

ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Создание и функционирование строительного объекта, в том числе мостового сооружения (МС), включает несколько процессов, реализация которых во времени представляет собой так называемый «жизненный цикл» (ЖЦ).

ЖЦ сооружения – это период, в течение которого осуществляются изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (включая и текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос сооружения. Наиболее продолжительный период ЖЦ приходится на процесс эксплуатации, включающий все виды ремонтов и реконструкцию МС. Именно в период эксплуатации пользователи, владельцы и эксплуатационники МС на практике оценивают результат деятельности проектировщиков и строителей. Их мнения, замечания, претензии, рекламации в период эксплуатации создают так называемую обратную связь. Одним из наиболее действенных примеров такой обратной связи, отражаемой в договорных обязательствах, является гарантия качества на определенный период. Однако общеизвестно, что и гарантия не всегда является панацеей от преждевременного выхода из строя элементов МС.

Вместе с тем, как показывает передовой мировой опыт, проектные и строительные организации, нацеленные на завоевание лидирующих позиций в отрасли, сами инициируют процесс обратной связи, с целью повысить качество продукции и свою репутацию, с учетом всех процессов, которые происходят в течение ЖЦ объекта. Главными процессами ЖЦ, в сочетании с преследуемыми целями, являются:

- беспрепятственный и безопасный пропуск транспортного потока и пешеходов;
- наиболее эффективный и оптимальный комплекс работ по эксплуатации МС;
- минимизация вредных воздействий на здоровье человека и окружающую среду.

Данные цели соответствуют положениям одной из наиболее передовых систем менеджмента качества – Business Excellence, широко применяемой ве-

душими проектными и строительными организациями Европы, например, при создании транспортных связей между Данией и Швецией, включающих известные мостовые переходы «Большой Бельт» и «Орезунд». Данная система может интегрировать в себе другие системы менеджмента, в частности наиболее известные ISO 9001, ISO 14001 и другие. Расширенные системы управления качеством, подобные Business Excellence, не только оптимизируют производственные процессы, но ориентированы на долговременные, важные для общества результаты.

В связи с вышеизложенным следует отметить, что аналогичный подход формируется и применяется в последнее время в проектной организации ОАО «Трансмост». При этом совершенствованию проектных решений с целью их наибольшего соответствия критериям безопасной, удобной и эффективной эксплуатации способствует учет параметров ЖЦ на долгосрочный период. Комплексность данного подхода обусловлена тесным сотрудничеством специалистов мостовых проектных отделов и недавно созданных в институте дорожного отдела (ДО) и отдела жизненного цикла транспортных сооружений (ОЖЦ), что позволяет анализировать не только технические характеристики мостов как неотъемлемой части автодорожного маршрута, но также и эксплуатационные и экономические показатели, с учетом их изменения во времени.

Так, для проектируемых в последнее время внеклассных объектов предусматривается расчетное обоснование эффективности работы водоотвода, разработка мероприятий по обеспечению сохранности и прогноз долговечности конструктивных элементов с оптимизацией их плановой замены в течение ЖЦ, наиболее полное оснащение встроенными приспособлениями для надзора, всеми видами эксплуатационных обустройств и другие подобные проектные мероприя-



Рис. 1. Проектные решения моста через Ангару предусматривают возможность тщательного надзора: смотровые приспособления имеются на опорах, по фасаду и между балками пролетных строений



Рис. 2. Начальная степень деградации типового железобетонного пролетного строения моста через 10 лет эксплуатации: наибольшая площадь протечек отмечается в зоне крайних балок



Рис. 3. Состояние крайних балок типового железобетонного пролетного строения моста через 34 года эксплуатации

тия. Например, для уже построенной первой очереди моста через Ангару у села Богучаны на автодороге Богучаны – Юрубчен – Байкит в соответствии с проектом выполнены мероприятия по консервации элементов опор, произведено оборудование пролетных строений смотровыми ходами не только внутренней, но и наружной сторон, устроены смотровые площадки на опорах (рис. 1).

Следует отметить, что вопросам оптимизации ЖЦ при проектировании больших и внеклассных МС традиционно уделяется повышенное внимание. Наиболее грамотным решением со стороны заказчика в этом смысле является включение в задание на проектирование раздела «Организация работ по содержанию автомобильной дороги» применительно к мостовому переходу как участку трассы. К сожалению, данный раздел проектной документации в настоящее время не является обязательным в России. Но многие заказчики, считающие важными вопросы безопасной, удобной и эффективной эксплуатации, при достижении одновременной экономии бюджета в течение ЖЦ, все же предусматривают его в задании на проектирование больших мостов.

Для малых и средних МС длиной до 100 м на стадии проектирования практически никогда не разрабатываются системные мероприятия, направленные на оптимизацию ЖЦ. В связи с этим

следует отметить, что малые и средние балочные железобетонные и сталежелезобетонные МС составляют подавляющее большинство (до 80%) от общей протяженности, следовательно, наибольший ущерб от преждевременного износа МС в России приходится на их долю.

По мировым нормам экономически развитых стран, проектная долговечность железобетонных несущих элементов МС на автодорогах, в зависимости от интенсивности движения, климатических особенностей и при условии их надежной защищенности в период эксплуатации от протечек с проезжей части и проникновения хлористых солей, оценивается в 80–100 лет. Нормативно этот срок гарантируется обязательными расчетами по 1-й и 2-й группам предельных состояний, расчетами на выносливость, применением ряда коэффициентов надежности по нагрузке, коэффициентов условий работы, динамических и тому подобных коэффициентов.

Вместе с тем, как отечественная, так и зарубежная практика эксплуатации МС показывает, что фактическая работоспособность МС, или срок их эксплуатации до ремонта или реконструкции, составляет на данный период 30–45 лет, срок службы до полной замены – 55–70 лет (рис. 2, 3). Следовательно, существуют значительные резервы продления долговечности МС с одновременным улучшением их транспортно-эксплуата-

ционного состояния и других потребительских свойств.

В последние два десятилетия, в связи с расширением международного обмена опытом, особенно очевидным стало отставание отечественной дорожной отрасли именно в области эксплуатации, в том числе и МС. При этом российский уровень проектирования и строительства несущих конструкций МС в целом соответствует мировому. Однако мнение рядового пользователя об уровне хотя бы комфортности и безопасности проезда даже по главным отечественным магистралям невысоко, по сравнению, например, со скандинавскими дорогами, расположенными в сходных климатических условиях.

Следует отметить, что и в странах, считающихся наиболее развитыми, понимание важности принятия решений по проектным характеристикам и стратегиям эксплуатации МС с учетом продолжительности всего ЖЦ пришло не сразу. Например, в США в первой половине XX века произошло несколько обрушений мостов, самым известным из которых является обрушение Такомакого моста. Но переосмысление послевоенной стратегии эксплуатации МС в США, приветствовавшей удешевление строительных и эксплуатационных работ, датируется 1968 годом, непосредственно после обрушения Серебряного моста через реку Огайо 15 декабря накануне Рождества 1967 года. При обрушении

№№ пп	Перечень элементов, входящих в группу	Сроки службы
1	Слой износа асфальтобетонного покрытия, ограждения безопасности	5–10 лет
2	Нижний слой асфальтобетонного покрытия, гидроизоляция, защитный слой гидроизоляции, выравнивающий слой, водоотвод и дренаж мостового полотна, деформационные швы	10–20 лет
3	Крайние балки пролетных строений и их опорные части, тротуарные консоли (или блоки), насадки устоев, ригели промежуточных опор	25–45 лет
4	Средние балки пролетных строений и их опорные части, тело промежуточных опор, сопряжение с насыпью, укрепление конусов, лестничные сходы, перильные ограждения	40–70 лет
5	Тело насыпи конусов, тело устоев, фундаменты устоев и промежуточных опор	> 70 лет

Табл. 1. Сроки службы групп элементов МС

погибло 46 человек. Это вызвало сильный резонанс в правительственных и общественных кругах. В результате была выработана новая мостовая политика. Было экономически обосновано применение материалов и конструкций МС не только по критерию их дешевизны на период проектирования и строительства, но с учетом всего ЖЦ, обоснована регулярность, тщательность и техническая оснащённость обследований с выделением реальных капиталовложений, в состав обязательных разделов проекта МС с 1994 года включено планирование ЖЦ МС.

Мировой опыт убедительно подтверждает тенденцию к корреляции частоты критических отказов (в том числе обрушений) МС и таких показателей ЖЦ, как относительная площадь протечек, частота обследований, степень обеспечения доступности несущих элементов при обследованиях и т. п. Внушает тревогу наметившаяся в последние годы тенденция к учащению обрушений российских мостов, обусловленных их износом. К счастью, при этом пока не произошло массовой гибели людей.

На основе вышеприведенных фактов можно заключить, что опасение за тяжесть последствий непродуманного, таящего в себе высокие риски процесса эксплуатации МС является одним из действенных стимулов формирования прогрессивного подхода, нацеленного на максимально полезный для общества результат, что в наивысшей степени соответствует стратегии передовых систем менеджмента качества, например, упомянутой выше Business Excellence. К сожалению, реализация этих подходов возможна иногда по факту тяжелых последствий и массовой гибели людей,

как видно из примера США. Однако в Европе подобные подходы были сформированы и легли в основу эффективных систем менеджмента МС на основе умозрительных заключений, прогнозов и анализа рисков возможных последствий, что позволило предотвратить ряд критических отказов, повысить потребительские свойства МС и бюджетную эффективность их эксплуатации.

Но есть и другие стимулы, наиболее действенными из которых являются экономические. Реальные возможности развития экономических стимулов имеют организации, осуществляющие управление платными дорожными объектами. Успешность реализации этих стимулов зависит от желания и организационных усилий руководства разных уровней. Одним из хорошо зарекомендовавших себя инструментов реализации экономического стимула при содержании дорожных объектов является контракт жизненного цикла (КЖЦ), который, как правило, заключается с организацией, построившей объект, на период не менее восьми лет. Впрочем, в ряде развитых стран КЖЦ успешно осуществляются и на бесплатных дорожных объектах, находящихся в государственной или муниципальной собственности. Во многих странах (Германия, Швеция, Дания, Япония и многих других) отмечается действенность стимулов профессиональной, корпоративной, национальной гордости и ответственности за состояние дорожных объектов, в собственности МС.

В результате применения прогрессивных подходов в ряде развитых стран была выработана новая стратегия «превентивного содержания» МС. Основными целями данной стратегии являются:

- обеспечение проектной долговечности элементов МС до их плановой замены;
- обеспечение проектной грузоподъемности и безопасности МС в течение всего ЖЦ;
- минимизация снижения пропускной способности МС в течение ЖЦ;
- снижение стоимости ЖЦ при одновременном сохранении пользовательских характеристик МС;
- снижение пользовательских издержек, ущерба здоровью и окружающей среде в течение ЖЦ.

Главными техническими принципами превентивного содержания являются:

- доступность всех элементов МС, что означает техническое обеспечение досягаемости любого элемента на расстоянии касания руки;
- обеспечение своевременной тщательной очистки всех элементов МС, нейтрализации хлористых солей;
- анализ рисков нежелательных событий, который обосновывает приоритетность выполнения работ;
- обнаружение и устранение дефектов на ранней стадии развития в период проектной долговечности конструктивных элементов;
- плановая замена конструктивных элементов в соответствии с проектной долговечностью.

Принципиальная схема рабочего цикла превентивного содержания проста. Она включает инспекции сооружений (или, в российской практике, надзор), получение наиболее достоверной информации, ее обработку, планирование мероприятий и их выполнение. Аналогичные действия предусмотрены и отечественными нормами и методиками, но проблема заключается именно в воз-

возможности достигаемости конструкций и получения действительно достоверной информации. Поэтому данная проблема должна решаться в первую очередь на стадии проектирования путем оценки доступности конструкций и стоимости технических решений в зависимости от принимаемых вариантов.

Стоимость затрат на протяжении ЖЦ МС значительно снижается при обеспечении раннего обнаружения дефектов и их своевременного устранения. К сожалению, отечественной практике в настоящий период свойственна скорее «пассивная», в отличие от «превентивной», стратегия содержания. Об этом свидетельствует и наметившаяся в последние годы тенденция к учащению обрушений российских мостов, обусловленных их износом.

Рассмотрим два сценария ЖЦ МС применительно к условиям России. Для отслеживания износа, восстановления и замены элементов, распределения по годам ЖЦ объемов работ по содержанию, включающих уход, профилактику, планово-предупредительные работы (ППР) и надзор, за основу был принят стоимостный метод. Он позволяет сопоставлять и суммировать объемы вышеуказанных процессов и мероприятий в общих единицах измерения – рублях. Цены приведены к уровню IV квартала 2011 года.

При определении темпов износа различных конструктивных элементов МС, оценки вероятности нежелательных событий и тяжести последствий использовались статистические данные обследований МС РФ, выполненных в период 1995–2011 годов. Выявлены элементы, скорость износа которых примерно одного порядка, которые объединены в группы. Наиболее уязвимыми являются крайние балки, тротуарные консоли, ригели опор. Данные элементы сведены в группы (табл. 1).

Дальнейшие сравнительные расчеты параметров ЖЦ выполнены для базового объекта-представителя в виде типового железобетонного моста длиной до 100 м. На графике (рис. 4а) представлен вариант организации ЖЦ, характерный для конструкций улучшенного типа, применяющихся в настоящий период: с монолитными тротуарными консо-

лями, гидроизоляцией «Мостоласт», дренажными каналами, водоотводными трубками, температурно-неразрезным пролетным строением и деформационными швами типа «Maurer Sohne» над устоями. Показатели долговечности соответствуют желаемым целевым показателям «Концепции улучшения состояния мостовых сооружений на федеральной сети автомобильных дорог России на период 2002–2010 годов» (далее – Концепция) на 2010 год (окончание программного периода): по критерию работоспособности – 40 лет, по критерию предельного срока службы (до реконструкции или замены) – 70 лет.

Заметим, что за программный период с 2002 по 2010 год, предусмотренный Концепцией, суммарные удельные затраты на содержание (C_{сод}) выросли с 0,55% до 0,98%. То есть этот показатель уже приблизился к европейскому уровню 1,0–1,5%, однако качество содержания все еще далеко от европейского. Происходит это потому, что часть средств, отпускаемых на содержание, тратится фактически на ремонтные работы в рамках ППР. Распределение между видами работ на содержание, рекомендуемое Концепцией, таково: 25% – уход, 13% – профилактика, 49% – ППР, 13% – надзор. Такое распределение, отдающее половину средств содержания фактически на ремонтные работы, было оправдано большим количеством «недоремонта» на начало дей-

ствия Концепции – 2002 год. Работы по ППР, в существующей номенклатуре, временно улучшая состояние МС, ликвидируя их аварийность, как правило, не замедляют общий темп износа и не спасают конструктивные элементы от преждевременной замены.

График (рис. 4а) демонстрирует прогноз жизненного цикла МС на 70 лет до полной замены всех несущих элементов, кроме фундаментов опор и грунта конусов. Этот сценарий соответствует требованию по Концепции финансированию работ по содержанию, с учетом начального увеличения затрат на улучшение качества строительства по сравнению с 1990-ми годами.

Общая стоимость прямых затрат на год жизненного цикла МС составляет:

$$C_{\text{ЖЦ, год}} = (\sum C_{i \text{ зам}} + \sum C_{i \text{ разб}} + \sum C_{i \text{ ОД}} + C_{\text{сод, год}} * T_{\text{ЖЦ}}) / T_{\text{ЖЦ}} \quad (1)$$

где:

$C_{i \text{ зам}}$ – стоимости замены элементов в период ремонтов и реконструкции;

$C_{i \text{ разб}}$ – стоимости разборки элементов при их замене;

$C_{i \text{ ОД}}$ – стоимости организации движения в период ремонтов и реконструкции – сооружение и разборка временных объездных МС, установка и снятие знаков, ограждений и т.п.;

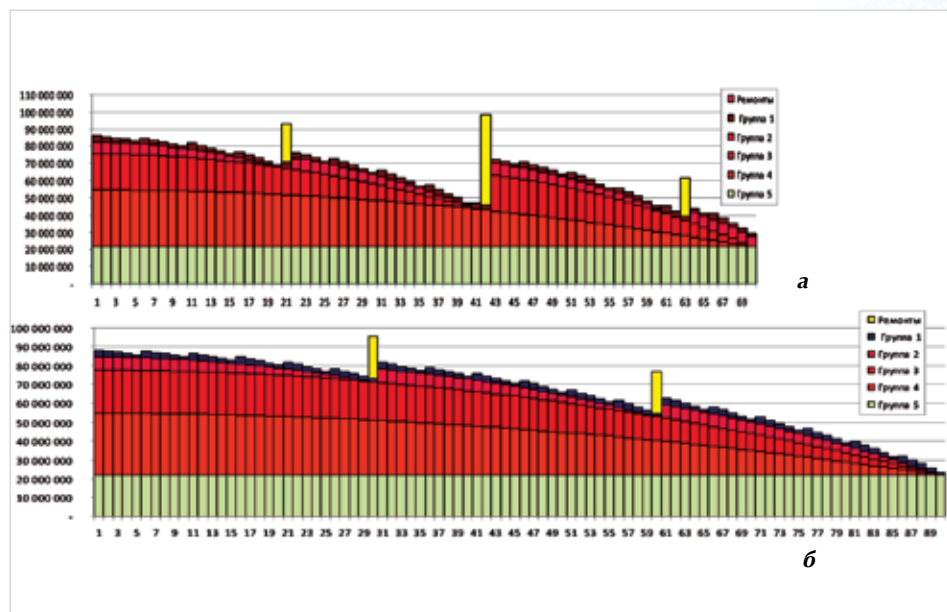


Рис.4. Характерные сценарии износа групп элементов мостов:
а – при сроке службы мостового полотна 20 лет, асинхронном износе элементов и стратегии «пассивного содержания»;
б – при сроке службы мостового полотна 30 лет, достижении кратных сроков износа элементов и стратегии «превентивного содержания»

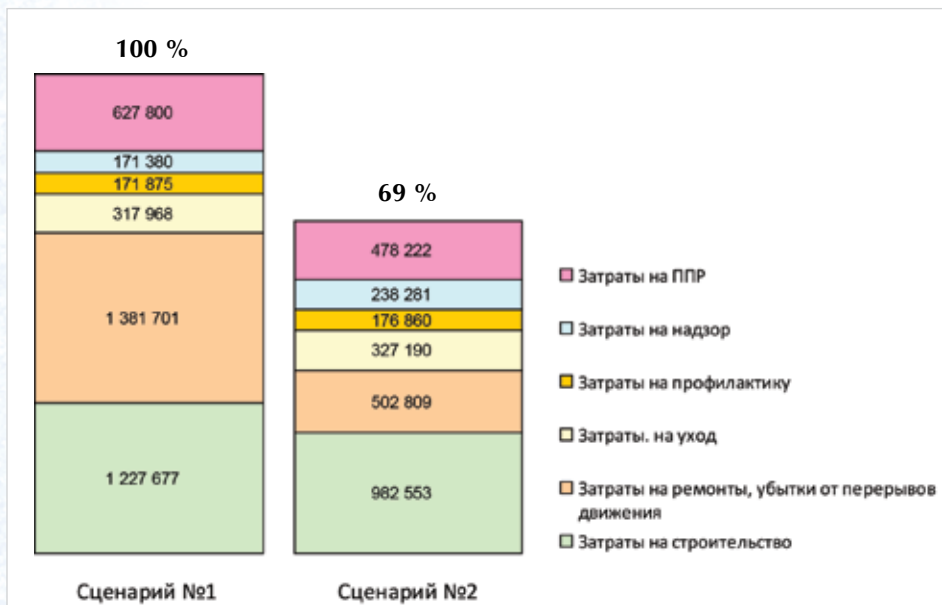


Рис. 5. Сравнение стоимости жизненного цикла моста для рассмотренных сценариев износа

$C_{\text{сод., год}}$ – среднегодовая стоимость работ по содержанию;

$T_{\text{ЖЦ}}$ – продолжительность ЖЦ, принимаемая в расчет.

Для сценария на рис. 4а, применяя формулу (1), получим $C^1_{\text{ЖЦ, год}} = 3\,898\,401$ рублей.

Передовой мировой опыт содержания МС рекомендует следующее соотношение затрат на содержание с целью наиболее эффективного сохранения конструкций и продления их долговечности: 26% – очистки (уход), 46% – сохраняющие и восстановительные мероприятия (профилактика и ППР), 28% – инспекции (надзор). Как можно видеть, доля работ по уходу почти совпадает с положениями Концепции. Однако зарубежная номенклатура работ по содержанию несколько отличается как от российской, так и для разных стран, например, даже внутри ЕЭС.

Общим для зарубежных систем содержания МС является то, что в уход включается в основном очистка, мойка и смазка элементов (cleaning, washing & oiling).

Например, все виды окраски выполняются в составе «сохраняющих» (saving) работ, причем ежегодные окраски по старым слоям, только с целью придать видимость обновления, исключены. В ряде северных стран (например, в Скандинавии) в состав очисток в обязательном порядке включены промыв-

ки и продувки конструкций МС после периода зимнего содержания с целью снижения содержания хлористых солей, причем результаты этой работы, которой справедливо придается особая важность, строго контролируются.

Следующим кардинальным отличием от отечественной практики является повсеместное оснащение подрядных организаций, эксплуатирующих МС, передвижными механизированными люльками и платформами для осмотра и производства работ в подмостовой зоне на всем протяжении МС. Отсутствие или неэффективное использование таких машин, к которым часто пренебрежительно относятся в отечественной практике, является одной из главных причин преждевременного износа МС в России и значительно увеличивает риски их критических отказов (обрушений).

В большей степени от отсутствия самоходных смотровых машин страдают МС с железобетонной плитой проезжей части, протяженность которых в России, включая сталежелезобетонные, составляет около 80%. Во-первых, железобетонные мосты практически не снабжены встроенными смотровыми ходами, как металлические. Во-вторых, протечки воды, насыщенной реагентами, происходят именно через железобетонную плиту, являясь главной причиной выхода из строя и самой плиты, и ниже расположенных конструкций. Не имея

средств доступа к нижней поверхности плиты, обследователь, как правило, замечает протечки только тогда, когда они становятся видны с берега или снизу из-под МС на расстоянии от 5,5 м и далее.

Шведские мостовики говорят: «Качество инспекции тем лучше, чем ближе глаз инспектора к объекту». И это трудно оспорить. Но передовые зарубежные требования к обследованию МС предусматривают отнюдь не только визуальное наблюдение. Такие виды неразрушающего контроля, как определение активности коррозии арматуры методом разности потенциалов, влажности бетонной плиты и другие, позволяют определить зоны риска еще до появления видимых на глаз протечек. Это позволяет заменить гидроизоляцию на локальных участках еще до фатального развития коррозии арматуры, карбонизации, насыщения бетона хлоридами и наступления критической фазы развития других нежелательных последствий.

К сожалению, в настоящее время мы не можем сказать, что применительно к российским МС стратегия «превентивного содержания» (Preventive maintenance), распространенная в передовых странах (в обязательном порядке для платных объектов), доступна для широкого применения. Первоочередной причиной этого является недостаток как встроенных смотровых приспособлений, так и самоходных смотровых машин.

На рис. 4б приведен сценарий затрат на протяжении ЖЦ МС, имеющего несущие конструкции, идентичные сценарию, продемонстрированному на рис. 4а, но с несколько улучшенными системами эксплуатационных устройств, водоотвода и гидроизоляции, эксплуатируемого с применением стратегии превентивного содержания. При этом первоначальная стоимость строительства возрастает по сравнению с аналогами на 7–10%. Однако это даст возможность, во-первых, повысить долговечность мостового полотна, не считая слоев износа, до 30 лет, во-вторых, уравнивать темпы износа крайних и средних балок и элементов опор, одновременно повысив их долговечность до 90 лет. В результате удельная среднегодовая стоимость жизненного

цикла, определяемая по формуле (1), составила $C_{2ЖЦ, год} = 2\,705\,915$ рублей. Положительный эффект превентивного содержания обеспечивается нижеприведенными главными мероприятиями, предусматриваемыми в рамках проекта.

На стадии «Проект» разрабатывается раздел «Эксплуатация МС на протяжении ЖЦ», включающий анализ рисков нежелательных последствий, прогнозирование потребительских, транспортно-эксплуатационных и стоимостных параметров ЖЦ с оценкой эффективности вариантов МС, в рамках которого:

- изначально предполагается условие, что при расчете и планировании параметров ЖЦ сроки полного износа групп конструктивных элементов должны быть приведены к примерно одинаковым или кратным величинам за счет варьирования объемов работ по содержанию (восстановительных и сохраняющих мероприятий). Также должны быть кратны и сроки полного износа элементов для возможности организации их синхронной замены (при капитальном ремонте или реконструкции);

- в процессе проектирования производится анализ и отбор известных проектных решений, материалов, изделий и технологий (а также разработка и обоснование инноваций) по критериям «цена-качество», «цена-результат» в течение всего периода ЖЦ;

- обосновывается требуемая проектная долговечность конструктивных элементов;

- выбираются проектные решения конструктивных элементов, позволяющие обеспечить максимальную эффективность, механизацию и унификацию мероприятий по содержанию и надзору.

Сравнение удельной годовой стоимости ЖЦ МС по рассмотренным сценариям (рис. 5) показывает, что при применении проектных решений, основанных на оптимизации ЖЦ и стратегии превентивного содержания, достигается значительное снижение удельной годовой стоимости ЖЦ – на 31% по сравнению с существующей проектной тенденцией и стратегией «пассивного содержания».

На основе результатов данного анализа состояния вопроса и параметров ЖЦ

можно заключить, что для повышения положительного эффекта от проектирования МС в настоящий период являются актуальными следующие задачи оптимизации жизненного цикла:

- обеспечение эффективной обратной связи «эксплуатация МС – проектирование МС»;

- синтез и анализ данных опыта эксплуатации типов конструкций МС;

- разработка раздела проекта МС «Эксплуатация МС на протяжении ЖЦ»;

- анализ рисков нежелательных последствий эксплуатации МС;

- анализ материалов, изделий и технологий по критерию «цена-качество» в рамках ЖЦ;

- выбор проектных решений, наиболее эффективных по критериям оптимизации параметров ЖЦ;

- разработка новых проектных решений, повышающих эффективность ЖЦ МС.

А.В. Сырков,

начальник отдела жизненного цикла
ОАО «Трансмост», канд. техн. наук

