

**ГАРЫНКИНА Е. Н.**  
**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА**

**ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОНОЛИТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ**

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований цементных композитов, выдержанных в агрессивной среде. Показана возможность применения экспериментальных данных для определения ресурса железобетонной конструкции. Предложена методика оценки и прогнозирования долговечности строительных конструкций. Определен ресурс монолитной железобетонной плиты перекрытия.

**Ключевые слова:** железобетон, деградация, агрессивная среда, модель деградации, ресурс, характеристики сорбции, долговечность, эксплуатация.

**GARYNKINA E. N.**

**FORECASTING OF RESOURCE OF REINFORCED MONOLITHIC CONCRETE SLABS**

**Abstract.** The results of experimental studies of cement composites aged in an aggressive environment are provided. The possibility of using the experimental data to determine the resource of concrete structures is shown. The method of assessment and prediction of building structures durability is suggested. The resource of a sample reinforced monolithic concrete slab is calculated.

**Keywords:** reinforced concrete, degradation, aggressive environment, degradation model, resource, characteristics of sorption, durability, operation.

В наши дни основным конструкционным материалом для строительных целей в Российской Федерации является железобетон. Железобетон – это композиционный строительный материал, который включает в себя бетон и сталь. Изделия из железобетона, имеющие ряд преимуществ по сравнению с другими материалами, с успехом эксплуатируются в строительстве.

На начальном этапе проектирования все здания и сооружения должны отвечать нормативным требованиям с учетом влияния действия нагрузок и агрессивных сред. Несоблюдение проектных рекомендаций ведет к преждевременному износу конструкций и их разрушению. Возрастающее число крупных и мелких аварий, выход объектов из строя ведет к потерям финансовых ресурсов. Только в России эти финансовые издержки оцениваются примерно в 20-25 миллиардов рублей ежегодно. Задача обеспечения долговечности и коррозионной стойкости железобетонных изделий и конструкций является актуальной. Для решения поставленной задачи необходимо разработать методику оценки и прогнозирования ресурса железобетонной конструкции с учетом реальных условий эксплуатации при совместном действии силовых и химически активных сред.

Многими отечественными и зарубежными учеными были описаны процессы коррозии, выявлены и описаны основные характеристики процесса разрушения строительных конструкций, предложены расчетные методы оценки долговечности. Н. С. Стрелецким был предложен универсальный подход по нахождению оптимального срока службы, который должен определяться по минимуму эксплуатационных расходов [1]. В. В. Болотиным, А. Р. Ржаницыным, В. М. Бондаренко, Е. А. Гузеевым, В. И. Соломатовым, В. П. Селяевым, А. И. Попеско и др. были предложены современные методы оценки расчета надежности и долговечности строительных конструкций, основанные на принципах теории вероятности, математической статистики и теории случайных процессов [2–4].

В данной работе рассматривается метод, основанный на применении деградационных функций для оценки и прогнозирования ресурса железобетонных конструкций.

Деградация – это процесс ухудшения характеристик, качества строительных материалов и конструкций при воздействии силовых факторов, химических веществ, живых организмов, агрессивных сред. Для оценки долговечности строительных изделий предложено вместо коэффициентов условий работы применять функции деградации, выражающие изменение во времени несущей способности или жесткости поперечного сечения элемента [4]. Каждому механизму деградации соответствуют определенные модели деградации. Общий вид деградационной функции можно представить выражением [5]:

$$D = \frac{B(t)}{B(0)} = f(t, T, \sigma, c, h, \alpha, a), \quad (1)$$

Метод деградационных функций позволяет комплексно оценивать действие агрессивных сред на элемент строительной конструкции. Вместе с этим появляется возможность учитывать интенсивность деструкции материала, вид напряженного состояния, размеры образца и их изменение под действием среды, распределение прочностных свойств по площади поперечного сечения.

Определение ресурса рассмотрим на примере расчета железобетонной плиты. Для описания процесса взаимодействия материала с агрессивной средой примем модель деградации по диффузионному типу (рис. 1). Диффузионные модели деградации применимы в тех случаях, когда скорости переноса и химического взаимодействия реакционно-способных компонентов материала и среды сопоставимы.

Основными параметрами модели являются: глубинный показатель  $a(t)$ , коэффициент химического сопротивления  $k_{xc}$ . Первый параметр  $a$  характеризует скорость продвижения фронта разрушения материала с поверхности вглубь образца. Вторым параметром  $k_{xc}$  является оценкой скорости изменения твердости или прочности внешних слоев материала, контактирующих с агрессивной средой.

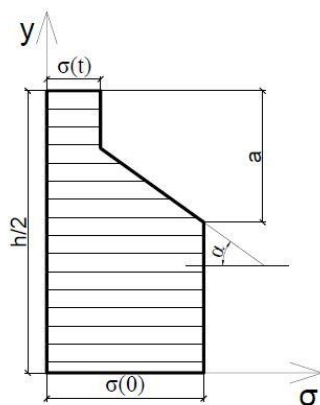


Рис. 1. Модель деградации.

Глубинный показатель предложено определять по сорбционным характеристикам  $m_0$  и  $t_{0,5}$ . На рисунке 2 приведены экспериментальные данные по изменению массы образцов, экспонированных в воде. Кривые сорбции хорошо описываются уравнением Ленгмюра:

$$m = \frac{m_0 t}{t + t_{0,5}}. \quad (2)$$

Линеаризация данных по сорбции в осях  $1/m - 1/t$  дает возможность определить  $m_0$  и  $t_{0,5}$ . На рисунке 3 показано, что экспериментальные данные изменения массы образцов, экспонированных в воде, хорошо описываются линейной зависимостью. По графикам (рис. 2 и 3) были получены сорбционные характеристики  $m_0$  и  $t_{0,5}$  (см. табл. 1). Коэффициент диффузии и глубинный показатель предложено [6; 7; 8] определять путем решений уравнений Ленгмюра и Фика по формулам:

$$D = 0,2 \frac{R^2}{t_{0,5}}; \quad (3)$$

$$a = 0,1\sqrt{Dt}. \quad (4)$$

Таблица 1

**Константы сорбции  $m_0$  и  $t_{0,5}$  для цементных образцов, экспонированных в  $H_2O$**

№ п/п	Среда	$m_0$ гр.	$t_{0,5}$ сут.	$\sigma(t)/\sigma(0)$		
				0	1	2
1	$H_2O$	0,09	191	1	0,802	0,592

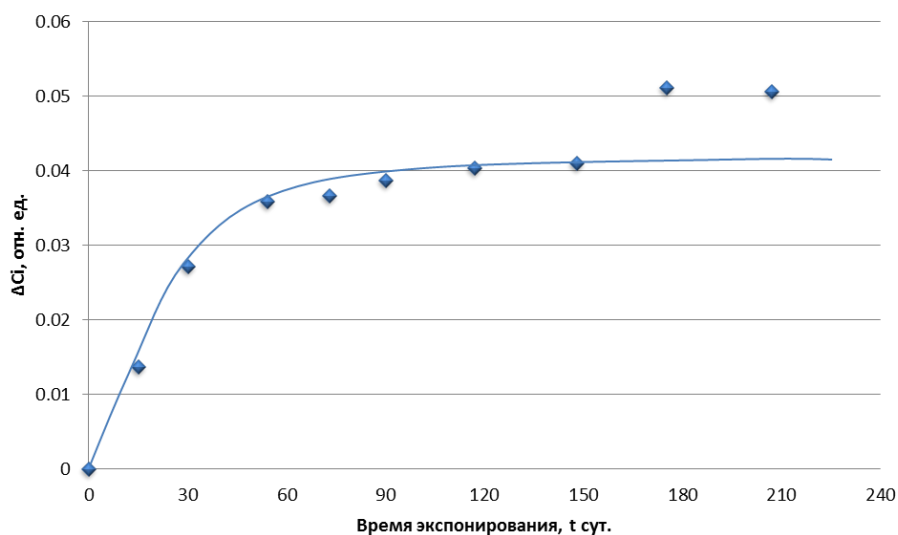


Рис. 2. Приращение по массе цементных композитов, выдержанных в H<sub>2</sub>O.

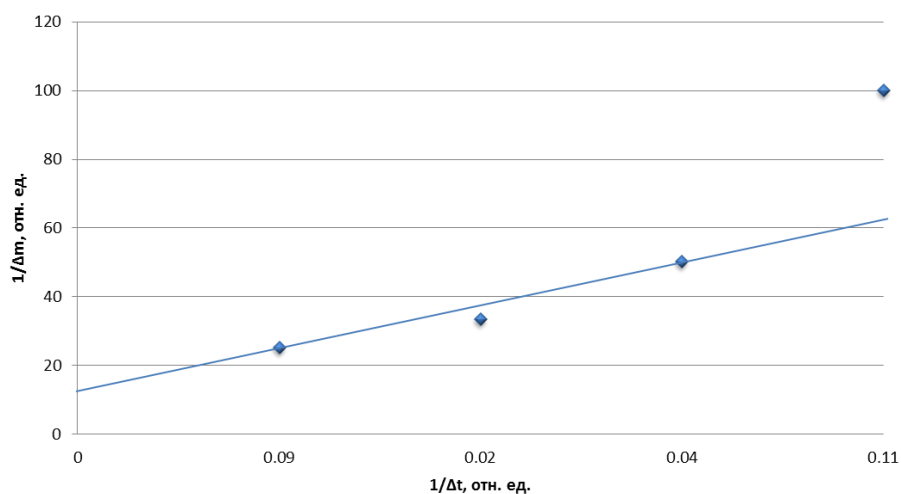


Рис. 3. Изменение массы цементных композитов, выдержанных в H<sub>2</sub>O.

Для определения второго параметра  $k_{xc}$  образцы выдерживались в агрессивной среде (H<sub>2</sub>O) при температуре 20 °С. После каждого периодического извлечения композитов из среды измерялась масса, определялся предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе. График изменения прочности приведен на рис. 4. Аналитическое описание изменений прочности цементных композитов во времени под действием агрессивной среды можно производить с применением закона взаимодействия веществ (Гульдберга – Вааге):

$$\vartheta = k c_1^h c_2^m c_3^o, \quad (5)$$

где  $\vartheta$  – скорость взаимодействия;  $c_1, c_2, c_3$  – концентрация веществ;  $h, m, o$  – порядок реакции,  $k$  – константа.

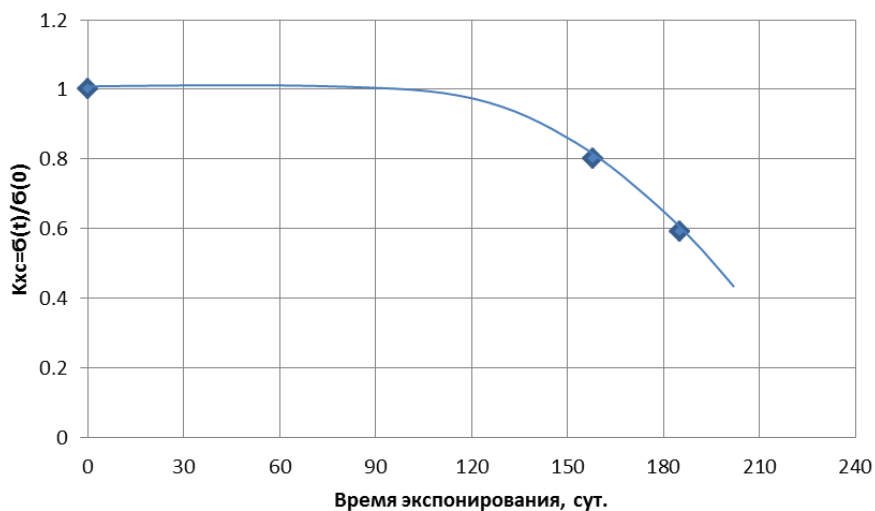


Рис. 4. Изменение прочности цементных образцов после экспонирования в воде.

Для обработки экспериментальных данных, представленных на рисунке 4, и определения параметра « $k$ » произведем линеаризацию (рис. 5 – 7) рассматриваемой функции (5). Рассмотрим моно-, би- и тримолекулярные модели взаимодействия. В первом случае

$$\ln K_{xc1} = l_u C_0 - k_1 t, \quad (6)$$

во втором –

$$1/K_{xc2} = 1/C_0 + k_2 t, \quad (7)$$

в третьем –

$$1/K_{xc3}^2 = 1/C_0^2 + 2k_3 t. \quad (8)$$

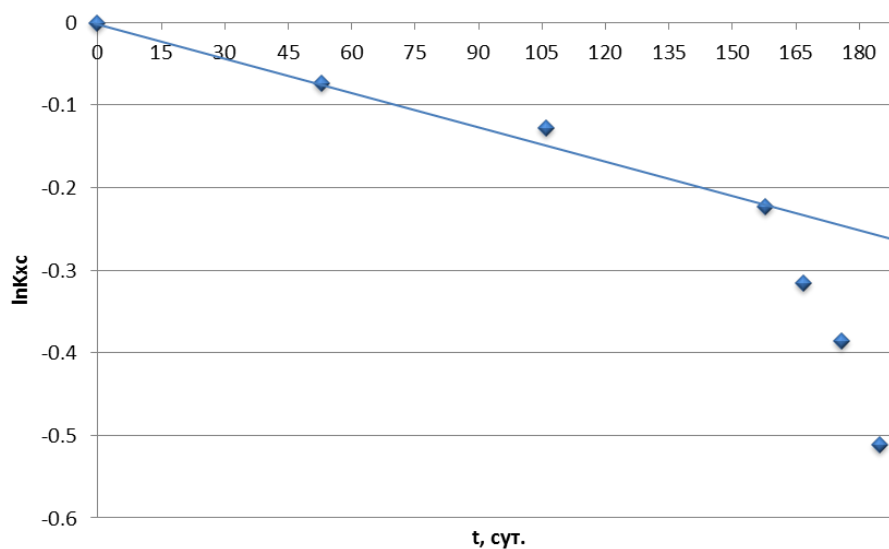


Рис. 5. Линеаризация мономолекулярной модели взаимодействия цементных образцов и воды.

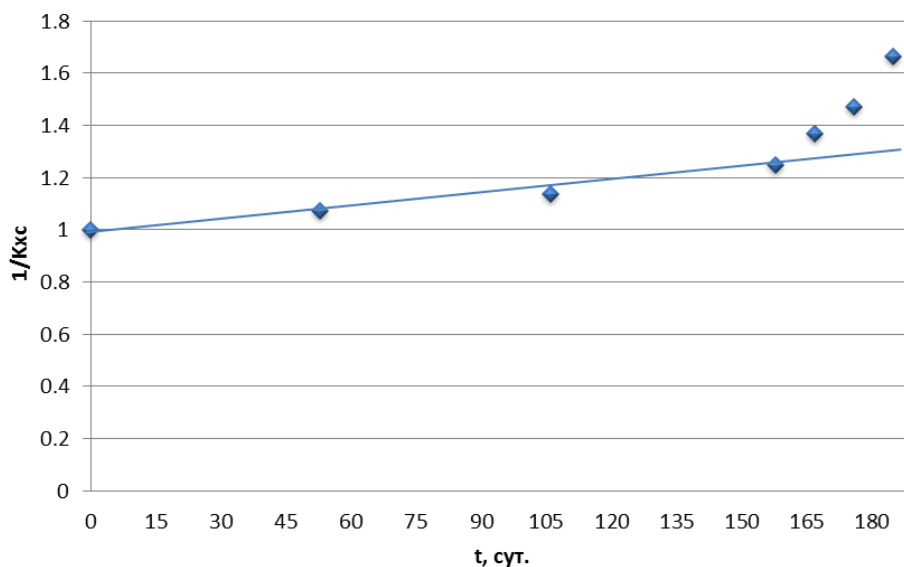


Рис. 6. Линеаризация бимолекулярной модели взаимодействия цементных образцов и воды.

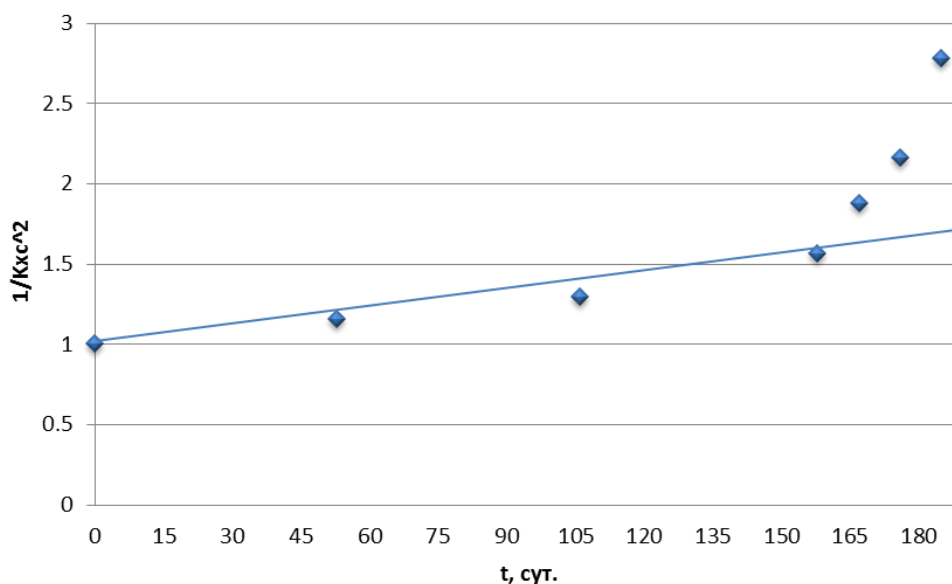


Рис. 7. Линеаризация тримолекулярной модели взаимодействия цементных образцов и воды.

Параметр « $k$ » по уравнению (7) равен:

$$k_2 = 0,002. \quad (9)$$

Результаты обработки экспериментальных данных с применением мономолекулярной модели показали, что она плохо описывает процесс деградации. В тоже время бимолекулярная модель более точно описывает результаты эксперимента.

Рассмотрено влияние воды на работу железобетонных конструкций.

Для оценки ресурса железобетонной плиты в качестве модели деградации, на основе которой будет производиться расчет, выбираем модель диффузионного типа (рис. 1) и соответствующую функцию деградации [9]:

$$D = \frac{M(t)}{M(0)} = 1 - \frac{\xi_{11}(1 - R_{bt}/R_b)}{1 - 0,5\xi_0} = 1 - \frac{\xi_{11}(1 - K_{xc})}{1 - 0,5\xi_0}. \quad (10)$$

Данные для расчета:  $h = 7\text{см}$ ,  $h_0 = 5,5\text{см}$ , класс бетона плиты В15,  $R_b = 8,5\text{ МПа}$ ,  $R_{bt} = 0,75\text{ МПа}$ . Арматура рабочая – обыкновенная проволока периодического профиля класса Вр500 диаметром 4 мм в сварной рулонной сетке:  $R_s = 415\text{ МПа}$ .

$$R = 4\text{ см}, k_{xc} = 0,002, \mu = 0,002, t_{0,5} = 191.$$

Коэффициент диффузии равен:

$$D = 0,2 \cdot \frac{R^2}{t_{0,5}} = 0,2 \cdot \frac{0,04^2}{191} = 1,68 \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

Глубинный показатель определяем по формуле:

$$a = k(\xi)\sqrt{Dt} = 0,1 \cdot \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t}; \quad (12)$$

$$\xi_{11} = \frac{a}{h_0} = \frac{0,1 \cdot \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t}}{0,055} = 1,82 \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t}; \quad (13)$$

$$\xi_0 = \mu \frac{R_s}{R_b} = 0,002 \cdot \frac{415}{8,5} = 0,0976; \quad (14)$$

$$D = \frac{M(t)}{M(0)} = 1 - \frac{\xi_{11}(1 - K_{xc})}{1 - 0,5\xi_0} = 1 - \frac{1,82 \sqrt{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t} (1 - 0,002)}{1 - 0,5 \cdot 0,0976}. \quad (15)$$

По полученным значениям уравнения (15) строим график деградационной функции (рис. 8).

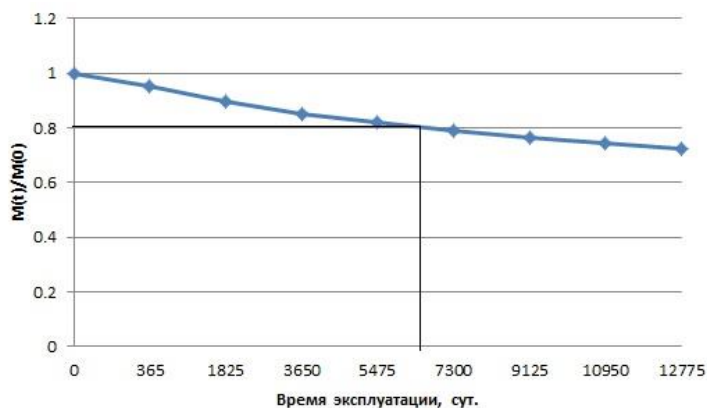


Рис. 8. Определение остаточного ресурса монолитной железобетонной плиты перекрытия методом деградационных функций.

По результатам проведенных исследований выявлено, что после примерно через 19 лет эксплуатации несущая способность плиты уменьшится на 20% и потребуются восстановление (ремонт) для дальнейшей нормальной эксплуатации данной конструкции. Поэтому для повышения ресурса данной конструкции необходимо обосновать выбор класса бетона и арматуры с учетом воздействия агрессивных сред.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелецкий Н. С. Разводные мосты. Основы проектировки и расчета. – М., 1924. – 312 с.
2. Болотин В. В. Методы теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982. – 351 с.
3. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
4. Соломатов В. И., Селяев В. П., Соколова Ю. А. Химическое сопротивление материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: РААСН, 2001. – 284 с.
5. Селяев В. П., Низина Т. А., Уткина В. Н. Химическое сопротивление и долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: учебное пособие / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Селяева В. П. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. – 48 с.
6. Селяев В. П., Куприяшкина Л. И., Седова А. А., Селяев П. В., Колотушкин А. В. Химическое сопротивление цементных композитов действию водных растворов, содержащих ионы хлора // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 1. – С. 17–25.
7. Селяев В. П., Уткина В. Н., Селяев П. В., Сорокин Е. В., Кечуткина Е. Л. Моделирование влияния коррозионных повреждений структуры бетона на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов. Часть 1. Формирование и изменение параметров модели // Сборник научных статей XXI научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», 16 марта 2017 г. – СПб., 2017. – С. 104–109.
8. Селяев В. П., Уткина В. Н., Селяев П. В., Сорокин Е. В., Кечуткина Е. Л. Моделирование влияния коррозионных повреждений структуры бетона на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов. Часть 2. Пример расчета несущей способности железобетонных изгибаемых элементов поврежденных коррозией // Сборник научных статей XXI научно-методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», 16 марта 2017 г. – СПб., 2017. – С. 104–109.
9. Селяев В. П. Расчет долговечности железобетонных конструкций // Вестник Мордовского университета. – № 4. – 2008. – С. 140–149.