

К. С. КАРАПЕТЯН, Р. А. КОТИКЯН

ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ПРИ СЛОЖНО-НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Ползучесть бетона при сложно-напряженном состоянии вообще мало исследована, между тем, данный вопрос представляет как практический, так и теоретический интерес.

Изучение прочности и деформативности бетона при сложно-напряженных состояниях: кручение с последующим растяжением, внутреннее давление с последующим сжатием,—дало возможность авторам установить ряд важных закономерностей [4].

Исследования показали, что при данных сложно-напряженных состояниях зависимости между интенсивностями напряжений и деформаций могут быть получены из соответствующих опытов простых напряженных состояний.

В настоящей работе приводятся результаты исследования ползучести бетона при другом сложно-напряженном состоянии—сжатии с последующим кручением.

Как и в работе [4], испытывались полые цилиндрические образцы с наружным диаметром 2,04 см, толщиной стенок 2 см, длиной 80 см. Образцы были изготовлены из мелкозернистого бетона на кварцевом песке и пуццолановом портландцементе Араратского завода (г. Ереван) марки 400. Состав бетона приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав бетона по весу	Расход материалов на 1 м ³ бетона в кг			γ_b в т/м ³	R_k в кг/см ²
	цемент	песок	вода		
1:2,24	606	1357	337	2300	201

Образцы бетонировались в металлических разборных формах. Всего было изготовлено 36 цилиндрических трубчатых образцов и необходимое количество кубиков с ребром 10 см. Освобождение образцов от форм производилось через 48 часов.

Образцы в процессе длительных опытов находились в помещении, где температура $T = 21 \pm 5^\circ\text{C}$, а относительная влажность $P = 80 \pm 10\%$.

Образцы в количестве 18 штук, изготовленные из первого замеса бетона, были испытаны под кратковременной нагрузкой в возрасте 28 дней с целью изучения прочности и деформативности бе-

тона при сложно-напряженном состоянии. В этих испытаниях каждый образец сначала загружался определенной постоянной сжимающей нагрузкой, а затем доводился до разрушения кручением. Величины начальных сжимающих нагрузок составляли 2000 кг, 4000 кг, 6000 кг и 8000 кг, а относительные напряжения соответственно — 0,13; 0,26; 0,39 и 0,52. Осевая сжимающая нагрузка и крутящий момент повышались ступенями, и после каждой ступени нагрузки измерялись деформации сжатия и кручения.

Одновременно были испытаны образцы на чистое сжатие и чистое кручение. Предел прочности образцов на сжатие составлял $R_{сж} = 133 \text{ кг/см}^2$, а на кручение — $R_{кр} = 12,25 \text{ кг/см}^2$. При испытании на чистое сжатие измерялись как продольные, так и поперечные деформации.

Для исследования ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии были использованы остальные 18 цилиндрических полых образцов, которые были изготовлены из второго замеса бетона.

Всего под длительную нагрузку было установлено 12 образцов, из коих 8 — на сложно-напряженное состояние, 2 — на чистое сжатие и 2 — на чистое кручение. Сжимающее напряжение для всех образцов было одно и то же и составляло 50 кг/см^2 . Напряжение от крутящих моментов в образцах, загруженных на сложно-напряженное состояние, изменялось и для каждой пары образцов составляло 5,6; 8,4; 11,1 и $13,9 \text{ кг/см}^2$.

В процессе длительных опытов замерялись как продольные деформации, так и деформации кручения. Одновременно на трех ненагруженных образцах-близнецах определялись усадочные деформации.

Продольная ползучесть от сжимающей нагрузки определялась путем вычитания из суммарных деформаций усадочных деформаций.

Интенсивности напряжений и деформаций при сложно-напряженном состоянии в случае кратковременных испытаний определялись по формулам [1, стр. 295]

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 3\tau_{xz}^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \frac{3}{4}\gamma_{xz}^2}. \quad (2)$$

Интенсивности напряжений и деформаций ползучести при сложно-напряженном состоянии также определялись по формулам (1) и (2) лишь с той разницей, что при этом в формуле (2) $\varepsilon_{yy} = 0$.

Необходимо отметить, что τ_{xz} представляет напряжение от крутящего момента на наружной поверхности образца.

Для описания кривой интенсивность напряжений — интенсивность деформаций была принята зависимость следующего вида [1]

$$\varepsilon_i = A\sigma_i + B\sigma_i^n, \quad (3)$$

где A , B и n — параметры, определяемые из опыта.

Как показали ранее проведенные исследования, зависимость типа (3) вполне применима для этой цели.

На фиг. 1 приведена кривая интенсивность напряжений—интенсивность деформаций бетона чистого сжатия при возрасте бетона 28 дней. Кривая описана по формуле (4), которая дает хорошую сходимость с опытными данными

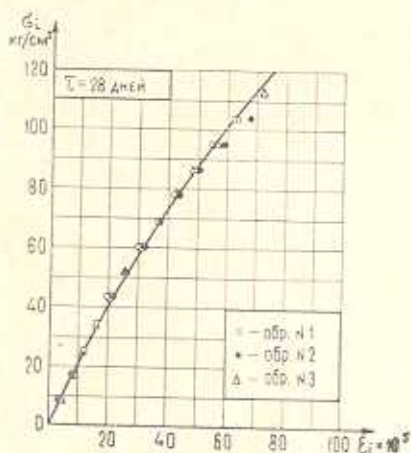
$$10^5 \cdot \varepsilon_i = 0,42 \sigma_i + 0,0017 \sigma_i^2. \quad (4)$$

Исследования показали, что и для описания кривой интенсивность напряжений—интенсивность деформаций чистого кручения можно воспользоваться зависимостью типа (3). Для этого случая была получена следующая зависимость

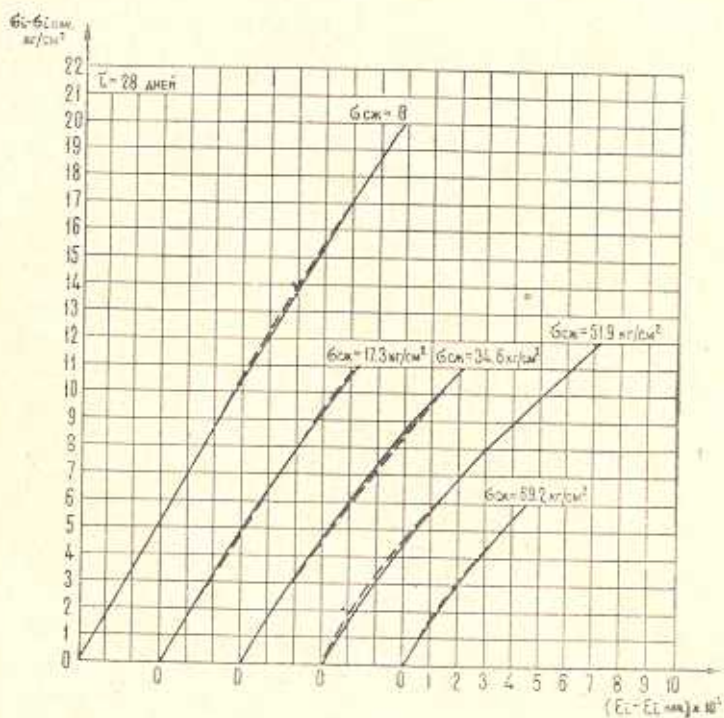
$$10^5 \varepsilon_i = 0,55 \sigma_i + 20 \times 10^{-4} \sigma_i^2. \quad (5)$$

Как видно из фиг. 2, зависимость (5) вполне удовлетворительно описывает опытные данные.

В работе [4] было показано, что зависимость между интенсивностями напряжений и деформаций при сложно-напряженном состоянии бетона—кручение с последующим



Фиг. 1.



Фиг. 2.

растяжением, можно получить из опытов простого напряженного состояния — чистого кручения.

Однако, как было установлено, зависимость (5) в таком виде, в каком она есть, непригодна для описания зависимости интенсивность напряжений — интенсивность деформаций такого сложно-напряженного состояния, каким является сжатие с последующим кручением, так как его характер в значительной мере зависит от величины начальной сжимающей нагрузки. С увеличением сжимающей нагрузки кривизна кривой интенсивностей деформаций увеличивается.

Учитывая это обстоятельство, пришлось в зависимости (3) коэффициент B принять переменным, зависящим от величины сжимающей нагрузки. При этом было установлено, что связь между коэффициентом B и сжимающей нагрузкой имеет линейный характер (фиг. 3) и может быть представлена в виде

$$10^4 \times B = \alpha + \beta \sigma_{сж}. \quad (6)$$

Тогда для описания кривых интенсивность напряжений — интенсивность деформаций сложно-напряженного состояния — сжатия с последующим кручением, получается следующая зависимость

$$10^5 \times \varepsilon_t = 0.55 \sigma_t + (20 + 4.43 \sigma_{сж}) \times \sigma_t^2 \times 10^{-4}. \quad (7)$$

В частном случае при $\sigma_{сж} = 0$ из формулы (7) получается формула (5), которая соответствует случаю чистого кручения.

Как видно из фиг. 2, кривые, построенные по формуле (7), вполне удовлетворительно аппроксимируют опытные данные.

В табл. 2 приведены прочностные показатели бетона при сложно-напряженном состоянии — сжатии с последующим кручением, и при чистом кручении.

Таблица 2

$\frac{\sigma_{кр}}{кг/см^2}$	0	17,3	34,6	51,9	69,2
$\frac{\sigma_{сж}}{кг/см^2}$	12,25	13,65	17,25	21,15	18,90

Как видно из табл. 2, при сложно-напряженном состоянии увеличение начального сжимающего напряжения до определенного предела приводит к увеличению прочности бетона на кручение. Однако, при дальнейшем увеличении сжимающей нагрузки наблюдается обратное явление.

Указанное явление весьма закономерно и объясняется тем, что до определенного сжимающего напряжения с увеличением последнего сопротивляемость бетонного образца кручению увеличивается. Однако,

как только наступает то предельное напряжение, при котором в бетоне начинают образовываться и развиваться микротрещины, это приводит к уменьшению сопротивляемости бетона кручению и, тем самым, к падению прочности на кручение.

Перейдем к рассмотрению результатов исследования ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии.

Целью этих исследований, помимо установления закономерности ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии, являлось также исследование возможности выражения этой закономерности ползучестью бетона простого напряженного состояния. Одновременно была изучена применимость теории упруго-ползучего тела Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна к описанию кривых ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии.

Как известно, согласно теории упруго-ползучего тела, мера ползучести бетона, т. е. ползучесть от единичного напряжения выражается следующей зависимостью

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) f(t - \tau), \quad (8)$$

где

$$\varphi(\tau) = C_0 + \sum_{k=1}^m \frac{A_k}{\tau^k}, \quad (9)$$

а

$$f(t - \tau) = \sum_{k=0}^m B_k \cdot e^{-\gamma_k(t - \tau)}. \quad (10)$$

В уравнениях (9) и (10) A_k , B_k и γ_k — коэффициенты, определяемые из опыта, причем, $B_0 = 1$, $\gamma_0 = 0$ и $\gamma_k > 0$ ($k = 1, 2, 3, \dots, m$).

В наших опытах образцы были нагружены длительной нагрузкой в одном возрасте ($\tau = 28$ дней), поэтому $\varphi(\tau)$ имеет постоянное значение.

Для описания кривых ползучести бетона нами принято вытекающее из теории упруго-ползучего тела выражение меры ползучести в форме (11), впервые примененное одним из авторов настоящей работы [2, 3]

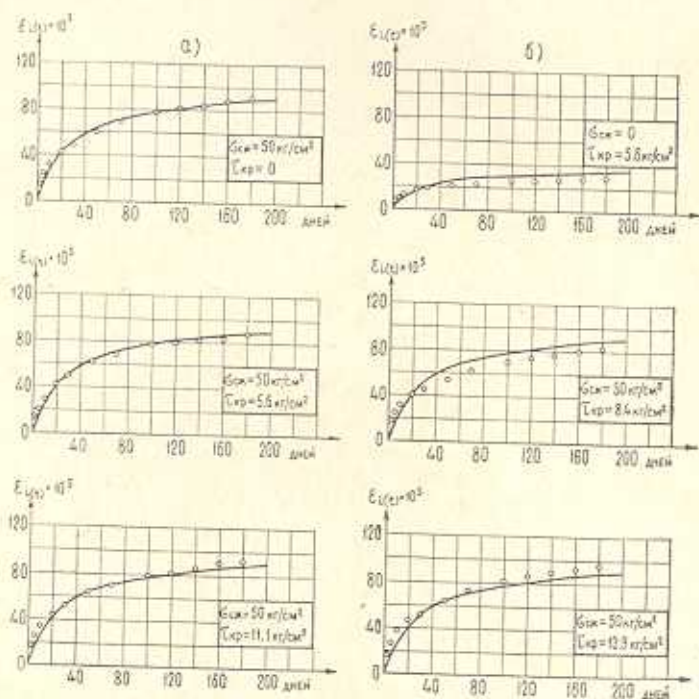
$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) [1 - 0,5(e^{-\gamma_1(t - \tau)} + e^{-\gamma_2(t - \tau)})]. \quad (11)$$

На фиг. 4а, 4б приведены экспериментальные кривые интенсивностей деформаций ползучести при осевом сжатии и чистом кручении. Поскольку сжимающее напряжение в длительно загруженных образцах было меньше половины предела их прочности ($\sigma_{сж} = 50 \text{ кг/см}^2$), можно считать, что имела место линейная ползучесть.

В результате описания кривой ползучести полых цилиндрических бетонных оболочек при чистом сжатии была получена следующая зависимость

$$10^5 \cdot \varepsilon_1(t) = 2[1 - 0,5(e^{-0,055t} + e^{-0,008t})] \sigma_1. \quad (12)$$

Как видно из фиг. 4а, формула (12) достаточно хорошо описывает опытные данные.



Фиг. 4.

Согласно теории упруго-ползучего тела [1], связь между мерой ползучести бетона при чистом сдвиге и мерой ползучести при осевом сжатии имеет следующий вид:

$$\omega(t, \tau) = 2[1 + \nu_2^*(t, \tau)] C(t, \tau), \quad (13)$$

где ν_2^* является коэффициентом поперечной деформации ползучести, который зависит как от возраста бетона в момент загрузки, так и от длительности загрузки.

Из немногочисленных опытов известно, что поперечные деформации ползучести при сжатии намного меньше, чем соответствующие упругие деформации [6, 7]. В некоторых опытах поперечная ползучесть практически не наблюдалась [8].

На основании сказанного, в пределах линейной ползучести можно считать, что $\nu_2^*(t, \tau) = 0$. Тогда формула (13) примет следующий вид:

$$\omega(t) = 2C(t). \quad (14)$$

Таким образом, получается, что при сдвиге мера ползучести бетона примерно в два раза больше, чем мера ползучести бетона при сжатии. Справедливость этого положения подтверждается также опытами Дуке и Девиса [9] и И. Е. Прокоповича [5].

Подставляя в формулу (14) значение меры ползучести бетона при осевом сжатии по формуле (12), получим

$$\omega(t) = 2 \times 2 [1 - 0.5 (e^{-0.055t} + e^{-0.008t})] \times 10^{-5}. \quad (15)$$

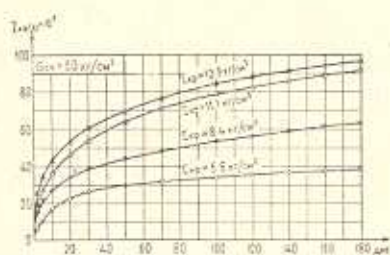
Тогда интенсивность деформаций ползучести при чистом кручении

$$\varepsilon_i(t) = 4 [1 - 0.5 (e^{-0.055t} + e^{-0.008t})] \sigma_i \times 10^{-5}, \quad (16)$$

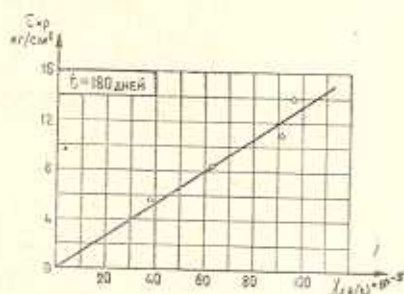
где при чистом кручении $\sigma_i = 9,64 \text{ кг/см}^2$.

Как видно из фиг. 4б, формула (16) с достаточной точностью описывает экспериментальные кривые ползучести бетона чистого кручения.

На фиг. 5 приведены кривые интенсивностей деформаций ползучести полых цилиндрических образцов при сложно-напряженном состоянии от крутящей нагрузки, прикладываемой во втором этапе загрузки. Как видно, с увеличением крутящего напряжения $\tau_{кр}$ деформация ползучести $\gamma_{кр}(t)$ возрастает, причем, эта зависимость носит линейный характер (фиг. 6).



Фиг. 5.

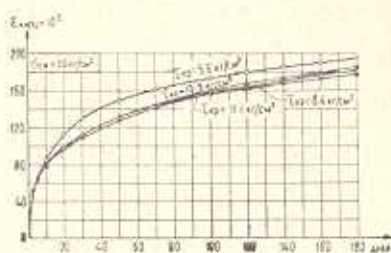


Фиг. 6.

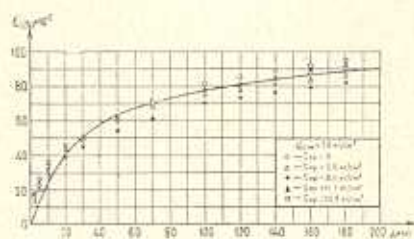
На фиг. 7 приведены кривые ползучести только от начальной сжимающей нагрузки, которая для всех образцов была одна и та же ($\sigma = 50 \text{ кг/см}^2$). Опыты показывают, что, независимо от величины крутящего напряжения, деформации ползучести от сжимающего напряжения практически равны. Это говорит о том, что крутящая нагрузка не оказывает влияния на величину деформаций ползучести от сжимающей нагрузки, прикладываемой на первом этапе загрузки.

На нижних четырех графиках фиг. 4 были приведены кривые интенсивностей деформаций ползучести при сложно-напряженном состоянии—сжатии с последующим кручением, при разных значениях крутящих напряжений. Сравнение этих кривых показывает, что крутящее напряжение, прикладываемое во втором этапе загрузки, практически не оказывает влияния на интенсивность деформаций ползучести при сложно-напряженном состоянии. Несмотря на существен-

ное увеличение деформаций ползучести кручения, с увеличением крутящего напряжения при переходе к интенсивностям деформаций ползучести, влияние этих деформаций стирается. Это обстоятельство весьма наглядно видно на фиг. 8, где экспериментальные данные интенсивностей деформаций ползучести при сложно-напряженном состоянии представлены одной общей кривой. Указанная кривая построена по формуле (12), которой была описана кривая интенсивностей деформаций ползучести простого напряженного состояния—чистого сжатия.



Фиг. 7.



Фиг. 8.

Таким образом, из этих опытов можно сделать важный вывод, что кривая интенсивностей деформаций ползучести бетона при чистом осевом сжатии одновременно представляет кривую интенсивностей деформаций ползучести сложно-напряженного состояния—сжатие с последующим кручением.

Причиной этого, несомненно, надо считать то обстоятельство, что крутящее напряжение, прикладываемое к бетону, мало изменяет интенсивность напряжений при сложно-напряженном состоянии. В наших опытах при чистом осевом сжатии $\sigma_1 = 50 \text{ кг/см}^2$, а при сложно-напряженных состояниях соответственно — $50,9 \text{ кг/см}^2$, $52,1 \text{ кг/см}^2$, $53,4 \text{ кг/см}^2$ и $55,5 \text{ кг/см}^2$. Максимальное приращение интенсивности напряжения не превышает 11% .

В ы в о д ы

1. При испытании полых цилиндрических бетонных образцов на сложно-напряженное состояние—осевое сжатие с последующим кручением, с увеличением сжимающей нагрузки до определенного предела, прочность бетона на кручение увеличивается, а при дальнейшем увеличении сжимающей нагрузки имеет место обратное явление. Уменьшение прочности бетона на кручение после критической сжимающей нагрузки является следствием того, что при этом в бетоне образуются и развиваются микротрещины, отрицательное влияние которых возрастает по мере увеличения сжимающей нагрузки.

2. Зависимость интенсивность напряжений—интенсивность деформаций бетона при сложно-напряженном состоянии—осевое сжатие с последующим кручением, в большой мере зависит от величины на-

чальной сжимающей нагрузки. Чем больше сжимающая нагрузка, тем больше интенсивность деформаций.

3. При чистом сдвиге мера ползучести бетона примерно в 2 раза больше, чем мера ползучести при осевом сжатии.

4. Кривая интенсивностей деформаций ползучести бетона при простом напряженном состоянии — чистом сжатии, одновременно представляет кривую интенсивностей деформаций ползучести сложно-напряженного состояния — сжатие с последующим кручением.

5. Теория упруго-ползучего тела Г. Н. Маслова — Н. Х. Арутюняна вполне применима для описания кривых ползучести бетона при сложно-напряженном состоянии — сжатии с последующим кручением.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 17 I 1966

Կ. Ս. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Թ. Ա. ԿՈՏԻՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԻ ՍՈՂՔԸ ԲԱՐՊ ԼՈՐՎԱԾԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ ԴԵՓՈՐՄԱՑԻԱ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում բերված են բետոնի սողքի փորձնական հետազոտությունների արդյունքները առանցքային սեղման և ոլորման բարդ լարվածային վիճակի դեպքում: Հետազոտությունները ցույց են տվել որ առանցքային սեղմող ուժի մեծացումից կախված մեծանում է բետոնի ամրությունը ոլորման դեպքում, մինչև մի որոշ սահման: Որից հետո սեղմող ուժի ավելացումը բերում է հակառակ երևույթին:

Գեֆորմացիաների ինտենսիվությունը բարդ լարվածային վիճակում էսպես կախված է սկզբնական սեղմող ուժից: Որքան մեծ է այդ ուժը, այնքան մեծ է գեֆորմացիաների ինտենսիվությունը:

Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ գոյություն ունի գծային կապ սեղման դեպքում սողքի շափի $C(t, \tau)$ և ոլորման դեպքում սողքի շափի $\omega(t, \tau)$ -ի միջև:

$$\omega(t, \tau) = 2C(t, \tau).$$

Պարզվել է, որ բարդ լարվածային վիճակում (սեղմում-ոլորում) սողքի գեֆորմացիաների ինտենսիվությունների կորը միաժամանակ հանդիսանում է մարուք սեղման լարվածային վիճակի սողքի գեֆորմացիաների ինտենսիվության կորը: Վերջինս հնարավորություն է տալիս անցում կատարելու պարզ լարվածային վիճակից-բարդին:

Ստացված էքսպերիմենտալ կորերը բավականաչափ լավ գրանցվել են Գ. Ն. Մասլոյի և Ն. Բ. Հարությունյանի սողքի տեսությանը:

K. S. KARAPETIAN, R. A. KOTIKIAN

THE CREEP OF CONCRETE IN COMPOUND STRESS STATE

S u m m a r y

Results of experimental investigations of concrete creep in axial compression with successive torsion in the compound stress state are elucidated in the paper.

It has been shown that in pure compression of stress state the curve of deformation intensivity of creep is simultaneously the curve of deformation intensivity of creep of a compound stressed state.

Besides, these investigations have shown that the creep dimension at torsion is twice as much as creep dimension at compression.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М.—Л., 1952.
2. Карапетян К. С. Ползучесть бетона при кручении. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 15, № 6, 1962.
3. Карапетян К. С. Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении. ДАН АрмССР, 38, № 3, 1964.
4. Карапетян К. С., Котикян Р. А. Исследование прочности и деформативности бетона при сложно-напряженном состоянии. ДАН АрмССР, 39, № 4, 1964.
5. Прокопович И. Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние сооружений. Госстройиздат, 1963.
6. Davis R. E., Davis H. E., Brown E. H. Plastic Flow of Concrete under Sustained Stress. Proc. of the Amer. Soc. for Test. Mat., Part II, 1934.
7. Glanville W. H. and Thomas F. G. Further Investigations on the Creep of Flow of Concrete under Load. Studied in Reinforced Concrete IV Building Research Technical Paper, № 21, London, 1939.
8. The Experimental and Mathematical Analysis of Arch Dams with special reference to Dams by Professor Deryck Norman de Carrs, Allen M. A., Lotitia Chitty Ma, AMJ CE, professor Alfred John Sutton Pippard. The Institution of Civil Engineers, Part I, v. 5, May, 1956, № 3.
9. Duke C. M. and Davis H. H. Some Properties of Concrete under Sustained Combined Stresses. American Society for Testing Material, Proceedings, vol. 44, 1944.