

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДАМИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DATA FOR FORECASTING THE LONG-TERM STRENGTH OF SOLID BODIES BY THE FRACTURE MECHANICS METHODS

Рассматриваются результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса разрушения твердого тела (бетона) методами механики разрушения. Представлены результаты экспериментальных исследований характера развития трещин в образцах тяжелого бетона, которые подвергались кратковременному температурному воздействию до 300 °C (573 K) и 400 °C (673 K) и остыванию или же вовсе не нагревались (20 °C). Установлено, что длительная прочность бетона после кратковременного нагрева до 300 °C снижается весьма мало, а температурное воздействие до 400 °C приводит к резкому снижению длительной прочности бетона.

Ключевые слова: прочность, деформация, температурное воздействие, трещина, ползучесть, разрушение, мера деструкции.

The paper considers the results of theoretical and experimental studies of the process of solid body (concrete) destruction by the fracture mechanics methods. The results of experimental studies of the crack propagation nature in heavy concrete samples which were exposed to short-term temperature effects up to 300 °C (573 K) and 400 °C (673 K) and cooling or not heated at all (20 °C) are presented. It has been established that the long-term strength of concrete after short-term heating up to 300 °C decreases very little, whereas the temperature effect up to 400 °C leads to a sharp decrease in the long-term strength of concrete.

Keywords: strength, deformation, temperature effect, crack, creep, destruction, measure of destruction.

Процесс разрушения твердого тела, учитывающий состояние его структуры, наличие в нем дефектов, микро- и макротрещин, описывает механика разрушений. Работы многих авторов посвящены использованию методов механики разрушения для расчетов прочности бетона и железобетонных конструкций [1–8].

Приложенные напряжения определяют время до разрушения образцов твердых тел при сжатии, а увеличение напряжений приводит к уменьшению времени до их разрушения.

Время разрушения многих металлических и полимерных материалов можно определить, используя формулу С. Н. Журкова [9]:

$$t_0 = \tau_0 \exp \frac{U - \gamma \sigma}{kT}, \quad (1)$$

где t_0 — время разрушения; U — энергия активации химических связей (в ненапряженном со-

стоянии); τ_0 и k — постоянные; T — абсолютная температура; γ — структурный коэффициент.

Механические напряжения приводят лишь к снижению энергии активации, а разрушение образца происходит в результате разрыва механических связей под действием тепловых флуктуаций.

Использование формулы (1) возможно при рассмотрении разрушения образца без учета развития и зарождения отдельных трещин, а также без учета физических причин разрушения. Теории длительной прочности, основанные на введении некоторой абстрактной меры поврежденности θ ($0 \leq \theta \leq 1$), тоже не затрагивают физических причин разрушения. Такие теории предполагают инвариантность свойств рассматриваемого материала относительно сдвига по оси времени. В свою очередь бетон как ста-

реющий материал не является инвариантным в указанном смысле, и поэтому применимость всех теорий к бетону затруднена.

Некоторые теории длительной прочности бетона основаны на рассмотрении абстрактной реологической модели [10] или исходят из энергетической концепции [11]. Эти теории хорошо описывают снижение длительной прочности, но не касаются причин разрушения материала. Расчет, учитывающий совместные действия внешней нагрузки и неблагоприятных условий внешней среды, впервые был предложен О. Я. Бергом [12]. Однако подход Ю. В. Зайцева [1], основанный на механике разрушения бетона, анализе физической картины разрушения и поведения трещин в условиях длительного нагружения, более детально анализирует прочность бетона. Остановимся на некоторых основных положениях этой теории.

Пусть момент времени t в рассматриваемой модели соответствует достижению суммарной длины трещин S и некоторого предельного значения $S_{кр}$, сопровождающегося образованием магистральной трещины, а предел кратковременной прочности образца равен $R(t)$.

Определим кратковременную прочность $R(\tau_1)$ материала в момент времени τ_1 и длительную прочность материала $R_q(t, \tau_1)$ при действии нагрузки между моментами времени τ_1 и t :

$$R(\tau_1) = q_*(\tau_1) = \sqrt{2E(\tau_1)\gamma(\tau_1)} \cdot q(S_{кр}); \quad (2)$$

$$R_q(t, \tau_1) = q_*(t, \tau_1) = \sqrt{\frac{2E(\tau_1)\gamma(t)}{1 + E(\tau_1)C(t, \tau_1)}} \cdot q(S_{кр}), \quad (3)$$

где q_* — критическое значение нагрузки; $C(t, \tau_1)$ — удельная относительная деформация ползучести, определяемая из опытов на бетонных образцах; $E(\tau_1)$ — модуль упругости материала.

Учитывая, что

$$\frac{\gamma(t)}{\gamma(\tau_1)} = m^2(t, \tau_1) \frac{R^2(t)/R^2(\tau_1)}{E(t)/E(\tau_1)},$$

где $m(t, \tau_1)$ — множитель, учитывающий влияние предшествующего нагружения материала на изменение его кратковременной прочности, из (2) и (3) получим для определения предела длительной прочности

$$\eta(t, \tau_1) = \frac{R_q(t, \tau_1)}{R(\tau_1)} =$$

$$= \frac{m(t, \tau_1)R(t)}{R(\tau_1)} \sqrt{\frac{E(\tau_1)}{E(t)} \frac{1}{1 + E(\tau_1)C(t, \tau_1)}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) с учетом

$$\Phi(t, \tau_1) = \frac{R(\tau_1)}{m(t, \tau_1)R(t)} \sqrt{\frac{E(t)}{E(\tau_1)} [1 + E(\tau_1)C(t, \tau_1)]},$$

где $\Phi(t, \tau_1)$ — некоторая функция, зависящая от соотношения деформационных свойств материала при кратковременном и длительном действии нагрузки (функция состояния материала), получим

$$\eta(t, \tau_1) = 1 / \Phi(t, \tau_1). \quad (5)$$

Формулу (4) для определения предела длительной прочности можно записать в другом виде:

$$\eta(t, \tau_1) = \frac{m(t, \tau_1)R(t)}{R(\tau_1)} \sqrt{\frac{1}{1 + E(t)C^*(t, \tau_1)}}, \quad (6)$$

где $C^*(t, \tau_1)$ — мера ползучести.

Согласно [13] для предельного случая, когда материал обладает свойствами упругого тела, т. е. ползучесть отсутствует, $C^*(t, \tau_1) = 0$.

Для описания характера структурных изменений материала при заданной постоянной длительной нагрузке вводим функцию

$$M(t, \tau_1) = \rho \Phi(t, \tau_1), \quad (7)$$

где $\rho = \sigma_q/R_t$ — относительный уровень длительной нагрузки σ_q (в долях от кратковременной прочности материала).

Рассмотрим характер изменения функции $M(t, \tau_1)$ для различных уровней длительной нагрузки. Значение $M(t, \tau_1)$ может изменяться в пределах от 0 до 1. Для ненагруженного материала, т. е. при начальном уровне загрузки $\rho = 0$, $M(t, \tau_1) = 0$.

Разрушению материала соответствует значение $M(t, \tau_1) = 1$. Величину $M(t, \tau_1)$ называют мерой использования материала, или же *мерой деструкции материала*.

Если нагрузка лежит ниже предела длительной прочности и не может вызвать разрушения материала, то при этом $\sigma_q < R_q$ и $\rho < \eta(t, \tau_1)$ для любых $t > \tau_1$ (рис. 1, а). В этом случае $M(t, \tau_1) < \eta(t, \tau_1) \Phi(t, \tau_1)$ и с учетом (5) получим

$$M(t, \tau_1) < 1. \quad (8)$$

Если же нагрузка выше предела длительной прочности и приводит к разрушению материала в некоторый момент времени (рис. 1, б):

$$t = t_1 (t_1 < t_*);$$

$$\rho = \eta(t_1, \tau_1);$$

$$M(t_1, \tau_1) = \rho(t_1, \tau_1) \Phi(t_1, \tau_1),$$

тогда величина

$$M(t_1, \tau_1) = 1. \quad (9)$$

Если нагрузка в точности будет равна пределу длительной прочности (рис. 1, в), т. е.

$$\rho = \eta_* = \eta(t_*, \tau_1),$$

то аналогично предыдущему случаю получаем

$$M(t_*, \tau_1) = \eta(t_*, \tau_1) \Phi(t_*, \tau_1),$$

откуда

$$M(t_*, \tau_1) = 1. \quad (10)$$

Кратковременная прочность образца $R(t)$ исчерпывается при достижении в нем трещинами суммарной критической длины в момент времени t :

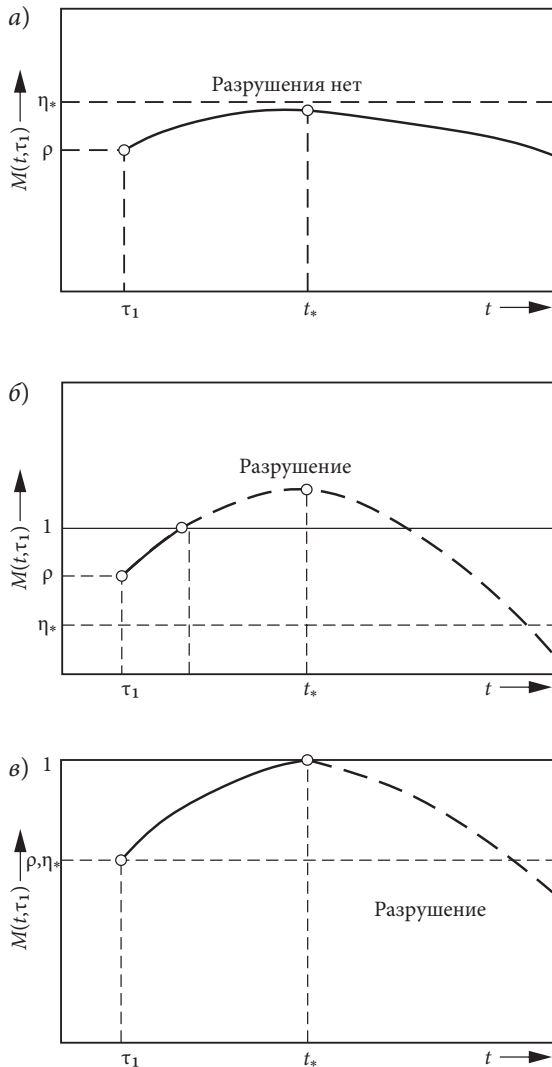


Рис. 1. Мера деструкции M при длительной нагрузке при напряжении: а — меньше предела длительной прочности; б — больше предела длительной прочности; в — равном пределу длительной прочности

$$S = S_*^{\text{КР}}(t). \quad (11)$$

Если к аналогичному образцу в момент времени τ_1 приложить длительно действующую нагрузку меньшей интенсивности, то сначала длина каждой из образовавшихся трещин не достигает критической, далее под действием ползучести в условиях длительного действия нагрузки трещины будут постепенно развиваться. Предел прочности при длительном действии нагрузки к моменту времени t будет достигнут, если длина растущих трещин окажется равной суммарной критической длине:

$$S = S_*^{\text{ДЛ}}(t). \quad (12)$$

При кратковременной и длительной нагрузках разрушение происходит при достижении трещинами одной и той же суммарной длины:

$$S_*^{\text{КР}}(t) = S_*^{\text{ДЛ}}(t), \quad (13)$$

где $S_*^{\text{КР}}(t)$; $S_*^{\text{ДЛ}}(t)$ — критическая суммарная длина трещин, соответственно, при кратковременном и длительном действии нагрузки. Аналогичный вывод получен в [14] и других работах.

Прочность материала при длительном действии нагрузки между моментами времени τ_1 и t равна:

$$R_q(t, \tau_1) = |q_*(t, \tau_1)|_{S=S_*^{\text{ДЛ}}} = \sqrt{\frac{\pi E(\tau_1) \gamma(\tau_1)}{1 + E(\tau_1) C(t, \tau_1)}} q [S_*^{\text{ДЛ}}(t)]. \quad (14)$$

Далее с учетом

$$\frac{\gamma(t)}{\gamma(\tau)} = \frac{m^2(t, \tau_1) R^2(t) / R^2(\tau_1)}{E(t) / E(\tau_1)} \frac{q^2 [S_*^{\text{КР}}(t)]}{q^2 [S_*^{\text{КР}}(\tau_1)]}$$

получим формулу относительного предела длительной прочности:

$$\eta(t, \tau_1) = \frac{m(t, \tau_1) R(t)}{R(\tau_1)} \sqrt{\frac{E(\tau_1)}{E(t)}} \frac{1}{1 + E(\tau_1) C(t, \tau_1)} \quad (15)$$

или

$$\eta(t, \tau_1) = \frac{m(t, \tau_1) R(t)}{R(\tau_1)} \sqrt{\frac{1}{1 + E(t) C^*(t, \tau_1)}}. \quad (16)$$

Используя последнюю формулу, можно вычислить теоретические кривые снижения длительной прочности бетона.

Различен характер развития трещин в образцах (10×10×40 см) тяжелого бетона с гранитным заполнителем, которые мы подвергали кратковременному температурному воздействию до 300 °С (573 °К) и 400 °С (673 °К) и остыванию или же вовсе не нагревали (20 °С) при относительном уровне сжимающих напряжений $\eta' = 0$ или

$\eta' = 0,5$ [15]. У ненагретых образцов наблюдается развитие магистральных трещин вдоль середины образца (рис. 2).

Кратковременный нагрев приводит к тому, что преобладающее разрушение призм бетона после нагрева происходило при наклонном к поверхности призмы развитии трещин (развитие трещин по сдвиговому механизму) (рис. 3).

Приложенная внешняя сжимающая нагрузка при кратковременном температурном воздействии на бетон существенного влияния на характер развития трещин не оказывает. Более высокая температура нагрева приводит к большему разрушению призмы при воздействии нагрузки (рис. 2–4).

Для описания характера развития трещин и разрушения образцов бетона после температурного воздействия до 300 и 400 °C может быть использована математическая модель развития трещин в бетоне при трехосном сжатии по теории Ю. В. Зайцева (рис. 5).

Дальнейшие этапы развития трещин могут быть исследованы методом Монте-Карло (метод статистических испытаний). На рис. 5 для одной из реализаций этого метода показаны последовательные этапы развития трещин в элементе материала, вплоть до процесса его разрушения.



Рис. 2. Трещины в призмах бетона при 20 °C



Рис. 3. Развитие трещин в ненагретых и нагретых без нагрузки (при $\eta' = 0$) призмах бетона

Экспериментальные данные по длительной прочности бетона после кратковременного температурного воздействия до 300 °C (573 K) и 400 °C (673 K) и соответствующие теоретические кривые, построенные с использованием

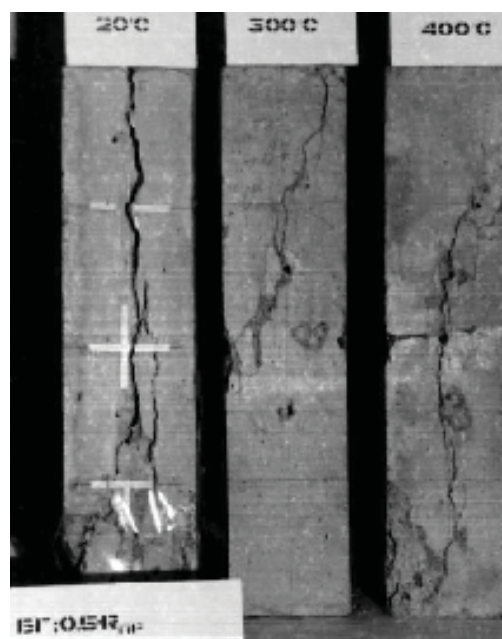


Рис. 4. Развитие трещин в ненагретых и нагретых под нагрузкой (при $\eta' = 0,5$) призмах бетона

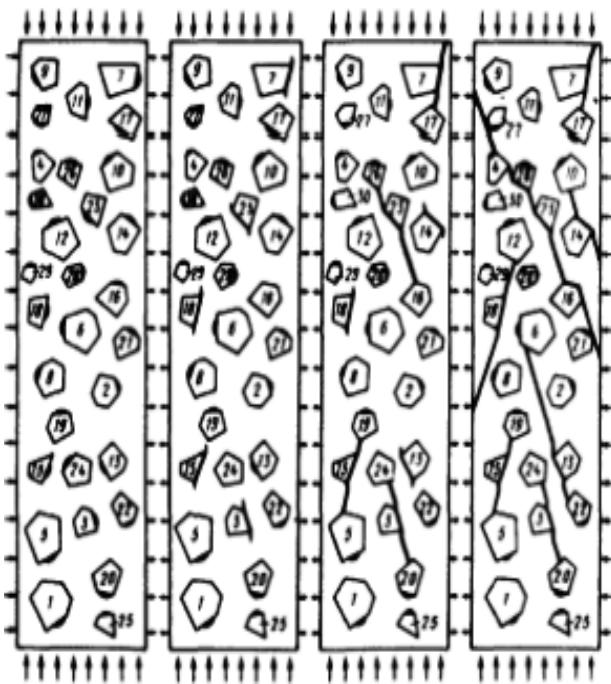


Рис. 5. Модель последовательных этапов развития трещин в бетоне при трехосном сжатии

описанного выше математического аппарата, представлены на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что теоретическая кривая снижения длительной прочности при 20 °С соответствует полученным экспериментальным данным. При температуре кратковременного нагрева образцов до 300 °С (573 К) снижение

длительной прочности бетона было невелико ($\eta = 0,95$). Теория механики неоднородных структур такой характер снижения прочности объясняет пониженной ползучестью этого бетона. Однако после кратковременного температурного воздействия на образцы бетона до 400 °С (673 К) падение длительной прочности уже достигало значения $\eta = 0,76$. При этом происходит глубокое нарушение структуры твердого тела.

Таким образом, показано, что прогнозирование длительной прочности бетона методами механики разрушения соответствует экспериментальным результатам. Установлено, что длительная прочность бетона после кратковременного нагрева до 300 °С (573 К) снижается весьма мало, а температурное воздействие до 400 °С (673 К) сильно нарушает структуру материала, что приводит к резкому снижению длительной прочности бетона.

Библиографический список

1. Зайцев Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.
2. Ашрабов А. А., Зайцев Ю. В. Элементы механики разрушения бетонов. Ташкент: Укитувчи, 1982. 288 с.
3. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

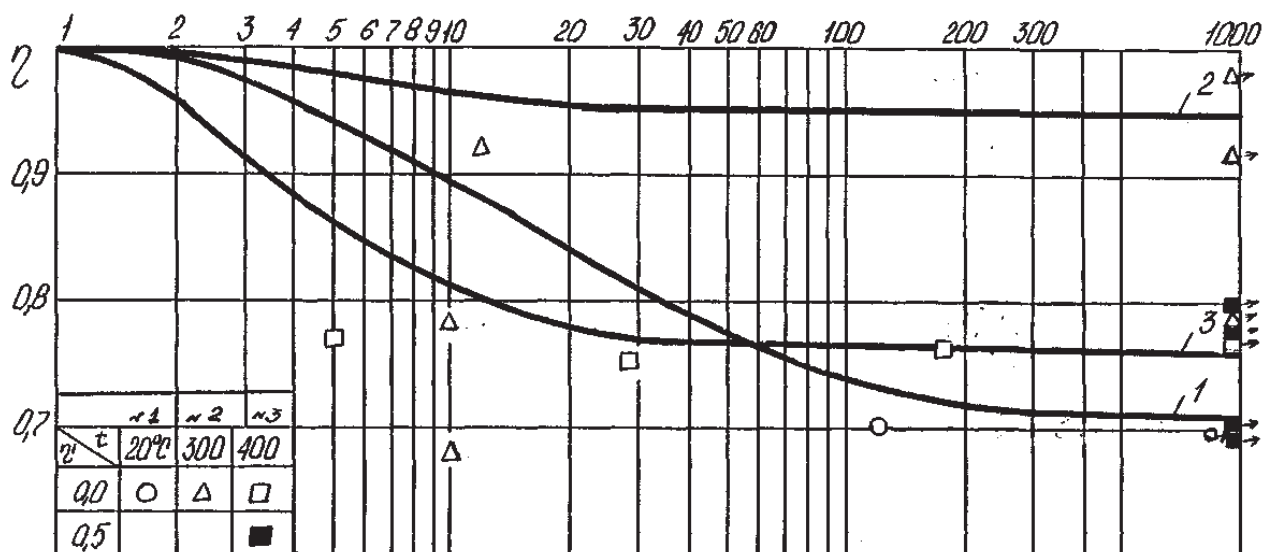


Рис. 6. Прогнозирование длительной прочности бетона после кратковременного температурного воздействия в зависимости от времени (сутки), температуры и относительного уровня сжимающих напряжений

4. Гузеев Е. А., Леонович С. Н., Милованов А. Ф., Пирадов К. А., Сейланов Л. А. Разрушение бетона и его долговечность. Минск: Тьдзень, 1997. 170 с.
5. Леонович С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушений. Минск: Тьдзень, 1999. 264 с.
6. Ашрабов А. А. Надежность и долговечность строительных систем. Ташкент: ТАДИ, 2012. 358 с.
7. Шубин И. Л., Зайцев Ю. В. Основы проектирования зданий и строительных конструкций. М.: Студент, 2016. 361 с.
8. Зайцев Ю. В., Шубин И. Л., Султыгова П. С. Разрушение высокопрочных материалов при многоосном сжатии // Сб. докл. IX Академических чтений РААСН — Междунар. науч. конф. «Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов». СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 35–39.
9. Журков С. И. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С. 46–52.
10. Скудра А. Н. Длительная прочность упруго-вязких тел // Вопросы динамики и длительной прочности. 1956. № 4. С. 5–19.
11. Бондаренко В. М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1968. 323 с.
12. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М.: Госстройиздат, 1982. 96 с.
13. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.
14. Бондаренко В. М., Бондаренко С. В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М.: Стройиздат, 1982. 289 с.
15. Зайцев Ю. В., Султыгова П. С. Оценка с позиции механики неоднородных структур длительной прочности и деформативности бетона после воздействия температур до 400 °С (673 °K) // Сб. докл. IX Академических чтений РААСН — Междунар. науч. конф. «Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов». СПб.: СПбГАСУ, 2016. С. 26–30.

References

1. Zaytsev Yu. V. *Modelirovanie deformatsiy i prochnosti betona metodami mekhaniki razrusheniya* [Modeling of deformations and durability of concrete by fracture mechanics methods]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 196 p.

2. Ashrakov A. A., Zaytsev Yu. V. *Ehlementy mekhaniki razrusheniya betonov* [Elements of concrete fracture mechanics]. Tashkent, Ukituvchi Publ., 1982, 288 p.
3. Karpenko N. I. *Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow, Stoyizdat Publ., 1996, 416 p.
4. Guzeev E. A., et al. *Razrushenie betona i ego dolgovechnost'* [Destruction of concrete and its durability]. Minsk, Tydzen' Publ., 1997, 170 p.
5. Leonovich S. N. *Treshchinostoykost' i dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh ehlementov v terminakh silovykh i ehnergeticheskikh kriteriev mekhaniki razrusheniy* [Crack resistance and durability of concrete and reinforced concrete members in terms of force and power criteria of the fracture mechanics]. Minsk, Tydzen' Publ., 1999, 264 p.
6. Ashrakov A. A. *Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh sistem* [Reliability and durability of construction systems]. Tashkent, 2012, 358 p.
7. Shubin I. L., Zaytsev Yu. V. *Osnovy proektirovaniya zdaniy i stroitel'nykh konstruktсий* [Basics of design of buildings and building constructions]. Moscow, Student Publ., 2016, 361 p.
8. Zaytsev Yu. V., Shubin I. L., Sul'tygova P. S. *Razrushenie vysokoprochnykh materialov pri mnogoosnom szhatii* [Destruction of high-strength materials at polyaxial compression]. *Trudy IX Akademicheskikh chteniy RAASN — Mezhdunar. nauch. konf. «Dolgovechnost', prochnost' i mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona i drugikh stroitel'nykh materialov»* [Proc. of the IX Academic Readings at the RAACS — Int. sci. conf. "Durability, strength and fracture mechanics of concrete, reinforced concrete and other construction materials"]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2016, pp. 35–39.
9. Zhurkov S. I. *Kineticheskaya kontseptsiya prochnosti tverdykh tel* [Kinetics concept of the solid body durability]. *Vestnik AN SSSR – Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, 1968, no. 3, pp. 46–52.
10. Skudra A. N. *Dlitel'naya prochnost' uprugovyazhushchikh tel* [Long term durability of elastic binding bodies]. *Voprosy dinamiki i dlitel'noy prochnosti – Issues of dynamics and long term durability*, 1956, no. 4, pp. 5–19.
11. Bondarenko V. M. *Nekotorye voprosy nelineynoy teorii zhelezobetona* [Some issues of the nonlinear theory of reinforced concrete]. Kharkiv, Kharkiv National University Publ., 1968, 323 p.
12. Berg O. Ya. *Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona* [Physical basics of the theory of concrete and reinforced concrete durability]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1982, 96 p.
13. Aleksandrovskiy S. V. *Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktсий na temperaturnye i vlazhnostnye vozdeystviya s uchetom polzuchesti* [Calculation of concrete and reinforced concrete designs

on temperature and moisture influences taking into account creep]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973, 432 p.

14. Bondarenko V. M., Bondarenko S. V. *Inzhenernye metody nelineynoy teorii zhelezobetona* [Engineering methods of the nonlinear theory of reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 289 p.

15. Zaytsev Yu. V., Sulygova P. S. *Otsenka s pozitsii mekhaniki neodnorodnykh struktur dlitel'noy prochnosti i deformativnosti betona posle vozhdeystviya temperatur do 400 °S(673 K)* [Assessment from the position of the

mechanics of non-uniform structures of long durability and deformability of concrete under effect of temperatures up to 400 °C (673 K)]. *Trudy IX Akademicheskikh chteniy RAASN — Mezhdunar. nauch. konf. «Dolgovechnost', prochnost' i mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona i drugikh stroitel'nykh materialov»* [Proc. of the IX Academic Readings at the RAACS — Int. sci. conf. "Durability, strength and fracture mechanics of concrete, reinforced concrete and other construction materials"]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2016, pp. 26–30.