

DOI: 10.12737/article_5c73fc0ef063c3.60645861

¹Смоляго Г.А., ^{1,*}Фролов Н.В.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*E-mail: frolov_pgs@mail.ru

ПРИКЛАДНОЙ СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ-АНАЛОГОВ

Аннотация. Статья посвящена проблемам долговечности изгибаемых железобетонных элементов, имеющих коррозионные повреждения бетона и арматуры. Отмечается, что из-за коррозионных повреждений материалов несущая способность эксплуатируемых железобетонных конструкций может снижаться вплоть до их разрушения. Для обеспечения безопасной эксплуатации зданий и сооружений необходимо располагать адаптированными методиками расчета, позволяющими с допустимой погрешностью определять остаточный ресурс конструкций, понятие которого применительно к строительным конструкциям многими исследователями трактуется по-разному. В задачах, не связанных с безопасностью прогнозирование развития коррозионных повреждений и уменьшения величины остаточного ресурса, предлагается выполнять прикладным способом, основанном на данных по обследованию текущего технического состояния исследуемых железобетонных конструкций и опыте эксплуатации идентичных конструкций (объектов-аналогов). Под объектами-аналогами в работе представляются здания и сооружения аналогичного функционального назначения, находящиеся в схожих климатических условиях и имеющие идентичные железобетонные конструкции. Приведена последовательность действий, по результатам которой можно определить остаточный срок службы изгибаемых железобетонных элементов. В заключение отмечена острая необходимость разработки с последующим включением в нормы проектирования универсальных методик расчета железобетонных конструкций и определения остаточного ресурса при эксплуатации под нагрузкой в агрессивных средах.

Ключевые слова: изгибаемый железобетонный элемент, коррозионное повреждение, остаточный ресурс, срок службы, прикладной способ, прогнозирование, время.

Введение. Проблемы долговечности эксплуатируемых железобетонных конструкций привлекают все возрастающее внимание. Это обусловлено тем, что фактический срок службы многих зданий и сооружений, выполненных из железобетона, на сегодняшний день превышает 60 лет и их количество ежегодно только растет. За такое длительное время с начала эксплуатации накапливаются различные технологические дефекты и средовые повреждения конструкционных материалов вследствие совместных силовых и средовых воздействий, что приводит к снижению несущей способности конструкций вплоть до их разрушения.

Определяющим показателем долговечности эксплуатируемых зданий и сооружений является остаточный ресурс основных несущих конструкций. Его расчет и прогнозирование является актуальной, сложной и информативной задачей при обеспечении дальнейшей безопасной эксплуатации строительных объектов, а также при обосновании экономической целесообразности капиталовложений в недвижимость, имеющую около или сверхнормативный срок службы.

В настоящее время существует ряд методов и основанных на них методик расчета остаточного ресурса железобетонных конструкций, описание которых подробно приведено в работах [1–3]. Присущие недостатки пока не позволяют считать какую-либо методику универсальной и включить ее в строительные нормы. Кроме того, к дополнительным сложностям приводит тот факт, что многие исследователи по-разному истолковывают само понятие остаточного ресурса строительных конструкций [4].

Согласно ГОСТ 27.002 «Надежность в технике», *остаточный ресурс* – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние. При этом под *наработкой* подразумевается продолжительность или объем работы объекта. То есть, остаточный ресурс железобетонных конструкций может быть выражен как в единицах времени, тогда под ним понимается остаточный (предельно допустимый) срок службы, так и в других единицах, например, относительных единицах силового сопротивления, диктуемых поверочными расчетами по двум группам предельных состояний, тогда под ним понимается некоторый

запас (прочности, устойчивости, деформативности и др.), при реализации которого наступит предельное состояние. На наш взгляд, трактовать термин остаточный ресурс более правильно именно по второму случаю, потому что здесь осуществляется непосредственная привязка к основным параметрам предельных состояний конструкций, а соответственно, технического состояния. Временной период, за который произойдет исчерпание запаса по одному из параметров (исчерпание минимального из ресурсов до нулевого значения), определяет остаточный срок службы конструкции и, таким образом, будет выдержана логическая последовательность в расчетах. Выполняя расчеты по прогнозированию остаточного ресурса, мы тем самым прогнозируем интенсивность исчерпания несущей способности, жесткости и трещиностойкости во времени и находим остаточный срок службы.

Разберем сказанное выше в виде упрощенного графика (рис. 1), описывающего изменение ресурса конструкции r во времени t . Начало координат соответствует моменту ввода объекта в эксплуатацию ($t = 0$), когда ресурс силового сопротивления имеет максимальную величину r_u ,

которая в большинстве эксплуатационных сред постоянна до определенного времени t_0 – прямой участок на графике (период ожидания коррозии, дефекты и повреждения незначительны). В рассматриваемый момент времени t_i на основании данных по натурному обследованию технического состояния конструкции определяется ее остаточный ресурс r_i . Зная функциональные зависимости изменения геометрических и деформативно-прочностных характеристик материалов с течением времени, выполняется прогнозирование остаточного ресурса до его полного исчерпания ($r = 0$), что будет соответствовать фактическому сроку службы конструкции t_u . Остаточный срок службы конструкции (остаточный ресурс, выраженный в единицах времени) T находится как разница времени t_u и t_i .

В ситуациях, когда произведены усиление или замена конструкций, начало координат соответствуют моменту возобновления эксплуатации после ремонта [5].

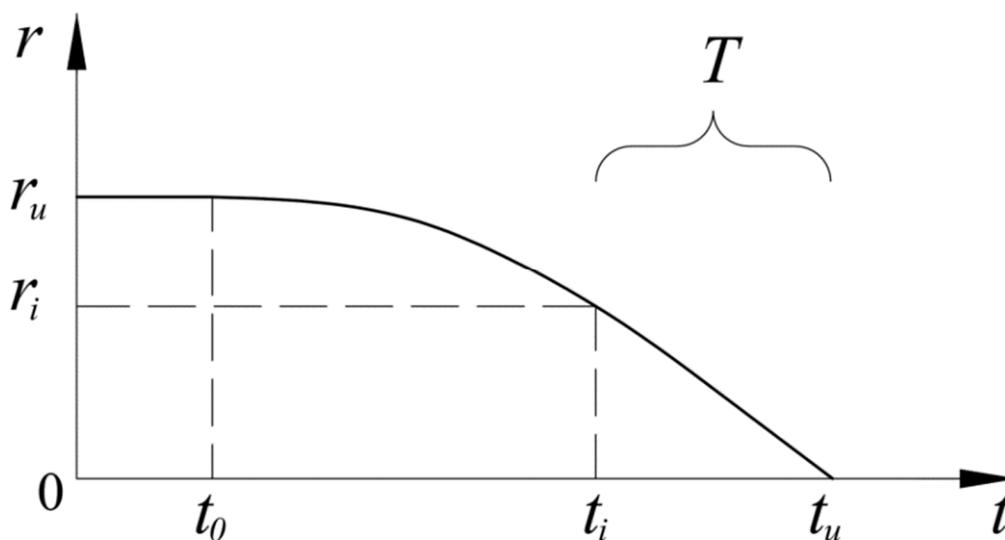


Рис. 1. Изменение ресурса (запаса) конструкции во времени

Для изгибаемых железобетонных элементов остаточный ресурс определяется как минимальный из всех рассчитанных по простой инженерной формуле (1). Данное выражение при необходимости дополняется другими видами расчетов по предельным состояниям и конструктивным требованиям [6]. Исправное состояние конструкции предполагает, что минимальный остаточный ресурс больше нулевого значения.

$$r_i = \min \begin{cases} 1 - \frac{M_{\max}}{M_u(t_i)} \\ 1 - \frac{Q_{\max}}{Q_u(t_i)} \\ 1 - \frac{f(t_i)}{f_u} \\ 1 - \frac{a_{crc}(t_i)}{a_{crc,u}} \end{cases}, \quad (1)$$

где M_{\max} и Q_{\max} – максимальные значения изгибающего момента и поперечной силы, возникающих в сечении элемента от внешней нагрузки; $M_u(t_i)$ и $Q_u(t_i)$ предельный изгибающий момент и поперечная сила, которые могут быть приняты сечением в рассматриваемый момент времени; $f(t_i)$ и $a_{cr}(t_i)$ – прогиб и ширина раскрытия трещин от действия внешней нагрузки в рассматриваемый момент времени; f_u и $a_{cr,u}$ – предельно допустимые значения прогиба и ширины раскрытия трещин, принимаемые по нормам проектирования.

Часто превалирующей причиной снижения несущей способности изгибаемых железобетонных элементов является негативное влияние агрессивной эксплуатационной среды, приводящей к коррозионным повреждениям бетона и арматуры [7]. При прогнозировании остаточного ресурса и определении остаточного срока службы таких конструкций необходимо знать кинетику коррозионных процессов в материалах [8–10, 14]. В отдельных случаях для этой цели может быть применен прикладной способ прогнозирования, описанный в настоящей работе.

Методика. При выполнении работы задействованы общенаучные методы исследования, основными из которых являются обобщение и аналогия принципов работы изгибаемых железобетонных элементов в агрессивных средах под нагрузкой.

Основная часть. В задачах, когда отсутствует вероятность внезапных отказов и напрямую не связанных с безопасностью [11, 12], например, при экономическом обосновании решений на краткосрочный период и финансовом планировании ремонтов, с достаточной точностью может быть применен прикладной способ прогнозирования коррозионных повреждений и остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов. Способ основывается на результатах натурных обследований технического состояния конструкций и учитывает опыт эксплуатации объектов-аналогов, под которыми понимаются здания и сооружения аналогичного функционального назначения, находящиеся в схожих климатических условиях и имеющие идентичные железобетонные конструкции.

Имеющийся опыт эксплуатации зданий и сооружений формируется экспертными организациями как информационный банк данных по основным параметрам, определяющим техническое состояние железобетонных конструкций за различный период эксплуатации. Стоит отметить, что здесь большую роль играет высокая квалификация экспертов, проводивших обследования.

Вначале проводят детальное обследование изгибаемых железобетонных элементов, на предмет обнаружения и измерения имеющихся коррозионных повреждений бетона и арматуры, измерения габаритных размеров, ширины раскрытия трещин, максимальных прогибов и т.д. Влияние агрессивной среды на бетон рассматривается как фактор, изменяющий его прочность, которая устанавливается известными неразрушающими методами контроля; количественной мерой коррозионного процесса является глубина нейтрализации композита, определяемая на сколе измерением микротвердости либо показателя рН. Считается, что прочность арматурной стали из-за процессов коррозии, меняется незначительно; количественной мерой является глубина коррозионного повреждения стержня [15].

Затем выполняются поверочные расчеты конструкций по предельным состояниям, и устанавливается их текущий остаточный ресурс по различным параметрам напряженно-деформированного состояния.

Далее по отдельности производится прогнозирование процессов развития коррозионных повреждений δ бетона и арматуры во времени t (рис. 2). Для этого, в соответствующую систему координат добавляются точки, характеризующие величину повреждений материалов конструкций объектов-аналогов и точка, характеризующая текущее значение повреждения материалов рассматриваемой конструкции. Для совокупности данных при помощи современных математических программных комплексов устанавливается аппроксимирующая функциональная зависимость $\delta = f(t)$, линия графика которой обязательно проходит через точку $(\delta_i; t_i)$. Если проводились периодические обследования исследуемых конструкций, то при аппроксимации учитывается несколько таких точек.

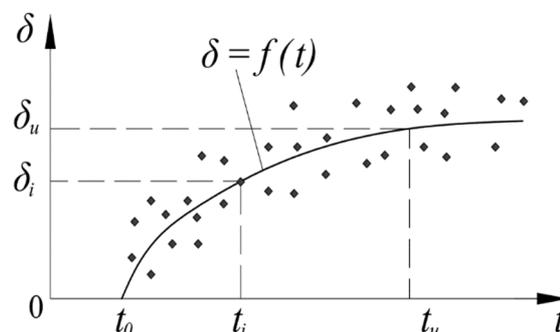


Рис. 2. Прогнозирование коррозионных повреждений с учетом опыта эксплуатации объектов-аналогов

Возможно применение различных функциональных зависимостей $\delta = f(t)$: линейной, степенной, логарифмической, экспоненциальной и

др. Это в большей степени зависит от вида агрессивной среды, вызывающей коррозию бетона и арматуры.

Выполняя прогнозирование текущих значений коррозионных повреждений δ_i до значений δ_u , при которых по расчетам наступит предельное состояние конструкции (полное исчерпание ресурса), мы в результате найдем ее остаточный срок службы.

Выводы. Накопление коррозионных повреждений бетона и арматуры сопровождается снижением несущей способности, жесткости и трещиностойкости эксплуатируемых железобетонных конструкций вплоть до их разрушения, что может стать причиной гуманитарного, экологического и экономического ущерба.

Для обеспечения безопасной эксплуатации изгибаемых железобетонных элементов, имеющих коррозионные повреждения, необходимо располагать адаптированными методиками расчета, позволяющими с допустимой погрешностью определять остаточный ресурс, что позволит находить время наступления предельного состояния, а соответственно, остаточный срок службы.

Прогнозирование коррозионных повреждений и остаточного ресурса с достаточной точностью вполне допустимо в настоящее время выполнять с помощью прикладного способа, основанного на данных по обследованию технического состояния конструкций и опыте эксплуатации идентичных конструкций (объектов-аналогов).

Назрела острая необходимость разработки с последующим включением в нормы проектирования универсальных методик расчета железобетонных конструкций и определения остаточного ресурса при эксплуатации под нагрузкой в агрессивных средах [13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ишков А.Н. Методы прогнозирования остаточного ресурса по II группе предельных состояний для изгибаемых железобетонных конструкций, эксплуатируемых в неагрессивных средах: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2007. С 26–42.
2. Байбурин А.Х., Байбурин Д.А. Некоторые аспекты оценки остаточного ресурса строительных конструкций // Наука и безопасность. 2011. № 1 (9). С. 16–22.
3. Дегтярь А.Н., Серых И.Р., Панченко Л.А., Чернышева Е.В. Остаточный ресурс конструкций зданий и сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 94–97.
4. Беляев С.М. Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. № 3 (11). С. 22–25.
5. Шилин А.А. Ремонт железобетонных конструкций: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во «Горная книга», 2010, 519 с.
6. Шматков С.Б. Расчет остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 22 (94). С. 56–57.
7. Селяев В.П., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Кечуткина Е.Л. Оценка влияния химически активных агрессивных сред на процесс деградации композитов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Ответственный редактор Т.А. Низина. 2018. С. 170–174.
8. Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 1 (70). С. 43–49.
9. Колчунов В.И., Андросова Н.Б. Прочность корродирующего бетона при одновременном проявлении силовых и средовых воздействий // Строительство и реконструкция. 2013. № 5 (49). С. 3–9.
10. Пахомова Е.Г., Меркулов Д.С., Гордеев А.В. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных конструкций при коррозионном повреждении бетона и арматуры // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2008. № 3-19. С. 29–32.
11. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов – необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник НИЦ «Строительство». 2009. №1. С. 160–171.
12. Меркулов С.И. Развитие теории конструктивной безопасности объектов в условиях коррозионных воздействий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 44–46.
13. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
14. Nygaard P., Geiker M., Elsener B. Corrosion rate of steel in concrete: evaluation of confinement techniques for on-site corrosion rate measurements // Materials and Structures. 2009. Vol. 42. Pp. 1059–1076.

15. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforce-

ment in concrete by means of the polarization resistance method // Materials and Structures. 2004. Vol. 37. Pp. 623–643.

Информация об авторах

Смоляго Геннадий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: trk-psv@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Фролов Николай Викторович, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: frolov_pgs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в декабре 2018 г.

© Смоляго Г.А., Фролов Н.В., 2019

¹*Smolyago G.A., ^{1,*}Frolov N.V.*

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46*

**E-mail: frolov_pgs@mail.ru*

APPLIED METHOD FOR PREDICTING CORROSION DAMAGES AND REMAINING RESOURCE OF BENDABLE REINFORCED CONCRETE ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT OPERATING EXPERIENCE OF SIMILAR PROJECTS

Abstract. *The article covers the problems of durability of bent reinforced concrete elements that have concrete and reinforcement corrosion damages. It is noted, due to corrosion damage of materials, the bearing capacity of the reinforced concrete structures in use can be reduced to destruction. To ensure the safe operation of buildings and structures, it is necessary to have adapted calculation methods that allow determining the remaining resources of structures with an acceptable deviation, the concept of which is interpreted differently by many researchers. Tasks not related to the safety of predicting corrosion damage and reducing the remaining resource are proposed to be performed by an applied method. The method is based on data of current technical condition survey of the reinforced concrete structures under study and operating experience of identical structures (similar objects). Buildings and structures of similar functional purpose, which are in similar climatic conditions and have identical reinforced concrete structures, are presented as analogous objects. A sequence of actions is given, the results of which can determine the remaining resource of bent reinforced concrete elements. In conclusion, the urgent need is noted to develop and subsequently include in the design standards of universal methods for calculating reinforced concrete structures and determining the remaining resource during operation under load in aggressive environments.*

Keywords: *bendable reinforced concrete element, corrosion damage, remaining resource, applied method, predicting, time.*

REFERENCES

1. Ishkov A.N. Methods for predicting residual life for group II of limit states for bent reinforced concrete structures used in non-aggressive environments: PhD dissertation. Voronezh, 2007, pp. 26–42.
2. Bayburin A.Kh., Bayburin D.A. Some aspects of the assessment of the residual life of building structures. Science and safety, 2011, no. 1 (9), pp. 16–22.
3. Degtyar A.N., Serykh I.R., Panchenko L.A., Chernysheva E.V. Residual life of buildings and structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2017, no. 10, pp. 94–97.
4. Belyaev S.M. Calculation of the residual life of buildings with regard to the stock bearing capacity of structures. Bulletin SGASU. Urban planning and architecture, 2013, no. 3 (11), pp. 22–25.
5. Shilin A.A. Repair of reinforced concrete structures: Proc. manual for universities. Moscow: Gornaya Kniga Publishing House, 2010, 519 p.
6. Shmatkov S.B. Calculation of the residual life of building structures of buildings and structures. Bulletin of the SUSU. Series: Building and Architecture, 2007, no. 22 (94), pp. 56–57.
7. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L. Evaluation of the influence of chemically active corrosive media on the process of degradation of composites. Durability of building materials, products and structures. Materials of the All-Russian scientific and technical conference. Responsible editor T.A. Nizina. 2018, pp. 170–174.

8. Smolyago G.A., Dronov A.V., Frolov N.V. Modeling the value of corrosion damage to reinforcement of reinforced concrete structures in a chloride aggressive environment. News of SWSU, 2017, no. 1 (70), pp. 43–49.

9. Kolchunov V.I., Androsova N.B. The strength of corrosive concrete with the simultaneous manifestation of power and environmental influences. Construction and reconstruction, 2013, no. 5 (49), pp. 3–9.

10. Pakhomova E.G., Merkulov D.S., Gordeev A.V. Strength and deformability of bent reinforced concrete structures in case of corrosion damage to concrete and reinforcement. News of the Oryol State Technical University. Series: Construction and Transportation, 2008, no. 3-19, pp. 29–32.

11. Tamrazyan A.G. Risk assessment and reliability of supporting structures and key elements - a necessary condition for the safety of buildings and structures. Bulletin of the "Construction" Center, 2009, no. 1, pp. 160–171.

12. Merkulov S.I. The development of the theory of constructive safety of objects in the conditions of corrosive effects. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2014, no. 3, pp. 44–46.

13. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures. Academia. Architecture and construction, 2015, no. 1, pp. 93–102.

14. Nygaard P., Geiker M., Elsener B. Corrosion rate of steel in concrete: evaluation of confinement techniques for on-site corrosion rate measurements. Materials and Structures, 2009, no. 42, pp. 1059–1076.

15. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. Materials and Structures, 2004, no. 37, pp. 623–643.

Information about the authors

Smolyago, Gennady A. DSc, Professor. E-mail: tpk-psv@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Frolov, Nikolay V. Postgraduate student. E-mail: frolov_pgs@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in Desember 2018

Для цитирования:

Смоляго Г.А., Фролов Н.В. Прикладной способ прогнозирования коррозионных повреждений и остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с учетом опыта эксплуатации объектов-аналогов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №2. С. 49–54. DOI: 10.12737/article_5c73fc0ef063c3.60645861

For citation:

Smolyago G.A., Frolov N.V. Applied method for predicting corrosion damages and remaining resource of bendable reinforced concrete elements taking into account operating experience of similar projects. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 2, pp. 49–54. DOI: 10.12737/article_5c73fc0ef063c3.60645861