СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA OF TESTING HEAVY CONCRETE WITH SIMULATION RESULTS

Приводятся результаты сравнения экспериментальных данных испытаний тяжелого бетона с результатами моделирования. Исследовались данные по прочности бетона при кратковременном одноосном сжатии, двухосном сжатии, сжатии с растяжением и трехосном пропорциональном сжатии. Для модели приняты характеристики, полученные из результатов испытания бетона при осевом сжатии. Совпадение результатов моделирования с данными экспериментов удовлетворительное.

Ключевые слова: экспериментальные данные, моделирование, сжатие с растяжением, двухосное сжатие, трехосное сжатие, напряжение сжатия, кратковременное одноосное сжатие.

The article presents the results of comparison of experimental data of testing heavy concrete with the simulation results. There were studied data on the strength of concrete under short-term uniaxial compression, biaxial compression, compression with tension, and triaxial proportional compression. The model uses the characteristics obtained from the results of testing concrete under axial compression. Comparison of the results of numerical study and the testing results has shown a satisfactory convergence.

Keywords: experimental data, modeling, compression with tension, biaxial compression, triaxial compression, compressive stress, short-term uniaxial compression.

Определение прочностных свойств бетона в различных напряженных состояниях при силовых воздействиях продолжает оставаться очень актуальным в связи с совершенствованием расчетов строительных конструкций. Вместе с тем используемые прочностные критерии бетона в значительной мере определяются параметрами, получаемыми непосредственно из его испытаний. Поэтому целью настоящей работы является оценка возможности прогнозирования поведения тяжелых бетонов в условиях динамического нагружения и сложных напряженных состояний с получением исходных данных из результатов испытаний на осевое сжатие. Для решения этой проблемы была выполнена модель, описанная в работах [14–16].

Представленные в настоящее время экспериментальные данные отличаются не только методиками проведения экспериментов, испытательным оборудованием, технологией изготовления,

размерами и формой образцов, но и исследуемыми параметрами. Такое разнообразие экспериментального материала в значительной мере затрудняет его обработку и использование в качестве исходного.

В настоящей статье приведены результаты по моделированию поведения тяжелого бетона при динамическом нагружении, плоском напряженном состоянии и трехосном пропорциональном сжатии. В качестве исходного экспериментального материала принята работа [12], выполненная под руководством профессора Ю. Н. Малашкина и имеющая все необходимые данные для построения модели по методике, изложенной в [14, 15].

В работе [12] содержатся следующие данные:

- значения нижних и верхних параметрических точек по результатам испытания бетона $R_b = 20,5$ МПа на осевое сжатие. По графику $\sigma-\epsilon$

значение нижней параметрической точки составляет $R_T^0 = 0,40R_b$;

- зависимости для определения коэффициента динамического упрочнения:

$$k_{b,v} = 1 + 0,04\sqrt{(\lg \sigma')^3}, \quad (1)$$

где σ' — скорость нагружения, МПа/с.

По экспериментальным данным при $\sigma' = 470$ МПа/с $k_{b,v} = 1,18$;

- зависимость для определения прочности бетона при статическом двухосном сжатии ($\sigma_1 \geq \sigma_2$):

$$R_{b2}^{\sigma} = 1 + 1,5(\sigma_2 / R_b) - 1,27(\sigma_2 / R_b)^2; \quad (2)$$

- зависимость для определения прочности бетона при статическом сжатии-растяжении:

$$R_{br2}^{\sigma} = 1 + 1,22(\sigma_2 / R_b) - (\sigma_2 / R_b)^2. \quad (3)$$

Прочность тяжелого бетона при динамическом (кратковременном) одноосном нагружении. Результаты моделирования поведения бетона при кратковременном одноосном сжатии приведены в [15]. Проведем сравнение результатов моделирования с данными [12, 13], в качестве исходных характеристик для модели приняты фактические значения нижней параметрической точки R_T^0 и прочность бетона при осевом сжатии R_b :

- максимальное значение коэффициента динамического упрочнения для тяжелого бетона $R_b = 20,5$ МПа и $R_T^0 = 0,40R_b$ по модели составит:

$$k_{\text{ду max}} = 1 + (R_b - R_T^0) / R_b = \\ = 1 + (20,5 - 0,40 \cdot 20,5) / 20,5 = 1,60;$$

- для скорости нагружения $\sigma' = 470$ МПа/с коэффициент упрочнения по модели:

$$k_{\text{ду}} = 1 + (R_b - R_T^0) / R_b [0,0014(\lg \sigma')^3 + \\ + 0,0045(\lg \sigma')^2 + 0,0429(\lg \sigma') + 0,001] = \\ = 1 + 0,60[0,0014(\lg 4610)^3 + 0,0045(\lg 4610)^2 + \\ + 0,0429(\lg 4610) + 0,001] = \\ = 1 + 0,60(0,0014 \cdot 49,19 + 0,0045 \cdot 13,42 + \\ + 0,0429 \cdot 3,67 + 0,001) = 1 + 0,172 = 1,172.$$

По экспериментальным данным [12, 13] $k_{\text{ду}} = k_{b,v} = 1,18$; по зависимости (1):

$$k_{\text{ду}} = k_{b,v} = 1 + 0,04\sqrt{(2,672)^3} = 1 + 0,175 = 1,175.$$

Ниже приведено аналогичное сравнение результатов моделирования с данными других исследователей:

- по [11]: $R_b = 396,6$ кг/см², $R_T^0 = 0,41R_b$, $\sigma' = 448,0$ кг/(см² · с), $k_{\text{ду}} = 1,13$;

по результатам моделирования $k_{\text{ду}} = 1,10$;

- по [11]: $R_b = 396,6$ кг/см², $R_T^0 = 0,41R_b$, $\sigma' = 1140,3$ кг/(см² · с), $k_{\text{ду}} = 1,15$;

по результатам моделирования $k_{\text{ду}} = 1,126$;

- по [8]: $R_b = 240,0$ кг/см², $R_T^0 = 0,355R_b$, $\sigma' = 5568,0$ кг/(см² · с), $k_{\text{ду}} = 1,16$;

по результатам моделирования $k_{\text{ду}} = 1,157$.

Вывод: расхождение экспериментальных данных с результатами моделирования по [14] составляет менее 4,0 %.

Прочность тяжелого бетона при двухосном сжатии. В работе [14] приведена методика по составлению модели поведения бетона при двухосном сжатии.

Для тяжелого бетона, представленного в [12], для $R_b = 20,5$ МПа и $R_T^0 = 0,40R_b$ по расчету 20 решеток размером 20×20 получены следующие результаты:

- для $0,30 \geq (\sigma_2 / R_b) > 0$ $\sigma_3 / R_b = 1 + 0,70(\sigma_2 / R_b)$;
- для $1,21 \geq (\sigma_2 / R_b) > 0,30$ $\sigma_3 / R_b = 1,21 = \text{const.}$ (4)

Возможно представление результатов моделирования в виде «плавной» функции [16].

Сравнение результатов моделирования по (4) и полученных по зависимости (2) приведено на рис. 1.

Максимальный рост прочности по [12] составляет 43 % в отличие от 21 % по результатам моделирования.

Однако в ряде работ [1, 4, 10] рост прочности при двухосном сжатии не наблюдался, что объяснялось отсутствием трения по граням образцов при испытании бетона.

В [12] не приведены данные по способу уменьшения трения по граням.

Значительный рост прочности бетона, особенно при низких уровнях бокового обжатия, может объясняться наличием трения по граням образца, создающего «эффект трехосного сжатия».

Если обратиться к работам А. П. Кудзиса [9], то при учете возможных погрешностей испытания бетона при двухосном сжатии, диапазон ожидаемого прироста прочности для марок 200–500 при уровнях обжатия $(\sigma_2 / R_b) = 0,5$ может составить (5,0...30,0) %, а при уровнях обжатия $\sigma_2 = \sigma_3$ он равен (0...15) % по сравнению с осевым сжатием, что вполне укладывается в рамки результатов моделирования.

Рис. 1. Прочность бетона при двухосном сжатии: 1 — по результатам [12], зависимость (2); 2 — по результатам моделирования, зависимость (4)

Вывод: причину расхождения экспериментальных данных с результатами моделирования следует искать в условиях проведения эксперимента на двухосное сжатие.

Вместе с тем представленная модель обоснованно указывает на рост прочности бетона при двухосном сжатии, обозначая причину такого роста.

Прочность бетона при двухосном сжатии-растяжении. Методика испытаний образцов при двухосном сжатии и сжатии-растяжении в [12] заключалась в предварительном загрузении образцов сжимающей нагрузкой с последующим разрушением сжимающей или растягивающей нагрузкой.

Для тяжелого бетона (по данным [12]) $R_b = 20,5$ МПа и $R_T^0 = 0,40R_b$ по расчету 20 решеток размером 20×20 (порядок «загружения» модели: сжатие — выдержка — растяжение до разрушения) получена зависимость вида

$$\sigma_{lt} / R_{bt} = -0,481(\sigma_2 / R_b)^3 - 0,914(\sigma_2 / R_b)^2 + 0,395(\sigma_2 / R_b) + 1,0. \quad (5)$$

При совместном действии сжимающих и растягивающих нагрузок изменение прочности в координатах $(\sigma_{lt}/R_{bt}) - (\sigma_2/R_b)$ может быть пред-

ставлено функцией вида (получена по минимальным значениям прочности [16])

$$(\sigma_{lt} / R_{bt})^{1,67} + (\sigma_2 / R_b)^{1,67} = 1,0. \quad (6)$$

Сравнение результатов [12] с моделированием (5) представлено на рис. 2.

Вывод: расхождение результатов эксперимента с моделированием составляет не более 12 %. Следует отметить, что порядок приложения нагрузок оказывает существенное влияние на получаемые результаты.

Прочность бетона при трехосном пропорциональном сжатии (в работе [12] такие исследования не проводились).

Порядок определения прочности тяжелого бетона при трехосном пропорциональном сжатии представлен в работе [14]. Одной из ключевых точек при определении прочности бетона являлось значение бокового обжатия, при котором сохраняется картина разрушения, аналогичная осевому сжатию. В статье [14] было принято значение $\sigma_3/\sigma_1 = 0,075$, которое получено как среднее значение по данным, приведенным в [6]. Однако в [6] имеются некоторые неточности: расположение трещин отрыва под углом не более 10° по тексту отмечено при напряжениях $\sigma_3/\sigma_1 = 0,10$, но по приведенному графику и полученной зависи-

Рис. 2. Прочность бетона при сжатии-растяжении: 1 — по результатам [12], зависимость (3); 2 — по результатам моделирования, зависимость (5); 3 — по результатам моделирования, зависимость (6)

мости — при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$. В результате дополнительного анализа работ [2, 5, 7] было подтверждено значение $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$. В остальном методика, представленная в [14], осталась без изменения.

Тогда для бетона, представленного в [12], и зависимости вида

$$\sigma_3 = R_b + k\sigma_1 \quad (7)$$

коэффициент эффективности бокового обжатия k может быть определен как

$$k = [1 + a - a(\sigma_3/\sigma_1)] / [b + (1 - b)(\sigma_3/\sigma_1)]. \quad (8)$$

По рекомендациям, представленным в [14], получим:

- для $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$ $k = 7,50$;
- для $\sigma_3/\sigma_1 = 0,20$ $k = 3,75$;
- для $\sigma_3/\sigma_1 = 1,0$ $k = 1,0$.

Откуда для (8) получим значения ($a = 0,048$; $b = 0,096$):

- для $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$ $k = 7,42$;
- для $\sigma_3/\sigma_1 = 0,20$ $k = 3,76$;
- для $\sigma_3/\sigma_1 = 1,0$ $k = 1,0$.

В работах Н. И. Карпенко (например, в [7]) по результатам обработки многочисленных экспериментов приведены коэффициенты a и b для минимальных и средних значений эффективно-

сти бокового обжатия k : результаты сравнения с прогнозом для бетона, испытанного на осевое сжатие в [12], представлены на рис. 3.

Также для оценки работы методики, указанной в [14], выполнен анализ результатов экспериментов, приведенных в Рекомендациях по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при неоднородных напряженных состояниях (далее — Рекомендации НИИЖБ)¹ (в примерах ниже: данные по Рекомендациям НИИЖБ, МПа/данные по [13], МПа (погрешность в %)):

1. Для кубиковой прочности $R = 18,0$ МПа призмная прочность (по Рекомендациям НИИЖБ) составит $R_b = 0,8R = 14,4$ МПа, а $R_T^0 = 0,255R_b$ по [3]. Для этих значений R_b в (8) коэффициенты определяются, как $a = 0,038$; $b = 0,076$, тогда:

- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,10$: 36,0 МПа/37,3 МПа (+3,5 %);
- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,177$: 70,6 МПа/60,0 МПа (–18 %).

2. Для кубиковой прочности $R = 50,5$ МПа призмная прочность (по Рекомендациям

¹ Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при неоднородных напряженных состояниях. М.: НИИЖБ, 1985. 72 с.

Рис. 3. Коэффициент эффективности бокового обжатия k :
1 — по результатам моделирования; 2 — для минимальных значений по [7]; 3 — по средним значениям по [7]

НИИЖБ) составит $R_b = 0,8R = 40,3$ МПа, а $R_T^0 = 0,41R_b$ по [3]. Для этих значений R_b в (8) коэффициенты определяются, как $a = 0,048$; $b = 0,096$, тогда:

- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,08$: 80,6 МПа/80,1 МПа (-0,6 %).

3. Для кубиковой прочности $R = 41,2$ МПа призмная прочность (по Рекомендациям НИИЖБ) составит $R_b = 0,8R = 33,0$ МПа, а $R_T^0 = 0,382R_b$ [3]. Для этих значений R_b в (8) коэффициенты определяются, как $a = 0,045$; $b = 0,09$, тогда:

- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,056$: 59,4 МПа/56,3 МПа (-5,5 %);
- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,11$: 89,7 МПа/83,0 МПа (-8,1 %);
- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,125$: 105,6 МПа/91,0 МПа (-16,0 %).

4. Для кубиковой прочности $R = 36,8$ МПа призмная прочность (по Рекомендациям НИИЖБ) составит $R_b = 0,8R = 29,44$ МПа, а $R_T^0 = 0,365R_b$ [3]. Для этих значений R_b в (8) коэффициенты определяются, как $a = 0,045$; $b = 0,09$, тогда:

- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,05$: 49,0 МПа/48,0 МПа (-2,1 %);
- при $\sigma_3/\sigma_1 = 0,082$: 71,0 МПа/61,2 МПа (-16,0 %).

Полученные на основе моделирования эмпирические зависимости показывают удовлетворительное совпадение с данными экспериментов

других исследователей. Таким образом, представленная модель может быть использована для анализа поведения обычных тяжелых бетонов в условиях кратковременного осевого сжатия и сложного напряженного состояния. Данные для модели могут быть получены из результатов испытания бетона в условиях осевого сжатия. Описанные в [14–16] модель и методика могут рассматриваться как первый шаг для получения предварительного «паспорта прочности бетона в сложных напряженных состояниях» по результатам одноосных испытаний. Вместе с тем предложенные модель и методика определения прочностных характеристик бетона нуждаются в дальнейшей широкой экспериментальной проверке.

Библиографический список

1. Берг О. Я., Смирнов Н. В. О прочности бетона при двухосном сжатии // Бетон и железобетон. 1965. № 11. С. 37–39.
2. Берг О. Я., Соломенцев Г. Г. Исследование напряженного и деформированного состояния бетона при трехосном сжатии // Исследование деформации, прочности и долговечности бетона транспортных сооружений: сб. ст. под ред. О. Я. Берга. М.: Транспорт, 1969. (Труды ВНИИ транспортного строительства. Вып. 70.) С. 70–76.

3. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон / под ред. О. Я. Берга. М.: Стройиздат, 1971. 196 с.

4. Бобров В. В. Методы оценки влияния различных факторов на процесс микроразрушений бетона под нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 128 с.

5. Жиренков А. Н. Деформирование и прочность обычного тяжелого бетона при сложном напряженном состоянии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 26 с.

6. Жиренков А. Н., Карцев Н. В., Красновский Р. О. Особенности разрушения существенно неоднородных материалов при одноосном и объемном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 3 (20). С. 111–113.

7. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 413 с.

8. Коробцева О. В. Работы бетона при малоцикловом и однократном динамическом нагружении в условиях сложных напряженных состояний: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1992. 25 с.

9. Кудзис А. П., Ноткус А.-И. И. О погрешностях двухосных испытаний бетона // Бетон и железобетон. 1978. № 6. С. 32–34.

10. Теличко В. Г., Зиборов Л. А. Исследование прочности при двухосном сжатии бетона класса В-25 // Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. № 1–2. С. 89–94.

11. Тимзарян А. Г., Аветисян Л. А. К учету коэффициента динамического упрочнения при расчете железобетонных колонн в условиях огневых воздействий // Вестник ИргТУ. 2014. № 9 (92). С. 133–138.

12. Цветков К. А. Влияние динамического нагружения на прочностные и деформативные свойства бетона при одноосных и двухосных напряженных состояниях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 24 с.

13. Цветков К. А., Митрохина А. О. Особенности влияния динамического нагружения на поведение бетона на различных этапах деформирования при одноосном и двухосном сжатии // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 77–85.

14. Цветков С. В. Прогнозирование прочности тяжелых бетонов в условиях двух- и трехосного пропорционального сжатия // Технологии бетонов. 2018. № 7–8 (144–145). С. 25–29.

15. Цветков С. В. Динамическая прочность тяжелого бетона при одноосном сжатии // Технологии бетонов. 2019. № 3–4 (152–153). С. 26–28.

16. Цветков С. В. Прогнозирование прочности тяжелого бетона в условиях плоского напряженного состояния // Технологии бетонов. 2020. № 7–8 (168–169). С. 39–42.

References

1. Berg O. Ya., Smirnov N. V. O prochnosti betona pri dvukhosnom szhatii [On the strength of concrete under biaxial compression]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and Reinforced Concrete*, 1965, no. 11, pp. 37–39.

2. Berg O. Ya., Solomentsev G. G. Issledovanie napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya betona pri trekhosnom szhatii [Investigation of the stressed and deformed state of concrete under triaxial compression]. Sbornik statey «Issledovanie deformatsii, prochnosti i dolgovechnosti betona transportnykh sooruzheniy» [In: Coll. of works «Research of deformation, strength and durability of concrete of transport structures»]. Ed. by Berg O. Ya. Moscow, *Transport (Trudy VNII transportnogo stroitel'stva) – Transport (Proceedings of the Transport Construction Research Institute)*, 1969, no. 70, pp. 70–76.

3. Berg O. Ya., Shcherbakov E. N., Pisanko G. N. Vysokoprochniy beton [High-strength concrete]. Ed. by Berg O. Ya. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 196 p.

4. Bobrov V. V. Metody otsenki vliyaniya razlichnykh faktorov na protsess mikrorazrusheniy betona pod nagruzkoj. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods for assessing the impact of various factors on the process of micro-fracture of concrete under load. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2015, 128 p.

5. Zhirenkov A. N. Deformirovanie i prochnost' obychnogo tyazhelogo betona pri slozhnom napryazhennom sostoyanii: avtoref. Diss. kand. tekhn. nauk [Deformation and strength of normal weight concrete under complex stress state. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2009, 26 p.

6. Zhirenkov A. N., Kartsev N. V., Krasnovskiy R. O. Osobennosti razrusheniya sushchestvenno neodnorodnykh materialov pri odnoosnom i ob'emnom szhatii [Fracture features of significantly inhomogeneous materials in uniaxial and triaxial compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 3 (20), pp. 111–113.

7. Karpenko N. I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 413 p.

8. Korobtseva O. V. Raboty betona pri malotsiklovom i odnokratnom dinamicheskom nagruzhении v usloviyakh slozhnykh napryazhennykh sostoyaniy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Concrete performance under low-cycle and single-time dynamic loading in conditions of complex stress states. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 1992, 25 p.

9. Kudzis A. P., Notkus A.-I. I. O pogreshnostyakh dvukhosnykh ispytaniy betona [About errors in biaxial testing of concrete]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 1978, no. 6, pp. 32–34.

10. Telichko V. G., Ziborov L. A. Issledovanie prochnosti pri dvukhosnom szhatii betona klassa V-25

[Investigation of the strength of class B-25 concrete under biaxial compression]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of TulsU. Technical Sciences*, 2009, no. 1–2, pp. 89–94.

11. Timzaryan A. G., Avetisyan L. A. *K uchetu koefitsienta dinamicheskogo uprochneniya pri raschete zhelezobetonnykh kolonn v usloviyakh ognevykh vozdeystviy* [About accounting for the coefficient of dynamic hardening in the calculation of reinforced concrete columns in the conditions of fire impacts]. *Vestnik IrGTU – Bulletin of IrSTU*, 2014, no. 9 (92), pp. 133–138.

12. Tsvetkov K. A. *Vliyanie dinamicheskogo nagruzheniya na prochnostnye i deformativnye svoystva betona pri odnoosnykh i dvukhosnykh napryazhennykh sostoyaniyakh*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Influence of dynamic loading on the strength and deformation properties of concrete under uniaxial and biaxial stress states. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2007, 24 p.

13. Tsvetkov K. A., Mitrokhina A. O. *Osobennosti vliyaniya dinamicheskogo nagruzheniya na povedenie betona na razlichnykh etapakh deformirovaniya pri*

odnoosnom i dvukhosnom szhatii [Features of the influence of dynamic loading on the behavior of concrete at various stages of deformation under uniaxial and biaxial compression]. *Vestnik MGSU – Bulletin of the MGSU*, 2013, no. 7, pp. 77–85.

14. Tsvetkov S. V. *Prognozirovanie prochnosti tyazhelykh betonov v usloviyakh dvukh- i trekhosnogo proporsional'nogo szhatiya* [Forecasting the strength of heavy concrete under conditions of two- and three-axis proportional compression]. *Tekhnologii betonov betonov – Technologies of concrete*, 2018, no. 7–8 (144–145), pp. 25–29.

15. Tsvetkov S. V. *Dinamicheskaya prochnost' tyazhelogo betona pri odnoosnom szhatii* [Dynamic strength of heavy concrete under uniaxial compression]. *Tekhnologii betonov – Technologies of concrete*, 2019, no. 3–4 (152–153), pp. 26–28.

16. Tsvetkov S. V. *Prognozirovanie prochnosti tyazhelogo betonav usloviyakh ploskogo napryazhennogo sostoyaniya* [Forecasting the strength of heavy concrete in the conditions of a flat stressed state]. *Tekhnologii betonov – Technologies of concrete*, 2020, no. 7–8 (168–169), pp. 39–42.