

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.07

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-88-100

*Г.А. СМОЛЯГО, Н.В. ФРОЛОВ,
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова*

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

Статья посвящена проблемам обеспечения долговечности эксплуатируемых железобетонных конструкций зданий и сооружений. Указывается, что основными показателями долговечности выступают ресурс и срок службы. Их нормирование на сегодняшний день осуществлено обобщенно, недостаточно обоснованно и имеет лишь рекомендательный характер, а расчетные методики оценки долговечности в строительных нормативных документах пока отсутствуют. Актуальной и информативной представляется задача по определению остаточного ресурса эксплуатируемых железобетонных конструкций. При этом замечено, что преобладающей причиной снижения несущей способности железобетонных конструкций, а соответственно, остаточного ресурса являются повреждения бетона и арматуры из-за процессов коррозии, вызванных агрессивной эксплуатационной средой. В работе проанализированы имеющиеся методы и основанные на них методики по расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями; определены их преимущества и недостатки при практическом использовании специалистами в области обследования строительных конструкций. Отмечается, что определение остаточного ресурса целесообразно выполнять на основе результатов натурных обследований железобетонных элементов, когда в различных характерных сечениях выявлены максимальные значения коррозионных повреждений бетона и арматуры. Наиболее перспективным и приемлемым для оценки и прогнозирования остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов считается физико-статистический подход. Окончательно величину остаточного ресурса предлагается устанавливать с учетом коэффициента надежности по ресурсу. С учетом все возрастающих случаев преждевременной потери несущей способности железобетонных конструкций из-за развития коррозионных повреждений с течением времени отмечается необходимость включения в строительные нормы проектирования обязательных требований расчета по новому (третьему) предельному состоянию – по долговечности.

Ключевые слова: изгибаемый железобетонный элемент; коррозионное повреждение; остаточный ресурс; срок службы; методика расчета; несущая способность.

Для цитирования: Смоляго Г.А., Фролов Н.В. Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозион-

ными повреждениями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 88–100.
DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-88-100

G.A. SMOLYAGO, N.V. FROLOV,
Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov

MODERN APPROACHES TO RESIDUAL LIFE CALCULATION OF FLEXURAL STEEL CONCRETE ELEMENTS WITH CORROSION DAMAGE

The article is devoted to problems of ensuring durability of steel concrete elements of buildings. It is shown that durability depends on their residual and service life. Normalizing of the latter is generalized, not sufficiently substantiated and non-regulatory. Computational techniques to assess the construction durability are not yet available. Actual and informative is determining the residual life of steel concrete structures. It was noted that the reason for the reduction in the carrying capacity of steel concrete structures and, accordingly, the residual life is corrosion damage of concrete and reinforcement due to an aggressive environment. This paper analyzes the modern methods of calculating residual life of flexural elements with corrosion, identifies their advantages and disadvantages in building inspection. The residual life should be determined on the basis of field surveys, when the maximum corrosion damage is found in various design sections. The physical and statistical approach is the most promising and acceptable for assessing and predicting the residual life of flexural steel concrete elements. The value of the residual life is proposed to be established with regard to reliability coefficient. Considering the ever increasing cases of early loss of bearing capacity of steel concrete structures due to corrosion damage, it is advisable to include mandatory requirements in construction design standards of calculating on a new ultimate limit state.

Keywords: bending reinforced concrete element; corrosion damage; residual life; service life; calculation method; bearing capacity.

For citation: Smolyago G.A., Frolov N.V. *Sovremennye podkhody k raschetu ostatochnogo resursa zgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s korrozionnymi povrezhdeniyami* [Modern approaches to residual life calculation of flexural steel concrete elements with corrosion damage]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 6. Pp. 88–100.
DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-88-100

Железобетонные конструкции для строительства зданий и сооружений стали широко применяться в начале XX в. Тогда считалось, что они имеют неограниченную долговечность, более того, прочность бетона конструкции, следовательно, долговечность со временем нарастает. Однако опыт дальнейшей длительной эксплуатации железобетонных конструкций показал, что они имеют конечный срок службы. Это в том числе обусловлено постепенным накоплением дефектов и повреждений в конструкционных материалах в результате совместного негативного воздействия силовых и средовых факторов. Уменьшение рабочей площади поперечных сечений, ухудшение деформативно-прочностных характеристик и нарушение сцепления бетона и арматуры приводят к снижению несущей способности железобетонных конструкций вплоть до их разрушения.

Показателями долговечности железобетонных конструкций, как свойства сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, являются ресурс и срок службы, имеющие размерность времени [1, 2, 16, 19]. В отличие от срока службы, ресурс оперирует не календарной продолжительностью, а наработкой конструкции от начала эксплуатации или ее возобновления до перехода в предельное состояние. Для эксплуатируемых железобетонных конструкций суммарная наработка от момента обследования текущего технического состояния t_i до момента перехода в предельное состояние t_u выступает остаточным ресурсом, а при эксплуатации без перерывов – остаточным сроком службы T_i этих конструкций (рис. 1).

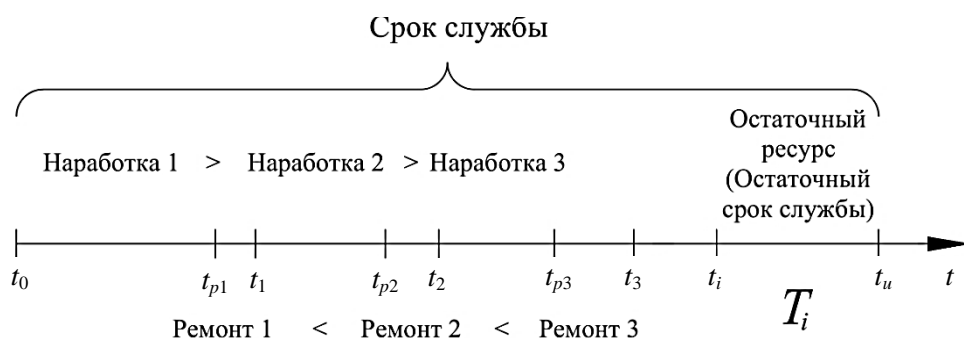


Рис. 1. Продолжительность работоспособного состояния железобетонной конструкции

Нормирование показателей долговечности железобетонных конструкций (главным образом, срока службы) на стадии проектирования на сегодняшний день осуществлено обобщенно, недостаточно обоснованно и имеет лишь рекомендательный характер. Работа конструкций под нагрузкой в течение заданного периода времени обеспечивается выполнением расчетов по двум группам предельных состояний и выбором специальных мер защиты для эксплуатации в определенных условиях при спланированной системе ремонтов. Предполагается, что эксплуатация здания и сооружения прекратится ранее исчерпания ресурса силового сопротивления основных несущих конструкций, но установить, каким срокам эксплуатации и каким вероятностям отвечает предельное состояние, не представляется возможным. Расчетные методики оценки долговечности в строительных нормативных документах пока отсутствуют.

Опережающими темпами растет число зданий и сооружений, выполненных из железобетона, срок службы которых либо приближается к нормативному значению, либо превышает его. При этом насчитывается много случаев преждевременного прекращения эксплуатации строительных объектов, главным образом по причине их аварийного состояния. Несоответствие нормативных (проектных) и фактических сроков службы свидетельствует, с одной стороны, о нерациональном использовании ресурсных возможностей железобетонных конструкций, что экономически не оправданно из-за чрезмерности затрат по их обслуживанию в сверхнормативный период, с другой стороны, о неуправляемых рисках, что чревато гуманитарным и экологическим ущербом.

Определение действительных сроков службы и остаточного ресурса железобетонных конструкций зданий и сооружений является актуальной и информативной задачей. Это особенно важно в современных экономических условиях, когда стоимость объектов недвижимости достаточно велика, а средства для инвестиций ограничены.

Стоит отметить, что на стадии эксплуатации остаточный ресурс конструкции является индивидуальным показателем долговечности, который характеризует интенсивность истощения запасов (прочности, деформативности, трещиностойкости и др.) во времени. Прогнозирование остаточного ресурса позволяет предупреждать возможные отказы и непредвиденные достижения предельных состояний, а также более обоснованно планировать режимы эксплуатации и ремонтные мероприятия обслуживающими организациями [3].

Часто причиной снижения несущей способности железобетонных конструкций, а соответственно, остаточного ресурса являются повреждения бетона и арматуры из-за процессов коррозии, вызванных агрессивной эксплуатационной средой [4, 20]. В связи с этим в настоящей работе ставится цель: проанализировать имеющиеся методы и основанные на них методики по расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов, имеющих коррозионные повреждения; определить их преимущества и недостатки при практическом использовании специалистами в области обследования строительных конструкций.

При выполнении работы применялись общенаучные методы исследования, главными из которых являются анализ и обобщение основных положений существующих методик расчета остаточного ресурса изгибаемых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов.

Конструктивные системы зданий и сооружений являются сложными системами ввиду того, что они представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов конструкций. Отсюда, согласно [5], все методы оценки и прогнозирования остаточного ресурса строительных конструкций, в том числе эксплуатируемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями, можно разделить на следующие основные группы: статистические, детерминированные, физико-статистические и экспертные (рис. 2).

Статистические методы требуют полной информации по текущим работам и отказам строительных конструкций за прошедший период времени от начала эксплуатации [17]. Но в действительности такая информация отличается фрагментарностью и неопределенностью, что сдерживает применение статистических методов при оценке и прогнозировании остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов.

Детерминированные методы используют аналитические зависимости, связывающие время до наступления предельного состояния с внутренними усилиями от внешних нагрузок и показателями коррозионных повреждений конструкционных материалов. Здесь не учитываются факторы случайности, что ограничивает применение детерминированных методов в задачах, где есть вероятность внезапных отказов.

Физико-статистические методы учитывают влияние силовых и агрессивных средовых воздействий на строительные конструкции с позиций теории ве-

роятностей. Данные методы позволяют определять остаточный ресурс коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов наиболее близко к его фактической величине и являются наиболее перспективными для углубленной разработки с последующим включением в нормы проектирования.

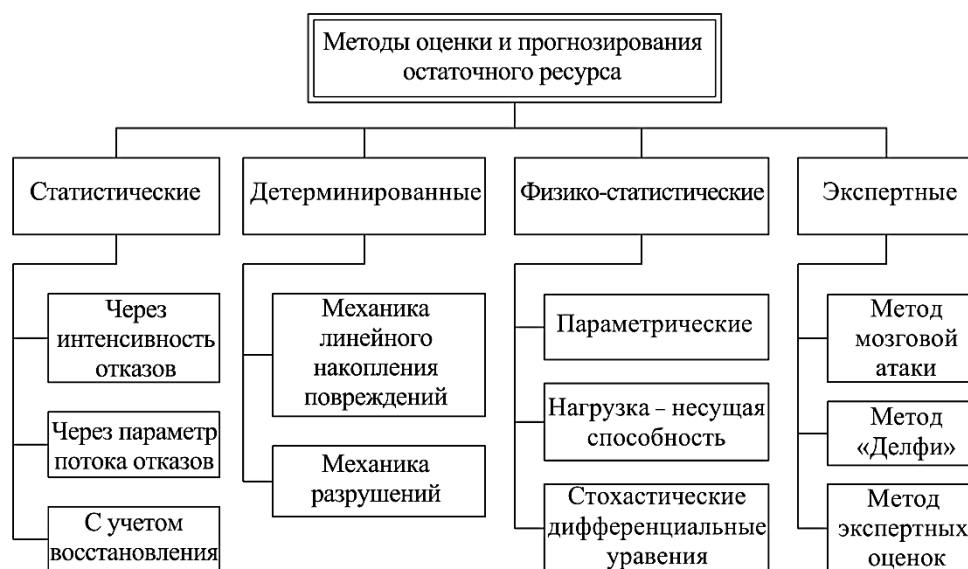


Рис. 2. Классификация методов оценки и прогнозирования остаточного ресурса [5]

Экспертные методы основываются на заключениях специалистов в области обследования строительных конструкций, поэтому имеют субъективный характер. Такие методы позволяют при минимальных затратах наиболее быстро провести оценку и прогнозирование остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов, но при этом не отличаются высокой точностью конечных результатов.

Таким образом, каждая группа методов имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому выбор того или иного метода для определения остаточного ресурса конструкций зависит от степени ответственности решаемой задачи, уровня квалификации экспертов, технико-диагностического оснащения и др.

На сегодняшний день, исходя из рассмотренных выше методов, разработано многообразие методик расчета остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов, приведенных в работах [6–11]. Разберем те, которые реально применяются на практике.

Наиболее просто и доступно остаточный ресурс изгибаемого железобетонного элемента может быть определен по нормативам срока службы согласно выражению

$$T_i = t_i - [t_u], \quad (1)$$

где t_i – период времени от момента ввода объекта в эксплуатацию или его обновления после капитального ремонта до момента обследования технического состояния конструкций; $[t_u]$ – нормативный срок службы или установ-

ленный срок службы конструкций между капитальными ремонтами. Но ввиду того, что на сегодня нормирование сроков службы осуществлено приближенно, этот подход имеет большую погрешность результата в обе стороны.

Определение остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов возможно по фактическим срокам службы объектов-аналогов по формуле

$$T_i = t_i - \bar{t}_{u,j}, \quad (2)$$

где $\bar{t}_{u,j}$ – средний фактический срок службы объектов-аналогов. Такой подход требует информации по опыту эксплуатации идентичных конструкций зданий и сооружений аналогичного назначения, которая часто бывает недоступна. Кроме того, он также имеет большую погрешность результатов.

При расчетах остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов по нормативам срока службы и по фактическим срокам службы объектов-аналогов коррозионные повреждения материалов учитываются косвенно, поэтому данные методики, относящиеся к группе экспертных методов, неприменимы в задачах, связанных с конструктивной безопасностью, и могут быть использованы в дополнение к другим методикам расчета.

Определение остаточного ресурса целесообразно производить на основе результатов натурных обследований изгибаемых железобетонных элементов, когда в различных характерных расчетных сечениях установлены максимальные значения коррозионных повреждений бетона и арматуры.

В источниках [6–8] представлена довольно распространенная методика расчета остаточного ресурса по физическому износу (поврежденности) железобетонных конструкций, в которой изменение несущей способности описывается экспоненциальным законом. Для изгибаемых железобетонных элементов вначале на основании назначенной экспертом текущей величины поврежденности из-за процессов коррозии $\delta(t_i)$ устанавливается коэффициент относительной надежности $y(t_i) = 1 - \delta(t_i)$, а затем постоянная коррозионного износа λ согласно выражению

$$\lambda = -\frac{\ln y(t_i)}{t_i}. \quad (3)$$

Остаточный ресурс согласно данной методике будет равен

$$T_i = -\frac{\ln y}{\lambda}, \quad (4)$$

где усредненно $y = 0,65$ – при наступлении аварийного состояния; $y = 0,75$ – неработоспособного состояния и т. д. по [6]. Методика в некоторых случаях позволяет относительно точно прогнозировать сроки допустимой эксплуатации, но при этом имеет субъективный характер [7]. Кроме того, как отмечено в работе [8], недостаток еще кроется в «осреднении» коэффициентов надежности при назначении коэффициента относительной надежности. Последний в развитие этой расчетной методики предлагается заменить на коэффициент относительного запаса несущей способности w .

Имеют применение методики расчета остаточного ресурса, основанные на физическом износе конструкций, выраженном в процентах. Здесь можно выделить два подхода [12].

В первом остаточный ресурс находится через среднее время безотказной работы железобетонных конструкций:

$$T_i = \bar{t} - t_i, \quad (5)$$

где \bar{t} – среднее время безотказной работы, определяемое по формуле

$$\bar{t} = \frac{t_i}{-\ln\left(1 - \frac{\Phi_i}{100}\right)}, \quad (6)$$

где Φ_i – текущая величина физического износа железобетонных конструкций, %.

Во втором остаточный ресурс находится по формуле (5), но только через время эксплуатации до предельного износа:

$$t_u = \frac{t_i (\exp(m\Phi_i) + \Phi_u)}{\exp(m\Phi_i) - 1}, \quad (7)$$

где Φ_u – предельно устанавливаемая величина физического износа железобетонных конструкций, %; m – коэффициент, принимаемый в пределах от 0,10 до 0,15.

В зависимости от способа определения величины физического износа железобетонных конструкций, данные методики могут быть отнесены к разным группам методов оценки и прогнозирования остаточного ресурса и иметь свойственные им преимущества и недостатки. Коррозионные повреждения учитываются напрямую, т. к. характеризуют степень физического износа.

Часто применяется методика расчета остаточного ресурса на основе экстраполяции текущих значений коррозионных повреждений железобетонных конструкций до критических значений, при которых в определенный момент времени по расчету наступит какое-либо предельное состояние. В данной методике используются различные идеализированные функциональные зависимости изменения конкретных геометрических и механических характеристик конструкционных материалов за время эксплуатации [2, 11, 13, 18, 21, 22]. При выборе зависимостей учитываются конструктивные особенности, вид и агрессивность эксплуатационной среды, действующие усилия от внешних нагрузок и др. За остаточный ресурс принимается временной интервал T_i согласно рис. 1. В случаях, когда обследования конструкций проводились периодически и в разное время, остаточный ресурс можно прогнозировать с достоверной вероятностью.

Похожей на вышеописанную методику является методика расчета остаточного ресурса на основе изменения во времени коэффициентов запаса по двум группам предельных состояний и конструктивным требованиям [10]. Коэффициенты запаса представляют собой отношение правых и левых частей известных проверочных расчетов изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями [14]. Безопасная эксплуатация конструкций невозможна при значении минимального коэффициента запаса по первой группе предельных состояний меньше единицы. Обозначим, что в момент ввода объекта в эксплуатацию или ее возобновления после ремонта начальное состояние конструкций (с учетом дефектов и отклонений) характеризуется проектным

коэффициентом запаса $k(t_0)$, а в рассматриваемый момент эксплуатации текущим коэффициентом запаса $k(t_i)$. Тогда, при отсутствии других данных, изменение коэффициента запаса во времени может быть описано квадратичной функцией вида

$$t_u = t_i \sqrt{(k(t_0) - 1) / (k(t_0) - k(t_i))}. \quad (8)$$

При наличии трех и более параметрических точек возможно применение более сложных аппроксимирующих зависимостей. Остаточный ресурс изгибаемых железобетонных элементов находится согласно рис. 1.

Заслуживает внимания методика расчета остаточного ресурса на основе показателей механики разрушения, где одним из основных является коэффициент интенсивности напряжений (КИН), определяемый экспериментальным путем. Установлено, что с уменьшением величины КИН остаточный ресурс уменьшается, что в результате позволяет прогнозировать остаточный ресурс эксплуатируемых железобетонных конструкций [15]. На наш взгляд, некоторые положения этой методики требуют корректировок и дополнительных исследований, что на сегодня сдерживает ее практическое применение.

При обследовании технического состояния несущих конструкций производственного здания с периодом эксплуатации 54 года в г. Белгороде на основе рассмотренных выше методик была выполнена расчетная оценка остаточного ресурса сборных железобетонных плит перекрытия, имеющих коррозионные повреждения бетона и арматуры (рис. 3).



Рис. 3. Характерный вид обследуемых железобетонных плит перекрытия с коррозионными повреждениями бетона и арматуры

Расчеты выполнялись в соответствии с требованиями действующих норм и правил, а также фактическими нагрузками, размерами, деформативно-прочностными характеристиками материалов конструкций, расчетными схемами и другими сведениями, установленными при натурных обследованиях и на основании проектной документации и типовых серий.

Среда в производственной части здания среднеагрессивная, температурно-влажностный режим нормальный.

Плиты перекрытия – железобетонные ребристые плиты размером в плане 1,0×6,0 м, марки П2 согласно серии 1-82-Р5.

Бетон конструкций соответствует классу по прочности на сжатие В15 (марка М200). Армирование продольных ребер выполнено арматурными стержнями Ø22 25ГС. Текущая глубина коррозионных повреждений стальной арматуры равна 2,0 мм. Величина защитного слоя составляет 10 мм.

Установлено, что возникающий в сечении плиты изгибающий момент от внешней нагрузки равен $M_{\text{внеш}} = 29,34$ кНм. Прочность нормального сечения плиты перекрытия на момент обследования равна $M_{\text{факт}} = 30,45$ кНм.

Ширина продолжительного раскрытия трещин составляет $a_{\text{crc}}^{\text{факт}} = 0,20$ мм, что не превышает предельно допустимого значения $[a_{\text{crc}}] = 0,3$ мм. Ширина непродолжительного раскрытия трещин составляет $a_{\text{crc}}^{\text{факт}} = 0,28$ мм, что не превышает предельно допустимого значения $[a_{\text{crc}}] = 0,4$ мм.

Прогиб конструкций составляет $f_{\text{факт}} = 1,48$ мм, что не превышает предельно допустимого значения $[f] = 2,93$ мм.

Результаты расчета остаточного ресурса представлены в таблице.

**Определение остаточного ресурса железобетонных плит перекрытия
производственного здания с коррозионными повреждениями**

Методика расчета остаточного ресурса конструкций	Формула расчета	Обоснование расчета	Остаточный ресурс, лет
1. По нормативам срока службы конструкций	(1)	Методика определения нормативных сроков эксплуатации строительных конструкций. Проект приказа Минстроя РФ	26
2. По фактическим срокам службы конструкций объектов-аналогов	(2)	Экспертные отчеты по техническому состоянию идентичных конструкций ООО «Строительная экспертиза», г. Белгород	28
3. По физическому износу конструкций, изменение несущей способности которых описывается экспоненциальным законом	(4)	Экспертный отчет по текущему техническому состоянию рассчитываемых конструкций ООО «Строительная экспертиза», г. Белгород	14
4. По физическому износу конструкций, выраженному в процентах, через среднее время безотказной работы	(5)		15
5. По физическому износу, выраженному в процентах, через время эксплуатации до предельного износа	(5) с учетом (7)		16

Окончание таблицы

Методика расчета остаточного ресурса конструкций	Формула расчета	Обоснование расчета	Остаточный ресурс, лет
6. На основе изменения во времени коэффициентов запаса по двум группам предельных состояний и конструктивным требованиям	по рис 1.	Экспертный отчет по текущему техническому состоянию рассчитываемых конструкций ООО «Строительная экспертиза», г. Белгород, СП 63	12
7. На основе экстраполяции текущих значений повреждений конструкций до предельных значений	по рис. 1		11

Анализ результатов расчета показывает, что наименьшие значения остаточного ресурса получены с применением методик, основанных на изменении коэффициентов запаса по предельным состояниям и экстраполяции повреждений до предельных значений, которые наиболее полно учитывают влияние накопленных коррозионных повреждений на прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов.

Стоит отметить, что в любом случае окончательно остаточный ресурс изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями следует устанавливать согласно выражению

$$T_n = \frac{T_i}{\gamma_i}, \quad (9)$$

где γ_i – коэффициент надежности по ресурсу, назначаемый в зависимости от уровня ответственности рассматриваемого объекта, вида эксплуатационной среды, величины коррозионных повреждений и др. Кроме того, остаточный ресурс не должен превышать интервала времени, на котором велось наблюдение за несущими железобетонными конструкциями здания или сооружения.

Анализ всех рассмотренных выше методов и основанных на них методик расчета остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями позволяет заключить следующее:

- имеется многообразие расчетных методик по определению остаточного ресурса, при этом считать какую-либо методику универсальной нельзя из-за большого числа факторов, влияющих на прогноз срока службы железобетонных конструкций;

- определение остаточного ресурса целесообразно выполнять на основе результатов натурных обследований железобетонных конструкций, когда в различных расчетных сечениях выявлены максимальные значения коррозионных повреждений бетона и арматуры;

- наиболее перспективным и приемлемым для оценки и прогнозирования остаточного ресурса является физико-статистический подход, который применительно к изгибаемым железобетонным элементам, находящимся в условиях силового и средового воздействия, в настоящее время разработан недостаточно углубленно;

– с учетом все возрастающих случаев преждевременной потери несущей способности железобетонных конструкций из-за развития коррозионных повреждений во времени назрела необходимость внесения в строительные нормы проектирования обязательных требований расчета по новому (третьему) предельному состоянию – по долговечности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28–31.
2. Селяев В.П., Бондаренко В.М., Селяев П.В. Прогнозирование ресурса железобетонных изгибаемых элементов, работающих в агрессивной среде, по первой стадии предельных состояний // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 2 (31). С. 14–24.
3. Пишеничкина В.А., Сухина К.Н., Бабалич В.С., Сухин К.А. Оценка остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций эксплуатируемых промышленных зданий. Москва : Изд-во АСВ, 2017. 176 с.
4. Васкевич В.М., Андреев Н.В., Старчуков Д.С. Прогнозирование долговечности изгибаемых железобетонных элементов с трещинами и коррозионными повреждениями // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2010. № 629. С. 29–35.
5. Острейковский В.А. Теория надежности. Москва : Высш. шк., 2003. С. 225–236.
6. Добрымыслов А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. Москва : Изд-во АСВ, 2008. 72 с.
7. Дегтярь А.Н., Серых И.Р., Панченко Л.А., Чернышева Е.В. Остаточный ресурс конструкций зданий и сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 94–97.
8. Беляев С.М. Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. № 3 (11). С. 22–25.
9. Байбурун А.Х., Байбурун Д.А. Некоторые аспекты оценки остаточного ресурса строительных конструкций // Наука и безопасность. 2011. № 1 (9). С. 16–22.
10. 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.
11. Селяев В.П., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Кечуткина Е.Л. Прогнозирование долговечности железобетонных изгибаемых элементов методом деградационных функций // Жилищное строительство. 2014. № 12. С. 8–18.
12. Шмелев Г.Д. Систематизация определяющих параметров для прогноза остаточного срока службы строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2013. № 8. С. 89–96.
13. Шмелев Г.Д., Николайчев И.В. Параметрические методы прогнозирования остаточных сроков службы железобетонных строительных конструкций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 7. С. 167–175.
14. Белов В.В., Никитин С.Е. Диахронная модель деформирования коррозионно-поврежденных железобетонных элементов с трещинами // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 4 (29). С. 18–25.
15. Скоробогатов С.М., Курипель А.В. К расчету остаточного ресурса железобетонных конструкций существующих зданий и сооружений // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 3 (31). С. 148–155.
16. 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.
17. Моисеенко Р.П. Новый вариант расчета долговечности конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 3 (260). С. 12–17.

18. *Fatima T., Arab N., Zemskov E.P., Muntean A.* Homogenization of a reaction – diffusion system modeling sulfate corrosion of concrete in locally periodic perforated domains // *Journal of Engineering Mathematics*, 2011. V. 69. I. 2–3. P. 261–276.
19. *Казачек В.Г.* Проблемы нормирования сроков службы зданий и сооружений // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки*. 2010. № 6. С. 56–71.
20. *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. V. 420. Pp. 1059–1076.
21. *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. V. 37. P. 623–643.
22. *Stewart M.G.* Reliability Safety Assessment of Corroding Reinforced Concrete Structures Based on Visual Inspection Information // *ACI Structural Journal*. 2010. V. 107. P. 671–679.

REFERENCES

1. *Bondarenko V.M., Kolchunov V.I.* Kontseptsiya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoi bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii pri silovykh i sredovykh vozdustviyakh [The concept and direction of theory development of building safety and environmental impacts]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. V. 2. Pp. 28–31. (rus)
2. *Selyaev V.P., Bondarenko V.M., Selyaev P.V.* Prognozirovanie resursa zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov, rabotayushchikh v agressivnoi srede, po pervoi stadii predel'nykh sostoyanii [Resource life prediction of steel concrete flexural elements in aggressive environment according to the ultimate limit state]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2017. V. 2 (31). Pp. 14–24. (rus)
3. *Pshenichkina V.A., Sukhina K.N., Babalich V.S., Sukhin K.A.* Otsenka ostatocnogo resursa nesushchikh zhelezobetonnykh konstruktssii ekspluatiruemykh promyshlennykh zdaniy: Monografiya [Estimation of residual life of bearing reinforced concrete structures of industrial buildings]. Moscow: ASV, 2017. 176 p. (rus)
4. *Vaskevich V.M., Andreev N.V., Starchukov D.S.* Prognozirovanie dolgovechnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s treshchinami i korroziionnymi povrezhdeniyami [Prediction of durability of flexural reinforced concrete elements with cracks and corrosion damage]. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*. 2010. V. 629. Pp. 29–35. (rus)
5. *Ostreikovskii V.A.* Teoriya nadezhnost [Reliability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003. Pp. 225–236. (rus)
6. *Dobromyslov A.N.* Otsenka nadezhnosti zdaniy i sooruzhenii po vneshnim priznakam [Assessment of building reliability]. Moscow: ASV, 2008. 72 p. (rus)
7. *Degtyar' A.N., Serykh I.R., Panchenko L.A., Chernysheva E.V.* Ostatocnyi resurs konstruktssii zdaniy i sooruzhenii [Residual life of building structures]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2017. V. 10. Pp. 94–97. (rus)
8. *Belyaev S.M.* Raschet ostatocnogo resursa zdaniy s uchedom zapasa nesushchei sposobnosti konstruktssii [Calculation of residual life of buildings taking into account reserve bearing capacity of structures]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2013. V. 3 (11). Pp. 22–25. (rus)
9. *Baiburin A.Kh., Baiburin D.A.* Nekotorye aspekty otsenki ostatocnogo resursa stroitel'nykh konstruktssii [Assessment of residual life of buildings]. *Nauka i bezopasnost'*. 2011. No. 1 (9). Pp. 16–22. (rus)
10. *Shmatkov S.B.* Raschet ostatocnogo resursa stroitel'nykh konstruktssii zdaniy i sooruzhenii [Calculation of residual life of buildings]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2007. V. 22 (94). Pp. 56–57. (rus)
11. *Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L.* Prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov metodom degradatsionnykh funktsii [Prediction of durability of reinforced concrete bent elements by degradation functions]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2014. V. 12. Pp. 8–18. (rus)

12. Shmelev G.D. Sistematizatsiya opredelyayushchikh parametrov dlya prognoza ostatocnogo sroka sluzhby stroitel'nykh konstruksii [Systematization of parameters for prediction of building residual life]. *Vestnik MGSU*. 2013. V. 8. Pp. 89–96. (rus)
13. Shmelev G.D., Nikolaichev I.V. Parametricheskie metody prognozirovaniya ostatocnykh srokov sluzhby zhelezobetonnykh stroitel'nykh konstruksii [Parametric methods for predicting residual life of reinforced concrete structures]. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser. Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya*. 2013. V. 7. Pp. 167–175. (rus)
14. Belov V.V., Nikitin S.E. Diakhronnaya model' deformirovaniya korrozionno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh elementov s treshchinami [Diachronic deformation model of corrosion-damaged reinforced concrete elements with cracks]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. V. 4 (29). Pp. 18–25. (rus)
15. Skorobogatov S.M., Kurshpel' A.V. K raschetu ostatocnogo resursa zhelezobetonnykh konstruksii sushchestvuyushchikh zdaniy i sooruzhenii [Calculation of residual life of reinforced concrete of buildings]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2016. V. 3 (31). Pp. 148–155. (rus)
16. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskii V.N., Erofeev V.T. O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksii [Modern methods of ensuring durability of reinforced concrete structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. V. 1. Pp. 93–102. (rus)
17. Moiseenko R.P. Novyj variant rascheta dolgovechnosti konstrukcij [A new way for calculating structural durability]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2015. V. 3 (260). Pp. 12–17. (rus)
18. Fatima T., Arab N., Zemskov E.P., Muntean A. Homogenization of a reaction – diffusion system modeling sulfate corrosion of concrete in locally periodic perforated domains. *Journal of Engineering Mathematics*. 2011. V. 69. No. 2–3. Pp. 261–276.
19. Kazachek V.G. Problemy normirovaniya srokov sluzhby zdaniy i sooruzhenii [Normalizing building durability]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2010. V. 6. Pp. 56–71. (rus)
20. 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. V. 420. Pp. 1059–1076.
21. 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. V. 37. Pp. 623–643.
22. Stewart M.G. Reliability Safety Assessment of Corroding Reinforced Concrete Structures Based on visual inspection information. *ACI Structural Journal*. 2010. V. 107. Pp. 671–679.

Сведения об авторах

Смоляго Геннадий Алексеевич, докт. техн. наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, tpk-psv@yandex.ru

Фролов Николай Викторович, аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, frolov_pgs@mail.ru

Authors Details

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

Nikolay V. Frolov, Research Assistant, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46, Kostyukova, 308012, Belgorod, Russia, frolov_pgs@mail.ru