

ПРЕДСКАЗАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

В данной статье описывается процесс регулирования и проведения сравнительного анализа жизненных циклов инженерных сооружений в плане их экономической эффективности. Ожидаемый срок службы инженерного сооружения является параметром, который существенным образом определяет экономическую эффективность всего объекта. Поэтому, при регулировании экономической эффективности расчет долговечности имеет особое значение. С помощью представленной методики, в основу которой положена концепция вероятностной надежности, можно не только наглядно показать экономическую эффективность объекта, но и создать важную базу данных, которая ляжет в основу последующего анализа, например экологического качества сооружения.

Кристоф Гелен

*доктор наук, профессор,
Мюнхенский технический университет
Центр строительных материалов
Кафедра неразрушающих испытаний
81245 Мюнхен, Германия
gehlen@tum.de*

Общие сведения

Сбалансированность имеет огромное значение для будущего развития во всем мире. При этом строительная отрасль занимает особое положение, поскольку призвана удовлетворять такие человеческие потребности, как потребность в жилье и инфраструктуре, в то время как со строительством также связано потребление больших экономических и экологических ресурсов.

В связи с используемыми объемами материала, широким спектром применения и большим потенциалом развития бетонное строительство занимает особое техническое и экономическое положение в строительной отрасли. Только в 2008 году, например, в Германии было изготовлено около 41 млн кубических метров товарного бетона. Это соответствует обороту около 2,6 млрд евро. Оборот в цементной промышленности в том же году составил около 2,3 млрд евро при объеме сбыта цемента на национальном рынке около 35 млн тонн. Данные приведенные в качестве примера цифры наглядно демонстрируют, что сбалансированное развитие особенно важно для бетонного строительства, если мы хотим, чтобы оно затронуло глубокие пласты строительной отрасли. Вместе с тем требование сба-

лансированного строительства предоставляет строительной отрасли шанс перейти от недальновидной конкуренции в области цен к конкуренции в области качества, что в конечном итоге соответствует упомянутым долгосрочным целям. Подобная трансформация пошла бы на пользу также мелким и средним предприятиям (МСП), которые типичны для строительной отрасли.

Принимая во внимание принятую ООН «Повестку дня на XXI век» (Agenda 21), можно утверждать, что приоритетом для предприятий, каким-либо образом имеющих отношение к бетонному строительству, является улучшенное согласование экологических, экономических и социальных потребностей людей, начиная с добычи сырьевых материалов, производства цемента и бетона до сноса объекта и вторичной переработки материалов.

Приоритетной целью систем для анализа сбалансированности является комплексный анализ и оценка качества зданий и строительных сооружений. Системы оценки должны учитывать значимость общепризнанных целей и положений и позволять проводить гармоничную оценку экологического, экономического, социального, функционального и технического аспектов при одно-

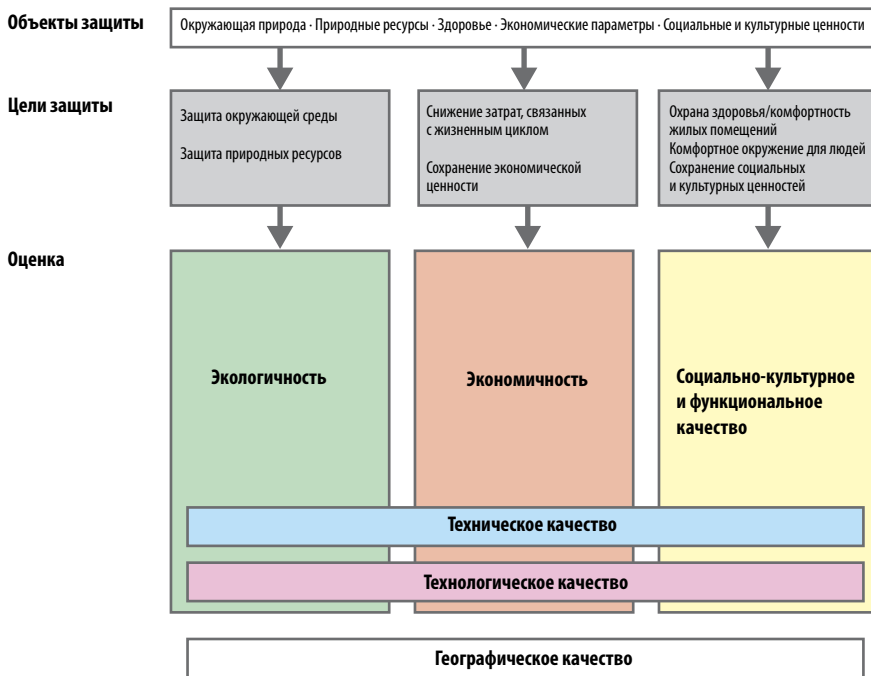


Рис. 1. Схема оценки сбалансированности зданий, BMVBS

временном изучении качества процессов проектирования, пропорциональной реализации и эксплуатации (см. рис. 1). Помимо этого могут быть документально зафиксированы характеристики и условия на месте размещения.

Данные процессы, часть которых необходимо еще расположить в правильной последовательности, начиная с проектирования, затем строительство, эксплуатация, обслуживание, ремонт и т.д. до сноса строительного сооружения, должны привести к более высокому качеству сооружения.

В данной статье на примере инфраструктурных сооружений рассматриваются аспекты экологического и экономического качества. В последнем случае центральное место занимает программа для управления долговечностью, с помощью которой можно анализировать экономические решения по возведению и сохранению строений.

Экономическое качество

Железобетонные сооружения возводятся с использованием бетона и стали различного качества. Среди прочего выбор строительного материала определяет, с одной стороны, объем строительных затрат, а с другой стороны, степень сопротивляемости изготовленного из этих материалов сооружения по отношению к ожидаемым нагрузкам и внешним воздействиям. Т.е., чем выше качество используемого материала, тем выше затраты на возведение, но в то же время ниже затраты на сохранение сооружения (высокая долговечность) [1, 2, 3].

Железобетонные и бетонные сооружения подвергаются разнообразным нагрузкам и внешним воздействиям, которые огра-

ничивают срок их службы. Коррозия арматуры, усталость из-за повторяющейся динамической нагрузки или бетонные повреждения из-за воздействия мороза и антиобледенительной соли — это всего лишь некоторые из многих факторов, снижающих долговечность, причем воздействие некоторых из них со временем возрастает [4, 5].

На рис. 2 этот процесс изображен в виде схемы. После проектирования (Design) и строительства (Construction) исходное состояние сооружения постоянно ухудшается до более низких показателей. Чтобы получить представление о степени износа и запасе прочности, строительные сооружения регулярно инспектируются [6, 7, 8, 9, 10]. Подобные инспекции позволяют контролировать и оценивать ухудшающееся состояние сооружения (Assessment). Благодаря ремонтно-восстановительным работам (Intervention), при необходимости состояние объекта можно улучшить или повлиять на скорость дальнейшего негативного развития. Такие мероприятия, как правило, повышают срок службы сооружения [11].

В немецком своде норм воздействующие факторы, оказывающие негативное влияние на долговечность сооружения, в соответствии с окружающими условиями подразделяются на экспозиционные классы.

В зависимости от экспозиционного класса необходимо соблюдать различные требования к материалу, его составу (см. рис. 3) и размерам (бетонный слой). Данные вве-

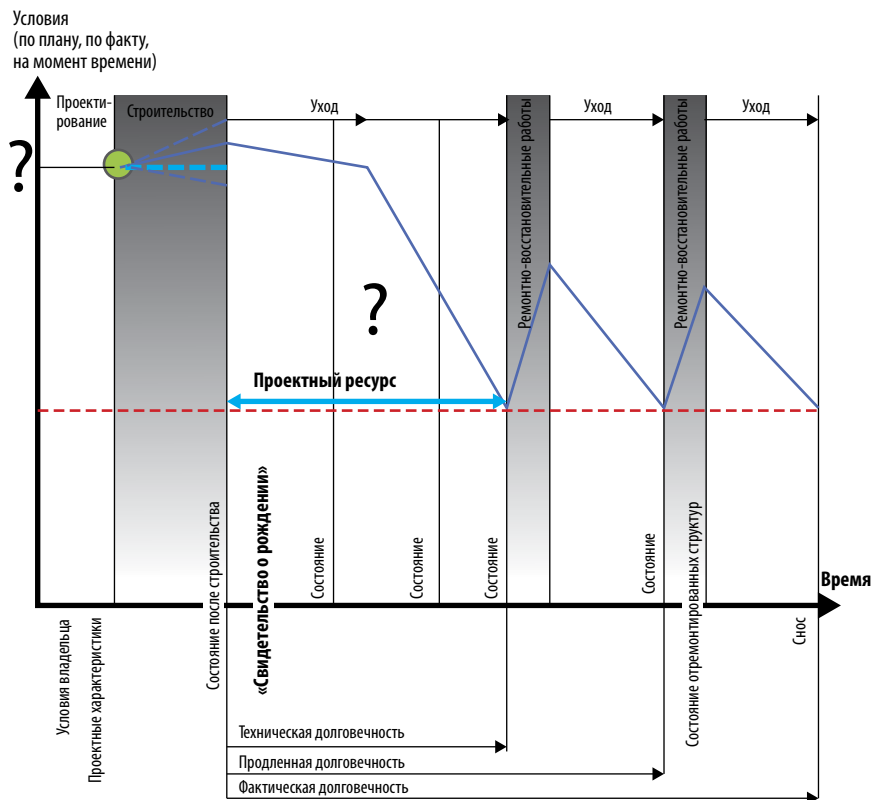


Рис. 2. Изменение состояния строительного сооружения во времени [12].

Экспозиционные классы (воздействие)			Бетонно-технические мероприятия (сопротивление)		
Наименование класса	Воздействия и нагрузки		Макс. в/ц	Мин. ц. на м ³	Мин. класс прочности
XO	Нет воздействия на бетон		Требования отсутствуют	Требования отсутствуют	C8/10
XC	1	сухой	0,75	240	C16/20
	2	стабильно мокрый	0,75	240	C16/20
	3	относительно влажный	0,65	260	C20/25
	4	мокрый / сухой	0,60	280	C25/30
XD/ XS	1	относительно влажный	0,55	300	C30/37
	2	стабильно мокрый	0,50	320	C35/45
	3	мокрый / сухой	0,45	320	C35/45

Рис. 3. Экспозиционные классы, дискриптивные нормы

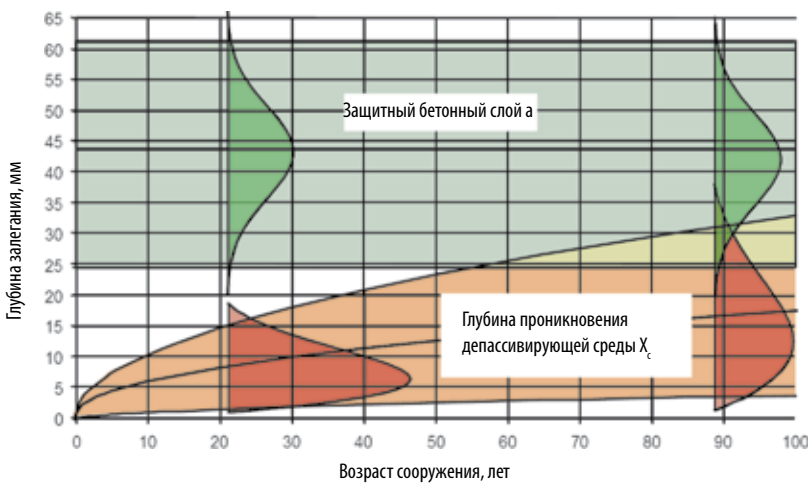


Рис. 4. Бетонный слой и глубина проникновения депассивирующей среды [4].

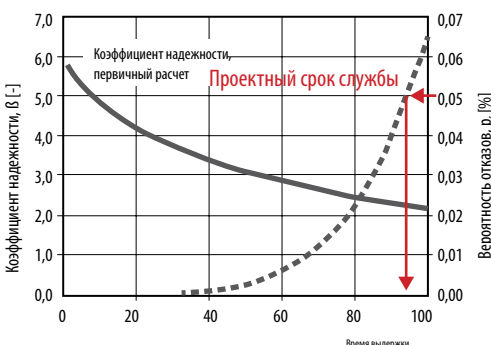


Рис. 5. Вероятность депассивации или степень надежности сооружения по сравнению с карбонизацией во временной зависимости

денные органами строительного надзора дискриптивные нормы призваны снизить или полностью предотвратить вредные реакции, отрицательно влияющие на долговечность. Базирующиеся на опытных данных регламентации хотя просты в использовании, но с их помощью невозможно целенаправленно оценить объект на предмет его долговечности. Так, остается невыясненным, какова фактическая надежность (Condition) объекта по отношению к специфическим воздействиям при вводе в эксплуатацию и какой срок службы следует ожидать после этого (Design Service Life), см. рис. 2. Информацию об этом могут дать только оценочные расчеты долговечности [11].

Условием для проведения конкретных расчетов долговечности, при которых степень надежности и долговечности рассчитывается индивидуально, являются приближенные к реальности и уже проверенные на деле модели для описания воздействий и сопротивления, а также статистическая квантификация переменных данных модели.

Например, если экспозиционные условия отвечают XC или XD/XS, следует ожидать, что через определенный промежуток времени находящаяся внутри бетона арматура под действием CO₂ или хлоридов подвергнется депассивации, а затем коррозии. Чтобы предотвратить эти явления, необходимо воспрепятствовать проникновению CO₂ или хлоридов и с высокой степенью вероятности избежать депассивации и коррозии арматуры. В случае депассивации арматуры воздействием S можно упрощенно представить в виде глубины проникновения фронта депассивации (X_c), а слой бетона, который в данном случае обозначается геометрической величиной а, понимать как сопротивление R. Если будет достигнуто состояние, когда слой бетона равен глубине проникновения депассивирующей среды X_c, то предельное состояние, когда арматура депассивирована и незащищена от коррозии, считается достигнутым. Данное нежелательное состояние строительной конструкции необходимо ограничить до максимально оправданной степени [4].

Переменные а (сопротивление) и X_c (воздействие) изображены на рис. 4 в виде стохастических величин модели, которые при указании функции распределения, среднего значения и стандартного отклонения в любое время могут получить полное и законченное описание.

Как мы видим на рис. 4, глубина проникновения (X_c) со временем постоянно растет. Т.е. при постоянном на протяжении всего отрезка времени геометрическом сопротивлении фактор воздействия неизменно возрастает. За счет этого по мере продвижения во времени, растет вероятность депассивации («Вероятность отказа»), рис. 4–5.

Если вероятность депассивации ограничить предельным параметром допуска, например, не более 5%, то при помощи кривых можно рассчитать ожидаемый срок

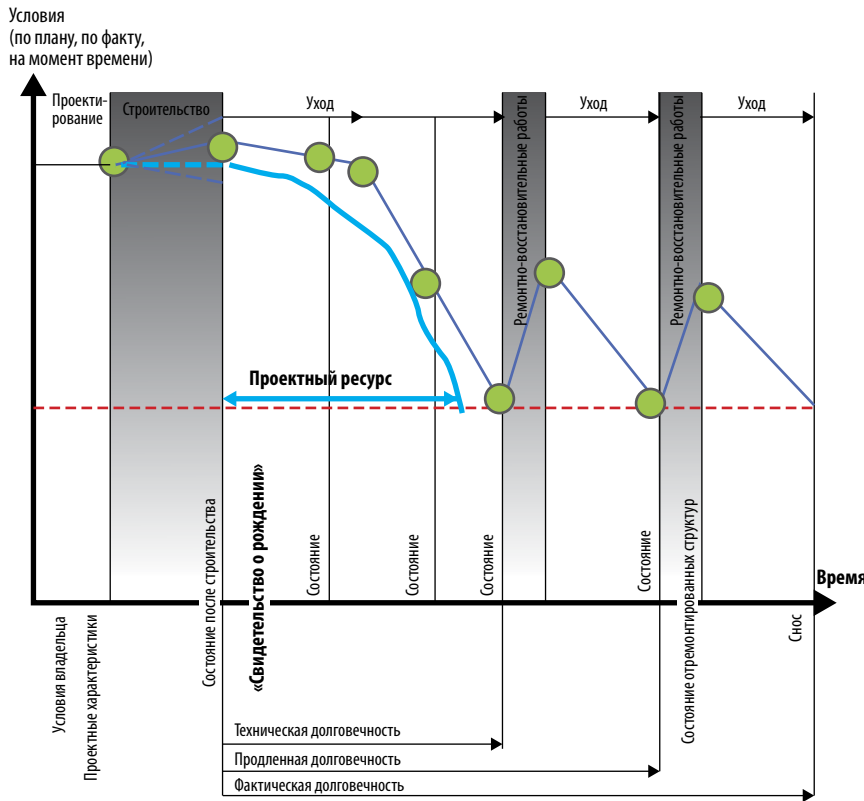


Рис. 6. Прогноз долговечности на этапе проектирования, регистрация фактического состояния на этапе эксплуатации (при помощи инспектирования)

службы, который в данном случае обозначается переменной T , см. рис. 5.

При помощи данных полученных на основе модели расчетов долговечности теперь в зависимости от каждого конкретного случая в рамках этапа проектирования (Design) можно целенаправленно задавать срок службы сооружения, рис. 5–6. Как показано на рис. 5, при максимально допустимом значении $pf = 5\%$ возможен срок службы $T = 95$ лет > 80 лет. Степень надежности на этот момент времени составляла бы примерно $\beta = 2,2$.

После проектирования, изготовления и ввода в эксплуатацию изменение в состоянии сооружения можно отслеживать при помощи специальных методик, чтобы сравнивать заданное на этапе проектирования состояние с фактическим. Только комбинируя данные с этапов планирования, производства и эксплуатации, можно обеспечить жизненный цикл высокого экономического качества [13, 14, 15, 16].

При отслеживании дальнейших изменений в состоянии сооружения очень важно производить оценку наблюдаемых явлений по интегральному принципу, а также оценивать только те наблюдения, которые способны подкрепить процесс контроля (менеджмента) строительного сооружения. Т.е., полученные данные могут быть подвергнуты тщательному качественному или количественному анализу.

Фактическое состояние определяется с использованием предварительной информации с этапов проектирования и производства при помощи структурированных контрольно-измерительных концепций. При создании подобных контрольных концепций необходимо, исходя из ожидаемого состояния, определить, что и где и когда должно быть исследовано при помощи модели, при помощи какого измерительного метода и в каком объеме. На рис. 7 представлены вопросы, на которые необходимо получить ответ при планировании структурированного контроля (инспектирования).

На рис. 6 изображена ось времени, вдоль которой расположены зарегистрированные характеристики состояния, помеченные как «Assessment». В рамках контрольных мероприятий можно постоянно сравнивать прогнозируемое состояние с фактическим.

В рамках комплексного исследовательского проекта «Сбалансированное бетонное строительство», [17], в подпроект D, среди прочего изучался вопрос о том, каким образом данные, получаемые на этапах проектирования, производства и эксплуатации, можно переработать в комплексную структурированную систему, так чтобы они позволяли экономически управлять жизненными циклами объектов и сооружений.

Одной из целей является объединение в сеть собранной информации при помощи специально разработанного программного обеспечения (ПО). Структура ПО имеет модульную концепцию. Модули соответствую-

Что измерять?

Где измерять? С какой периодичностью измерять?

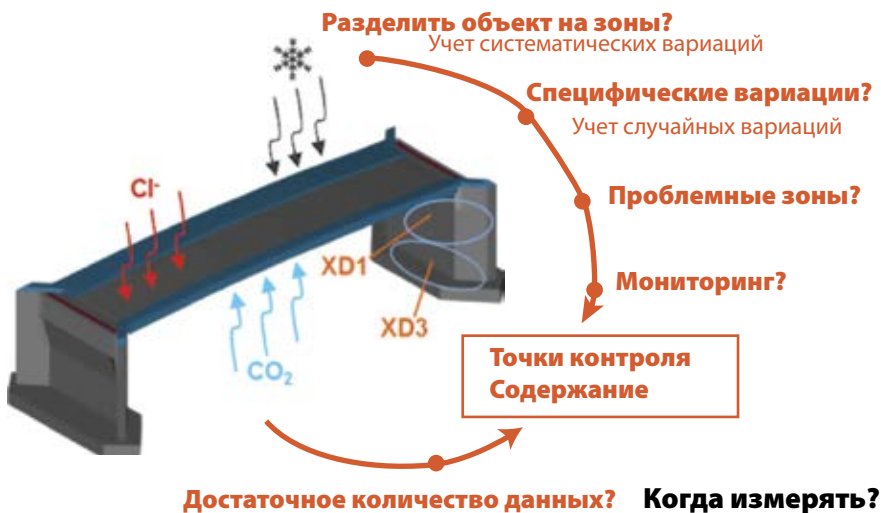


Рис. 7. Вопросы, на которые необходимо получить ответ в ходе планирования инспекционных мероприятий для оценки фактического состояния сооружения

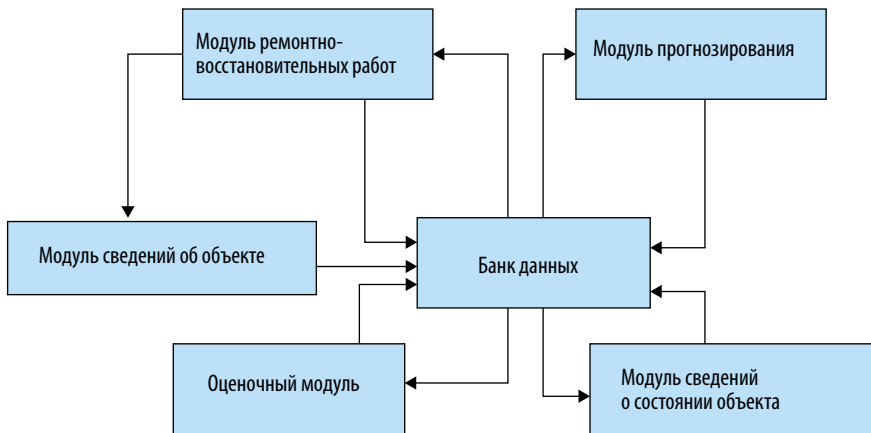
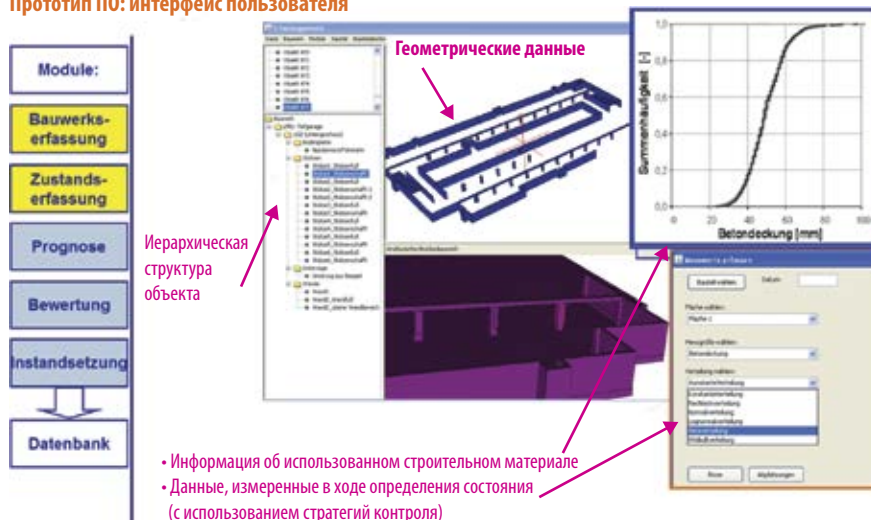


Рис. 8. Прогноз долговечности на этапе проектирования, сбор данных о фактическом состоянии строения на этапе эксплуатации (путем инспектирования), источник: [17]

Прототип ПО: интерфейс пользователя



- Информация об использованном строительном материале
- Данные, измеренные в ходе определения состояния (с использованием стратегий контроля)

Рис. 9. Пользовательский интерфейс модуля «Сведения об объекте» (геометрические данные) и «Сведения о состоянии» (измеренные данные). В данном случае речь идет о статистическом анализе данных по защитному слою арматуры [17]

Порядок действий

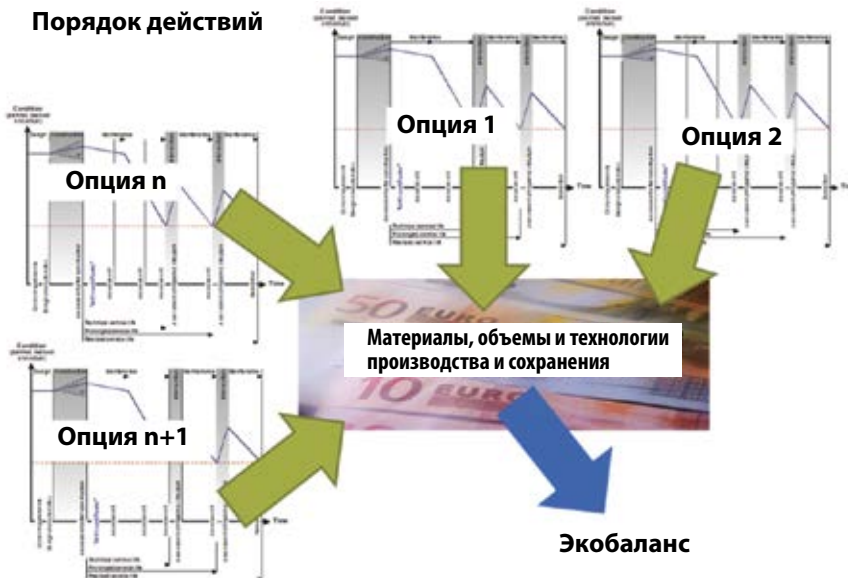


Рис. 10. Многообразие опций, позволяющее производить экономическую и экологическую оценку, если известны использованные материалы, объемы и технологии

ют процессам сбора и переработки данных, необходимых для наблюдения за сроком службы сооружения. Сюда включены оптимизация срока службы, начиная с этапа проектирования вплоть до сдачи объекта, а также экономически оптимизированная эксплуатация сооружения во время последующего этапа эксплуатации (см. рис. 8).

Центральным элементом долгосрочной системы управления долговечностью является банк данных, в котором содержатся все сведения о сооружении, см. рис. 9. Сюда относятся общая информация и геометрические данные о сооружении, а также сведения о характерных свойствах использованного строительного материала, результаты обследования состояния сооружения и результаты ремонтно-восстановительных работ. Все модули представлены в программе-прототипе в их базовой функции, а базовый принцип функционирования системы управления долговечностью может использоваться на протяжении всей технологической цепочки. При реализации данного проекта мы в качестве примера взяли лишь изучение двух механизмов повреждения сооружения (коррозия арматуры в результате проникновения хлоридов и карбонизации). Для расширения функций программы на другие механизмы повреждений (в том числе на другие строительные материалы) и ремонтно-восстановительные мероприятия в будущем потребуются относительно небольшие затраты, благодаря динамической основе вспомогательных программ.

При условии того, что все представленные на рис. 10 примеры опций различными путями приводят к технически сопоставимому качеству (сопоставимая долговечность, сопоставимая эксплуатационная пригодность и надежность несущих конструкций), предлагается вся информация о необходимых материалах, объемах и процессах изготовления и сохранения строительного сооружения. Данная информация теперь может не только анализироваться и сопоставляться с экономической точки зрения (экономическое качество), см. также [18, 19], но и оцениваться с точки зрения экологии (экобаланс).

Экологическое качество

При помощи экобаланса все потенциальные факторы воздействия объекта на окружающую среду на протяжении всего его жизненного цикла могут быть теперь сведены воедино и проанализированы. На рис. 11 представлена стандартная схема экобаланса и те сферы, где экобаланс может служить определенным ориентиром, например, при разработке экологических продуктов или при принятии важных политических решений.

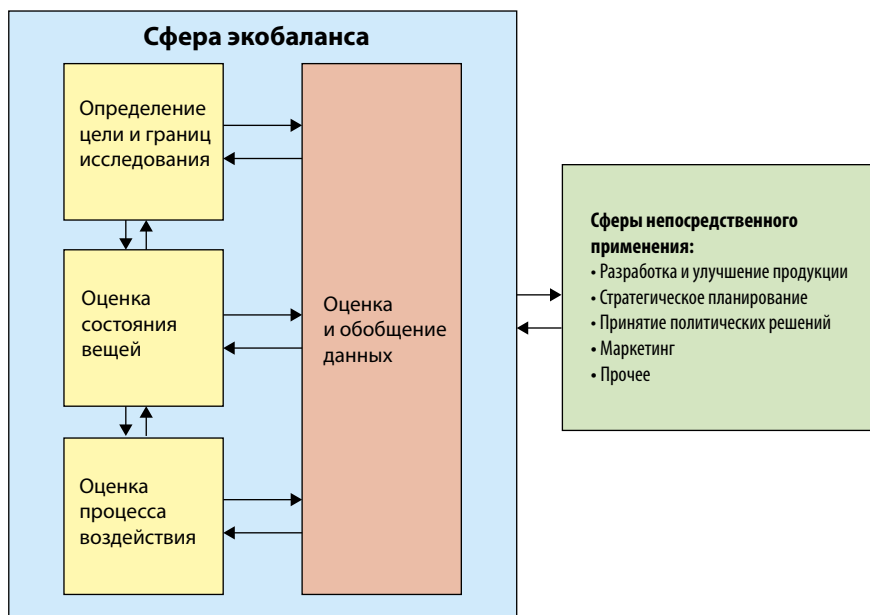


Рис. 11. Сфера экобаланса

Литература

- DARTS (Durable and Reliable Tunnel Structures), 5th Framework Programme Projekt GRD1-25633, C Design Examples, May 2004: «Integrated Design Examples», ISBN 90 37604730.
- DURANET (Network for Supporting the Development and Application of Performance Based Durability Design and Assessment of Concrete Structures) & CEN TC 104, Joint Workshop: Design of Durability of Concrete, 15th-16th June 1999, Berlin.
- CON REP NET (A Thematic Network on Performance Based Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures), 5th Framework Programme, Newsletters 1&2 (Sept. 2003) to 6 (March 2006).
- Schießl, P. (convenor) et al.: fib Model Code for Service Life Design. fib bulletin 34, 2006.
- ISO/CD 16204 (CD: Complete Draft, Version 16/03/2011); Durability -Service Life Design of Concrete Structures.
- Gehlen, C.; Sodeikat, C.: Maintenance Planning of Reinforced Concrete Structures: Redesign in a Probabilistic Environment, Inspection, Update and Derived Decision Making. In: Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the 9th International Conference, Brisbane, Australia, 17-20th March 2002; Brisbane, Australien, 2002.
- Gehlen, C.; von Greve-Dierfeld, S.: Optimierte Zustandsprognose durch kombinierte Verfahren. In: Beton- und Stahlbetonbau 5/10, Nr. 005. (In German)
- Beutel, R., Reinhardt, H.-W., Große, Ch., Glaubitt, A., Krause, M., Maierhofer, Ch., Algernon, D., Wigggenhauser, H. and M. Schickert, Comparative Performance Tests and Validation of NDT Methods for Concrete Testing. In: Journal of Nondestructive Evaluation 1-3 (2008) 27, 59-65, 2007
- Große, C.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen — Möglichkeiten und Grenzen. In: VDI-Bautechnik, Jahressausgabe 2011/2012, Springer VDI-Verlag, S. 122-131. (In German)
- Keßler, S., Gehlen, C., Ebell, G., Burkert, A.: Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung. In: Beton und Stahlbetonbau, 7/11 (In German)
- Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Dissertation, RWTH Aachen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 510, Beuth-Verlag, 2001. (In German)
- Gehlen, C. (convenor) et al.: Condition Control and Assessment of Reinforced Concrete Structures, fib bulletin 59, (2011)
- Straub, D.: Spatial reliability assessment of deteriorating reinforced concrete surfaces with inspection data. Proc. ICASP11, Zürich, Switzerland, 2011
- Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag, Berlin (2008), Dissertation (In German)
- Faber M.H., Sørensen J.D. (2002). Indicators for inspection and maintenance planning of concrete structures. Structural Safety, 24 (4), pp. 377-396.
- Straub D., Faber M. H.: Risk Based Inspection Planning for Structural Systems. Structural Safety, 27 (4), pp 335-355, 2005
- Schießl, P.; Gehlen, C.; Zintel, M. Keßler, S.; Rank, E.; Bormann, R.; Lukas, K.; Budelmann, H.; Empelmann, M.; Heumann, G.; Starck, T. Verbundforschungsvorhaben «Nachhaltig Bauen mit Beton» Lebenszyklusmanagementsystem zur Nachhaltigkeitsbeurteilung — Teilprojekt D, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 586, Beuth-Verlag, Berlin, 2011. (In German)
- De Sitter, W. R.: Costs for Service Life Optimization — The Law of Fives; Durability of Concrete Structures, CEB-RILEM International Workshop, Copenhagen 1983. CEB bulletin No. 152,
- Stewart, M. G., D. V. Val (2003), Multiple Limit States and Expected Failure Costs for Deteriorating Reinforced Concrete Bridges, Journal of Bridge Engineering, Trans. ASCE, 8 (6): 405-415.