦПП, 2002. 76с.
2. Симонов М.З. Основы технологии лёгких бетонов. М.: Изд-во лит. по строительству, 1973. 584с.
3. Карапетян К.С. Влияние размеров образца на усадку и ползучесть бетона. // Изв. АН Арм. ССР. Серия физ.-мат., естеств. и техн. наук. 1956. Т.9. №1. С.87-100.
4. Карапетян К.С. Ползучесть бетона при высоких напряжениях // Изв. АН Арм. ССР. Серия физ.-мат., естеств. и техн. наук. 1953. Т.6. №2. С.79-89.
5. Карапетян К.С., Карапетян К.А. Исследование изменения прочности, модуля деформации и степени анизотропии весьма старого туфобетона при сжатии вследствие водонасыщения и высыхания // Изв. АН Арм. ССР. Механика. 1981. Т.34. №4. С.29-51.

6. Александровский С.В. О влиянии длительности действия внешней нагрузки на режим высыхания и усадку бетона. /В кн.: Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций. Труды НИИЖБ. Вып. 4. М.: Госстройиздат, 1959. С.154-183.
7. Карапетян К.С. Влияние старения бетона на зависимость между напряжениями и деформациями ползучести // Изв. АН Арм. ССР. Серия физ.-мат. наук. 1959. Т.12. №4. С.57-88.
8. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.-Л.: ГИЗ технико-теоретической литературы, 1952. 323с.
9. Карапетян К.С. Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении // Докл. АН Арм.ССР. 1964. Т.38. №3. С.135-142.
10. Яшин А.В. Ползучесть бетона в раннем возрасте. /В кн.: Исследование свойств бетона и железобетонных конструкций. Труды НИИЖБ. Вып. 4. М.: Госстройиздат, 1959. С.18-73.

**Сведения об авторах:**

**Карапетян Корюн Ашотович**, доктор технических наук, зав. лабораторией  
Института механики НАН РА.  
Тел: (+37410) 52-48-52,  
E-mail: [koryan@mechins.sci.am](mailto:koryan@mechins.sci.am)

**Клекчян Давид Грачикович**, кандидат технических наук, председатель  
промышленного кооператива «Бетон»  
Тел.: (091) 200894,  
E-mail: [klekchyan@mail.ru](mailto:klekchyan@mail.ru)

**Манукян Егише Самвелович**, инженер, Институт механики НАН Армении  
Тел.: (099) 500755.

Поступила в редакцию 03.04.2012