Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №1, Том 5 / 2018, No 1, Vol 5 <https://t-s.today/issue-1-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/10SATS118.pdf>

DOI: 10.15862/10SATS118 (<http://dx.doi.org/10.15862/10SATS118>)

Статья поступила в редакцию 06.02.2018; опубликована 30.03.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нигаматова О.И., Овчинников И.Г., Шварц А.Ю., Овчинников И.И. О разработке интеллектуальных систем проектирования и оценке технического состояния мостовых сооружений. Часть 1 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/10SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10SATS118

For citation:

Nigmatova O.I., Ovchinnikov I.G., Shvarts A.Yu., Ovchinnikov I.I. (2018). About development of intellectual systems of design and assessment of technical condition of bridge constructions. Part 1. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/10SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/10SATS118

УДК 624.04

Нигаматова Ольга Ивановна

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия
Аспирант
E-mail: olganigmatova@ya.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Шварц Александр Юрьевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Ассистент
Кандидат технических наук
E-mail: shvartsaleksandr@gmail.com

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

О разработке интеллектуальных систем проектирования и оценки технического состояния мостовых сооружений. Часть 1

Аннотация. В данной работе рассматриваются четыре этапа жизненного цикла мостового сооружения: проектирование, изготовление, строительство (монтаж), эксплуатация. Отмечается, что этап эксплуатации является самым длительным и составляет десятки лет. Поэтому проблемам длительного обеспечения безопасности и грузоподъемности мостовых сооружений необходимо уделять особое внимание. Далее в работе рассматриваются вопросы обследований мостовых сооружений и обработки полученной информации с целью получения краткого, но емкого заключения о состоянии мостового сооружения. При этом рассмотрены

несколько методик обработки информации с целью получения такого заключения. Отмечается важность автоматизация процесса оценки состояния мостового сооружения путем разработки интеллектуальной системы, которая бы позволяла хранить и обрабатывать экспертные знания в данной области.

Затем рассматриваются некоторые интеллектуальные (экспертные) системы для проектирования мостовых сооружений, причем упор делается на иностранные разработки. Рассматривается Bridge Design Expert System для проектирования пролетных строений малых и средних мостов, и ряд других экспертных систем. В качестве примера более детально описываются особенности экспертной системы «Bentley LEAP Bridge Enterprise», которая широко используется для проектирования малых железобетонных мостов в США, а также экспертная система «LEAP Bridge Steel» той же фирмы Bentley, позволяющая выполнять проектирование, трехмерное моделирование, расчетный анализ, оценку грузоподъемности металлических мостов.

Ключевые слова: интеллектуальные системы; экспертные системы; проектирование мостов; обследование мостов; оценка состояния мостов; долговечность мостов; безопасность мостов

Введение

Транспортная инфраструктура современного государства включает большое количество взаимосвязанных составляющих, среди которых мостовые сооружения играют одну из наиболее важных ролей: без них невозможно создание эффективной системы автомобильных и железных и дорог, следовательно, перевозок грузов и пассажиров. Мосты являются одной из главных составляющих транспортной инфраструктуры, их долговечность и надежность является крайне важной для бесперебойного функционирования дорожных сетей каждого региона и страны в целом. В РФ насчитывается более 72,5 тыс. мостовых сооружений [1].

Под мостовым сооружением понимается искусственное сооружение, которое состоит из одного или более пролетных строений и опор [2]. Такое сооружение предназначается для пропуска наземного транспорта, пешеходов, скота, водотоков и коммуникаций над естественными или искусственными препятствиями (водоемами, оврагами, дорогами и т. д.). Мостовое сооружение включает ряд конструкций – конструктивно объединенных элементов, которые выполняют ограниченный набор функций. Условно конструкции в мостовом сооружении можно разделить на 2 группы:

- Основные: обеспечивают главные функциональные свойства всего сооружения. Особо выделяют несущие конструкции, которые необходимы для восприятия усилий от нагрузок.
- Вспомогательные: могут обеспечивать безопасность только в случае возникновения экстремальных ситуаций, удобство содержания на протяжении всего этапа эксплуатации и другие неосновные функциональные свойства.

Одними из наиболее важных основных конструкций, входящих в состав мостового сооружения, являются пролетные строения. Под этим термином понимается набор элементов, перекрывающих пространство между двумя опорами. В число главных задач пролетных строений входит восприятие нагрузок от мостового полотна, транспорта и пешеходов, собственного веса. Воспринятые нагрузки передаются пролетным строением через опорные части на опоры, которые, в свою очередь, передают их на грунтовое основание.

Также важным элементом мостового сооружения является мостовое полотно, предназначенное для обеспечения безопасности и комфортности движения транспорта и

пешеходов. Оно включает в себя одежду ездового полотна, ограждения, тротуары и системы водоотвода.

Каждое мостовое сооружение, независимо от материала и назначения, проходит 4 этапа жизненного цикла в следующем порядке:

1. Проектирование.
2. Изготовление.
3. Строительство (монтаж).
4. Эксплуатация.

Этап эксплуатации занимает наиболее длительный срок и может составлять десятки лет [1, 2]. Например, в США, обладающих одной из наиболее развитых транспортных инфраструктур в мире, Департамент Транспорта ежегодно публикует статистические отчеты о состоянии мостов по всем штатам [3]. Приведем данные по возрасту мостовых сооружений (табл. 1, рис. 1, 2).

Таблица 1

Возраст мостовых сооружений в США на 31 декабря 2015 года [3]

Возраст, лет	Количество мостовых сооружений	% от общего количества	Площадь мостового полотна, м ²	% от общей площади
0-20	93882	17,1743 %	95073526	25,7592 %
21-40	157329	28,7810 %	99288874	26,9013 %
41-60	186392	34,0977 %	129518936	35,0918 %
61-80	54087	9,8944 %	28765820	7,7938 %
81-100	42706	7,8124 %	13126330	3,5564 %
Более 100	12241	2,2393 %	3312024	0,8974 %
Неизвестно	4	0,0007 %	345	0,0001 %
Всего	546641	100 %	369085855	100 %

Рисунок 1. Распределение количества мостовых сооружений в США по возрастам [3]

Рисунок 2. Распределение общей площади мостового полотна мостовых сооружений в США по возрастам [3]

По данным, представленным в таблице 1 и на рисунках 1 и 2, можно сделать вывод о том, что мосты с возрастом более 40 лет составляют примерно половину от всей совокупности мостовых сооружений, как по количеству, так и по суммарной площади мостового покрытия.

По данным доклада, представленного в рамках Международного Экономического Форума [4], Российская Федерация (123 место) значительно уступает США (13 место) по уровню развития дорожной инфраструктуры. Отсутствие точных официальных данных о возрасте российских мостов в совокупности с общим рейтингом дорожной инфраструктуры Российской Федерации позволяет говорить о том, что доля старых мостов в стране не может быть принципиально ниже, чем в США. Следовательно, проблемам длительного обеспечения безопасности и грузоподъемности мостовых сооружений необходимо уделять особое внимание.

Состояние проблемы, постановка задачи

На каждом из этапов жизненного цикла могут появиться различные дефекты и повреждения, связанные с ошибками в расчетах или технологических процессах, непредвиденными обстоятельствами и другими факторами. Таким образом, уже на момент окончания строительства мостовое сооружение может иметь целый ряд дефектов, большая часть которых может проявиться только в ходе эксплуатации.

Каждый дефект можно условно отнести к одной из категорий: несущественные, малозначительные, значительные, опасные, критические.

Отнесение дефекта к одной из категорий отражает степень его влияния на показатели технического состояния мостового сооружения, а также качественную оценку возможного ущерба.

С целью устранения и предотвращения повреждений и разрушений частей мостового сооружения на этапе эксплуатации проводится ряд мероприятий: обследование, содержание и ремонт [5]. В число задач, решаемых данными мероприятиями, входят:

- обеспечение непрерывного, комфортного и безопасного движения транспортных средств и пешеходов;
- обеспечение исправного состояния всех сооружений на протяжении всего расчетного срока их службы;
- улучшение эксплуатационного состояния сооружений при увеличении интенсивности движения и массы проходящих транспортных средств;
- поддержание внешнего вида сооружений.

Для определения технического состояния, своевременного обнаружения дефектов, разработки рекомендаций по предупреждению и устранению дефектов мостового сооружения необходим регулярный мониторинг состояния путем проведения обследований. В [6] приводятся следующие виды обследований:

- при сдаче мостовых сооружений в эксплуатацию после строительства или реконструкции;
- после ремонта или капитального ремонта;
- периодически в ходе эксплуатации с целью контроля состояния и планирования ремонтных или реконструкционных работ;
- при разработке проектов ремонта, капитального ремонта или реконструкции;

- по результатам осмотров эксплуатирующих организаций.

Следующим необходимым шагом после проведения обследований является оценка технического состояния мостового сооружения. Например, в [7] предложена четырехступенчатая классификация, которая предназначена для предварительной оценки мостовых сооружений по их состоянию:

1. Нормальное состояние.
2. Снижение эксплуатационных качеств.
3. Снижение грузоподъемности.
4. Аварийное состояние.

Основные причинно-следственные связи, описывающие выход мостового сооружения из нормального состояния, схематически представлены на рисунках 3, 4, 5.

Рисунок 3. Основные причинно-следственные связи между событиями, приводящими к аварийному состоянию мостового сооружения (составлен авторами)

Рисунок 4. Основные причинно-следственные связи между событиями, приводящими к снижению грузоподъемности мостового сооружения (составлен авторами)

Рисунок 5. Основные причинно-следственные связи между событиями, приводящими к снижению эксплуатационных качеств мостового сооружения (составлен авторами)

В аварийном состоянии риск выхода из строя (разрушения) сооружения наиболее велик. Причины разрушения можно условно разделить на 3 группы:

- Естественные: постоянное накопление и повреждений под воздействием усталости и старения материала, агрессивных условий внешней среды. Возможность изучения и прогнозирования влияния данных причин обусловлена рядом исследований в данной области [5, 8]. На появление таких повреждений сильнее всего влияет срок и изменяющиеся условия эксплуатации моста [9].
- Искусственные: ошибки инженеров при проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции сооружений [10]. Влияние таких ошибок может быть значительно уменьшено за счет организации системы контроля качества на всех этапах жизненного цикла моста.
- Непредвиденные: стихийные бедствия, техногенные катастрофы и умышленные действия человека. Данный класс причин хуже остальных поддается прогнозированию, однако при проектировании и эксплуатации моста хотя бы частично предусматривается возникновение непредвиденных воздействий, планируется комплекс мер по устранению их последствий.

Как отмечалось ранее, методика [7] подходит для предварительной оценки сооружений. Более точную оценку можно получить, используя методику [11], в которой рассмотрена шестибальная шкала, по которой оценке сооружению присваивают по результатам технических осмотров и обследований.

Таблица 2

Соответствие видов технического состояния балльной оценке [11]

Вид технического состояния			Техническое состояние	Балльная оценка
Предельное	Неработоспособное	Неисправное	Аварийное	0
			Предаварийное	1
			Неудовлетворительное	2
	Ограниченно работоспособное	Исправное	Удовлетворительное	3
			Хорошее	4
			Отличное	5

Полученная оценка всего мостового сооружения получается на основе следующих предварительно вычисленных параметров:

- обобщенный показатель технического состояния мостового сооружения $K_{об}$, складывающийся из трех оценок технического состояния: по долговечности $K_д$, по безопасности $K_б$, по грузоподъемности $K_г$;
- показатель вида ремонтного воздействия K_p ;
- показатель габарита проезжей части $K_{пч}$;
- показатель подмостового габарита $K_{пг}$;
- показатель габарита проехной части $K_{пр}$;
- оценка технического состояния по грузоподъемности $K_г$.

Таким образом, происходит оценка сооружения не только по принципу соответствия нормативным и проектным требованиям, но и по трем важным показателям: долговечности, безопасности и грузоподъемности. Для этого каждому выявленному дефекту присваивается категория, состоящая из буквы (по параметру влияния: Б – безопасность, Г – грузоподъемность,

Д – долговечность) и цифры (0 – несущественный, 1 – малозначительный, 2 – значительный, 3 – опасный, 4 – критический). Также для учета возможности устранения дефекта вводится категория ремонтпригодности, обозначаемая буквой Р и цифровым индексом (1 – легко устранимые дефекты в рамках содержания; 2 – дефекты, устраняемые в ходе ремонта или сверхнормативного содержания; 3 – устранение дефектов затруднительно, требует проектной разработки и производится в ходе ремонта или капитального ремонта; 4 – неустраняемые дефекты, требующие замены конструкции). Таким образом, дефекту присваивается две категории, например, Б1 и Р2.

Приведем краткое описание особенностей мостовых сооружений, относимых к одной из 6 предусмотренных категорий:

1. Отличное техническое состояние (балльная оценка – **5**): соответствие всем требованиям нормативной и конструкторской документации.
2. Хорошее техническое состояние (балльная оценка – **4**): все основные конструкции находятся в исправном состоянии; значения одного и более параметров технического состояния не удовлетворяют нормам, однако не нарушаются основные функциональные свойства сооружения.
3. Удовлетворительное техническое состояние (балльная оценка – **3**): основные функциональные свойства частично нарушены; все основные конструкции находятся в работоспособном состоянии; возникающие затруднения продвижения транспорта носят временный характер; обеспечивается безопасный пропуск транспорта со скоростью не ниже уровня, установленного экономическими соображениями; ремонтные работы проводятся в плановом режиме.
4. Неудовлетворительное техническое состояния (балльная оценка – **2**): в основных конструкциях имеются значительные дефекты по долговечности, безопасности и грузоподъемности; требуемые функциональные свойства выполняются лишь частично, эксплуатация нарушена, однако критический отказ и авария маловероятны. Для таких сооружений вводятся ограничения (регулирование движения дорожными знаками), им первую очередь необходим ремонт, капитальный ремонт или реконструкция.
5. Предаварийное техническое состояние (балльная оценка – **1**): непригодное для нормальной эксплуатации состояние, в случае продолжения неблагоприятных воздействий возможно появление аварий; требуется принудительное регулирование режима эксплуатации; в основных конструкциях имеются опасные дефекты по долговечности, безопасности и грузоподъемности. Для таких сооружений устанавливается специальный режим контрольных мероприятий (например, ежедневный осмотр).
6. Аварийное техническое состояние (балльная оценка – **0**): возможность потери устойчивости и разрушения конструкций; в основных несущих конструкциях имеются критические дефекты, которые исключают дальнейшую эксплуатацию сооружения и требуют немедленного закрытия движения.

Несвоевременная оценка технического состояния мостового сооружения может привести к возникновению аварийных ситуаций, в результате которых наносится ущерб здоровью и имуществу людей, транспортным средствам, коммуникациям, нарушается функционирование транспортной системы.

В статьях [12, 13, 14, 15] приведены систематизированные данные по авариям мостовых сооружений в мире по состоянию до 2010 года.

Поэтому далее приведем примеры произошедших за последние годы в Российской Федерации аварий мостов, которые могли быть предотвращены за счет своевременной и корректной оценки их технического состояния.

7 мая 2011 года произошло обрушение двух пролетов железнодорожного моста через реку Абакан в Хакасии [16]. В результате обрушения пострадавших и погибших не было. Однако в республике был введен режим чрезвычайной ситуации, так как было нарушено снабжение ряда региональных промышленных предприятий (например, Саяногорского алюминиевого завода), а также под угрозой оказались поставки оборудования для восстановления Саяно-Шушенской ГЭС. Проверка транспортной прокуратуры показала, что руководство компании, в чьей собственности находится железнодорожная ветка, ослабило контроль ремонтных и профилактических работ на дистанции пути. Кроме того, к осмотру моста был привлечен мастер, не имеющий специального образования, который вел учетные записи с нарушениями нормативов. На основе анализа причин и последствий аварии было принято решение об усилении трех опор, ликвидации одной опоры и замене двух пролетных строений по 55 метров на одно длиной 110 метров. Окончательно движение по мосту было восстановлено 6 июня 2011 года.

2 ноября 2014 года произошло проседание опоры и дорожного полотна моста через реку Двина в г. Велиж Смоленской области [17]. Мост является частью трассы Р-133. Движение автотранспорта и пешеходов через мост было закрыто, в Велижском районе 3 ноября был объявлен режим чрезвычайной ситуации. Объездной путь длиной 89 км проходил через г. Сураж (Республика Беларусь). В ходе осмотра несущих конструкций моста был обнаружен зазор между блоками шириной до 10 см, прогиб пролета глубиной 38 см. По результатам осмотра было сделано заключение о невозможности дальнейшей эксплуатации моста и подтверждена опасность обрушения всего строения. Отметим, что мост был сдан в эксплуатацию в июле 2010 года после текущего планового ремонта.

9 сентября 2016 года в момент проезда железнодорожного состава с зерном произошло обрушение моста через реку Березовка в Петровском районе Саратовской области [18]. Жертв и пострадавших не было. В результате обрушения 8 из 16 вагонов железнодорожного состава сошли с рельсов, 3 из них попали в реку.

23 февраля 2016 года в реку Литовка (Приморский край) вместе с проезжавшим автомобилем обрушились два пролета моста на трассе Артем – Находка – порт Восточный [19]. Пострадавших не было. Ущерб региональному бюджету оценили в 30 миллионов рублей.

Приведенные примеры подтверждают тот факт, что аварии на мостовых сооружениях могут привести к серьезным последствиям, в числе которых:

- Прекращение или ограничение движения по дороге, которая проходит по мостовому сооружению или под ним. Следствием такой ситуации может стать нарушенное обеспечение населенных пунктов товарами первой необходимости и снабжение предприятий. Кроме того, повышается интенсивность движения на объездных дорогах.
- Повреждение транспортных средств, находящихся в момент аварии на мосту или под ним.
- Травмы и летальные исходы водителей, пассажиров и пешеходов.

- Финансовые и временные затраты на выяснение причин аварии, проведение работ по восстановлению сооружения.

Таким образом, важной задачей является предотвращение аварий за счет оценки технического состояния и заблаговременного принятия необходимых мер по устранению дефектов и повреждений мостового сооружения.

На рис. 6 представлена блок-схема оценки мостового сооружения по методике [11].

Процесс оценки технического состояния в соответствии с [11] подразумевает значительные финансовые (оплата труда группы инженеров, транспортные расходы, амортизация оборудования и т. п.) и временные (путь до места расположения сооружения, проведение измерений и осмотра, обработка и анализ полученных результатов) затраты. Кроме того, оценку должны производить инженеры-эксперты с профильным образованием, проходящие профессиональную переподготовку каждые 5 лет, с большим опытом и высоким уровнем квалификации [20]. Учитывая данные особенности, проведение оценки не представляется возможным для всех мостовых сооружений. Особенно данная проблема актуальна для отдаленных горных и северных районов Российской Федерации, в которые выезд группы квалифицированных инженеров зачастую не представляется возможным. Следовательно, ряд сооружений может фактически находиться в неудовлетворительном, предаварийном или аварийном состоянии, но для исправления такой ситуации не будет приниматься необходимых мер. Наличие и усугубление имеющихся дефектов и повреждения в дальнейшем может привести к аварийным ситуациям.

Таким образом, можно сделать заключение о том, что оценка технического состояния мостов является актуальной и важной задачей для транспортной отрасли. Решение данной задачи позволяет своевременно выявлять сократить количество аварий за счет своевременного определения мостовых сооружений, подлежащим ремонту и реконструкции. Кроме того, важной задачей является автоматизация решения задачи оценки путем разработки интеллектуальной системы, которая бы позволяла хранить и обрабатывать экспертные знания в данной области [21, 22], осуществлять поддержку принятия решений в условиях неопределенности [23]. Применение такой интеллектуальной системы позволяет решить проблему острой нехватки инженеров-экспертов как в ходе принятия решений по оценке технического состояния, так и в процессе обучения новых специалистов.

Рисунок 6. Блок-схема процесса оценки технического состояния мостового сооружения в соответствии с методикой [11]

Применение интеллектуальных (экспертных) систем для проектирования транспортных сооружений

Интеллектуальной (экспертной) системой называется программная система, основанная на знаниях и решающая прикладную задачу (классификация, прогнозирование, управление и т. д.) в определенной предметной области [24, 25].

Знаниями называется совокупность некоторых сведений, образующих целостное описание, соответствующее некоторому уровню осведомленности об описываемом вопросе, предмете, процессе, явлении и т. д.

Рассмотрим особенности создания интеллектуальных систем. В ходе исследований и практических работ в этой области [24, 25], жизненный цикл интеллектуальной системы был условно разделен на следующие последовательные этапы: идентификация, концептуализация, формализация, выполнение, отладка, опытная эксплуатация. Отметим, что реальный процесс создания интеллектуальной системы не всегда строго следует приведенному порядку: возможны возвраты на один или несколько этапов назад, повторения этапов. Чаще всего это происходит по причине ошибок или недоработок, допущенных на предыдущих этапах и выявляемых только на последующих. Таким образом, можно утверждать, что создание интеллектуальной системы представляет собой длительный и трудозатратный процесс, сроки завершения которого не всегда возможно прогнозировать в начале разработки.

Независимо от предметной области, одними из наиболее важных и вызывающих наибольшие трудности этапов разработки являются неразрывно связанные друг с другом формализация (выбор способа представления и обработки знаний) и выполнение (наполнение базы знаний). На данный момент в литературе описано множество способов представления знаний в интеллектуальных системах [26-30], каждый из которых обладает рядом отличительных особенностей и ориентирован на использование в системах, решающих определенный круг задач.

Интеллектуальные системы применяются для решения задач, связанных с управлением или диагностикой в сложных технических системах. К таким системам можно отнести мостовое сооружение, для которого важной является задача оценки технического состояния. Оценка требует не только проверки сооружения на соответствие нормативной и проектной документации, но и использования экспертных знаний. Автоматизация оценки при помощи интеллектуальной системы позволяет накапливать и обрабатывать знания экспертов в этой области, осуществлять поддержку принятия решений в условиях неопределенности. Применение такой интеллектуальной системы позволяет решить проблему острой нехватки инженеров-экспертов как в ходе принятия решений по оценке технического состояния, так и в процессе обучения новых специалистов.

Рассмотрим некоторые существующие в настоящее время и используемые интеллектуальные экспертные системы применительно к проблеме транспортного строительства (мостостроения).

Заметим, что, возможно одними из первых публикаций на русском языке, посвященными обзору применения экспертных систем в указанной сфере были публикации [31-33].

В статье [21] рассмотрены экспертные системы управления состоянием мостовых сооружений на автомобильных дорогах Германии (Bridge Management System) [34], Соединенных Штатов Америки (Pontis BMS) [35] и Швейцарии (KUBA) [36]. Мы здесь не будем их рассматривать, они достаточно информативно описаны в статье [21].

Несколько более подробно рассмотрим экспертные системы по проектированию мостовых сооружений.

В статье [37] утверждается, что многие из существующих экспертных систем для проектирования мостовых конструкций основаны исключительно на эвристических правилах. Мосты, как оказалось, являются ярким примером конструкций, для которых концептуальный дизайн имеет важное значение [38], и, следовательно, существует большой объем и потребность в разработке экспертных систем, основанных на знаниях, для оказания помощи на предварительном этапе проектирования мостов. Расчет заданной мостовой конструкции могут достаточно корректно реализовать многие инженеры мостовики, занимающиеся применением программных комплексов для расчета конструкций и даже некоторые студенты. Но процесс проектирования мостов обычно состоит из трех различных этапов, таких как: этап концептуального проектирования, этап предварительного проектирования и этап детализации. И вот на этапе предварительного проектирования экспертные системы могут быть весьма полезными.

Концептуальный этап проектирования мостовых сооружений – это начальный этап процесса проектирования, который связан с выбором общей концепции мостового сооружения и включает диалог (общение) между заказчиком, архитектором и инженером. При этом большую помощь в концептуальном проектировании может оказать наличие хотя бы небольшого опыта.

Предварительный этап проектирования включает в себя назначение общей конструктивной схемы мостового сооружения и опыт на этом этапе играет значительную роль. Принятое на этом этапе решение затем должно быть детализировано на следующем этапе с учетом различных критериев и требований. И потому хорошая экспертная система должна как бы интегрировать этапы предварительного и детального проектирования. Детальный этап проектирования включает детальный анализ выбранных конструктивных решений, назначение компонентов и проверку выполнения всех прочностных и конструктивных ограничений.

Существует много преимуществ использования экспертных систем для повышения эффективности проектов. Однако существует некоторое ограничение использования экспертных систем, например, они не способны создавать независимые решения, не способны выйти за рамки набора правил, в нее заложенных.

Но в то же время технология экспертных систем успешно применяется для проектирования мостов несколькими группами исследователей. Процесс проектирования включает в себя генерирование и анализ множества решений, основанных на прошлом опыте, анализе, эмпирических правилах и других факторах. Поскольку проект мостового сооружения может быть выполнен многими альтернативными способами, экспертные системы, разработанные для проектирования мостов, могут помочь подобрать наиболее подходящее решение.

В работе [39] рассмотрена экспертная система по проектированию мостов Bridge Design Expert System (BDES), созданная специально для проектирования пролетных строений малых и средних мостов в США. Эта система позволяет проектировать пролетные строения из стальных балок и предварительно напряженных железобетонных балок пролетом до 60 м.

Spencer, W. J. с сотрудниками [40] рассматривали экспертную систему в среде EXSYS для предварительного проектирования мостов с малыми и средними пролетами, а также водопропускных труб под насыпями автомобильных дорог. База знаний экспертной системы включает в себя руководство по проектированию автодорожных мостов, спецификации реализованных проектов мостов, а также другие нормативные документы. В статье после некоторого рассмотрения процесса предварительного проектирования и соответствующих

правил проектирования обсуждалась стратегия развития экспертной системы, основанная на использовании функций EXSYS, причем оказалось, что такой подход достаточно эффективен.

Moore and Miles [41] описали экспертную систему, ориентированную на использовании базы знаний (KBS) в концептуальном проектировании мостов. Эта система позволяет осуществлять разбивку мостов на пролеты, подбирать тип несущих конструкций и фундаментов. Но эта система не смогла спроектировать железнодорожный или автодорожный мост при наличии более 4 пролетов.

В статье [42] описана экспертная система SUPEREX для подбора типа пролетных строений мостов на основе ряда расчетных критериев, строительной механики, и эвристических знаний экспертов.

Ряд экспертных систем по проектированию мостов рассмотрен также в статьях [43, 44].

Пример экспертной системы по проектированию мостов

Компания Bentley's LEAP Bridge Enterprise более 20 лет назад разработала компьютерную экспертную систему под названием «BRIDGE LEAP», которая стала весьма широко использоваться анализа и проектирования малых железобетонных мостов в США с пролетными строениями различного типа, как обычных, так и предварительно напряженных.

Преимущества этой экспертной системы:

- быстрое получение требуемого результата, приводящее к значительной экономии трудозатрат квалифицированных инженеров;
- значительная легкость получения оптимальных решений, что приводит к разработке экономных проектов и снижает их стоимость;
- возможность быстро учитывать изменившиеся условия проектирования и требования к проекту;
- включение в базу знаний экспертной системы нормативных документов из Индии (IRC), США (AASHTO) и Канады (CHBDC), что позволяет расширить область применения экспертной системы на эти страны;
- возможность значительного облегчения решения сложных задач по проверке результатов проектирования, что легко осваивается всеми инженерами.

Недавно появилась экспертная система LEAP Bridge Steel для металлических мостов¹. Эта система позволяет выполнять проектирование, трехмерное моделирование, расчетный анализ, оценку грузоподъемности металлических мостов.

Программное обеспечение экспертной системы позволяет производить расчеты по нормам AASHTO, использовать достоинства информационного моделирования мостов (BrIM – bridge information mode, в отличие от BIM), в том числе и увеличение эффективности и повторное использование данных, полученных в процессе анализа жизненного цикла мостовых сооружений.

Эта экспертная система позволяет оптимизировать технические решения, а также облегчает нахождение компромиссных решений при использовании различных стратегий проектирования. Совместное использование экспертных систем по проектированию

¹ <https://www.businesswire.com/news/home/20140729006047/en/Bentley-Releases-LEAP-Bridge-Steel-Design-Analysis>.

железобетонных мостов (Bentley LEAP Bridge Enterprise) и по проектированию металлических мостов (LEAP Bridge Steel) позволяет инженерам-проектировщикам мостов проанализировать и сравнить различные варианты и железобетонных и металлических мостов.

Информационная модель моста (BrIM) обеспечивает информационную мобильность и гибкость процесса проектирования, а кроме того позволяет проводить трехмерное параметрическое моделирование, что обеспечивает быстрое реагирование на изменения в проекте и позволяет ускорить нахождение оптимальных вариантов проекта, что, в конечном счете, повышает производительность труда инженеров – проектировщиков мостов.

Другими словами, применение экспертной системы LEAP Bridge Steel позволяет получать надежные и эффективные результаты при проектировании широко используемых мостов. обеспечить наличие надежных и эффективных систем проектирования и проведения расчетов для ежедневно используемых металлических мостов, проектировать опоры и пролетные строения, а затем проводить комплексную проверку проектных параметров и оценивать полученную грузоподъемность, опираясь на результаты расчетного анализа.

Экспертная система LEAP Bridge Steel позволяет:

- конструировать трехмерные модели пролетных строений и опор мостовых сооружений с учетом фундаментов и оснований в одной программной среде;
- производить быстрый анализ и оценку альтернативных проектов мостового сооружения;
- в конечном счете проектировать и затем строить более эффективные мостовые сооружения;
- использовать преимущества совместимости этого программного продукта с другими продуктами фирмы Bentley.

Заключение

В данной работе рассматриваются четыре этапа жизненного цикла мостового сооружения: проектирование, изготовление, строительство (монтаж), эксплуатация. Отмечается, что этап эксплуатации является самым длительным и составляет десятки лет. Поэтому проблемам длительного обеспечения безопасности и грузоподъемности мостовых сооружений необходимо уделять особое внимание. Далее в работе рассматриваются вопросы обследований мостовых сооружений и обработки полученной информации с целью получения краткого, но емкого заключения о состоянии мостового сооружения. При этом рассмотрены несколько методик обработки информации с целью получения такого заключения. Отмечается важность автоматизация процесса оценки состояния мостового сооружения путем разработки интеллектуальной системы, которая бы позволяла хранить и обрабатывать экспертные знания в данной области.

Затем рассматриваются некоторые интеллектуальные (экспертные) системы для проектирования мостовых сооружений, причем упор делается на иностранные разработки. Рассматривается Bridge Design Expert System для проектирования пролетных строений малых и средних мостов, и ряд других экспертных систем. В качестве примера более детально описываются особенности экспертной системы «Bentley LEAP Bridge Enterprise», которая широко используется для проектирования малых железобетонных мостов в США, а также экспертной системы «LEAP Bridge Steel» той же фирмы Bentley, позволяющей выполнять проектирование, трехмерное моделирование, расчетный анализ, оценку грузоподъемности металлических мостов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почему в России мало мостов [Электронный ресурс] // Ежедневная деловая газета РБК – главные новости дня в России и в мире [сайт]. URL: <http://www.rbc.ru/newspaper/2016/05/25/573de5139a79478774746561>.
2. Крамер Е.Л. Эксплуатация автодорожных мостов // Итоги науки и техники. Серия: Автомобильные дороги. Т. 9. – М.: Транспорт, 1990. – С. 64-191.
3. Tables of Frequently Requested NBI Information [Электронный ресурс] // U. S. Department of Transportation. Federal Highway Administration [сайт]. URL: <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/britab.cfm>.
4. The Global Competitiveness Report 2016-2017 [Электронный ресурс] // World Economic Forum [сайт]. URL: http://www3.weforum.org/docs/GCR2016-2017/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2016-2017_FINAL.pdf.
5. Быстров В.А. Эксплуатация и надежность автодорожных и городских мостов // Санкт-Петербург: Изд-во С-ПБИСИ, 1993. – 129 с.
6. ОДМ 218.4.001-2008 Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс». Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [сайт]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200065669>.
7. Еремеев В.П., Ярцев И.В. Классификация дефектов автодорожных мостов // Автомобильные дороги. 1982, № 3, с. 22-23.
8. Овчинников И.Г., Ефимов П.П., Овчинников И.И., Скачков Ю.П. Развитие технических нормативов, используемых при проектировании и строительстве мостовых сооружений // Учебное пособие с грифом УМО. ПензГАСА. Пенза. 2002. 96 с.
9. Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Пути обеспечения прочности и долговечности транспортных сооружений в агрессивных условиях эксплуатации // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред, 2007. – С. 17-24.
10. Овчинников И.Г., Кононович В.И., Овчинников И.И. О проектных и строительных ошибках в мостостроении // Сборник материалов X Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (29 июня – 2 июля 2009 г.), 2009. – С. 55-56.
11. ОДМ 218.3.014-2011 Методика оценки технического состояния мостовых сооружений на автомобильных дорогах [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс». Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [сайт]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088790>.
12. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ из причин. Часть 1 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13TS417.
13. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ из причин. Часть 2 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14TS417.

14. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08SATS118.
15. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Транспортные сооружения, 2018 №1, с. 1-25. <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
16. РИА Новости: Происшествия [Электронный ресурс] // РИА Новости [сайт]. URL: <https://ria.ru/incidents/20110519/376769899.html>.
17. Интерфакс: В России [Электронный ресурс] // Интерфакс [сайт]. URL: <http://www.interfax.ru/russia/498470>.
18. Российская Газета: Происшествия [Электронный ресурс] // Российская газета [сайт]. URL: <https://rg.ru/2014/12/11/reg-cfo/bridge-anons.html>.
19. Двина-Информ: Происшествия [Электронный ресурс] // Двина-Информ [сайт]. URL: <http://www.dvinainform.ru/incidents/2015/12/11/38650.html>.
20. Овчинников И.Г. Вопросы обследования и оценки состояния эксплуатируемых мостовых сооружений // Проблемы развития транспортных коммуникаций. Проектирование, строительство, эксплуатация. Научно-технический альманах, 1996 – №2. – С. 26-29.
21. Нигаматова О.И., Овчинников И.Г. Международный опыт применения экспертных систем для оценки состояния мостовых сооружений // Интернет-журнал «Наукоедение», 2016. – Т. 8 – №1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN116.pdf>.
22. Нигаматова О.И., Овчинников И.Г. Методика оценки технического состояния мостовых конструкций в условиях неопределенности // Строительство и экология: теория, практика, инновации: материалы I Международной научно-практической конференции. – Челябинск: Издательство «ПИРС», 2015. – 308 с. С. 250-251.
23. Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Применение теории нечетких множеств к оценке состояния мостовых сооружений // Дороги России 21 века, 2009. – №5. – С. 92-96.
24. Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Пospelов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. М.: Радио и связь, 1992. – 256 с.
25. Пospelов Г.С. Системный анализ и искусственный интеллект. – Москва: Препринт ВЦ АН СССР, 1980. – 370 с.
26. Quillian, M.R. Semantic memory // Semantic information processing, 1968 – p. 227-270.
27. Minsky M. A Framework for Representing Knowledge // The Psychology of Computer Vision. – New York : McGraw-Hil, 1975 г. – p. 132-143.
28. Roussopoulos N. A semantic network model of data bases // TR No 104. – [б.м.]: Department of Computer Science, University of Toronto, 1976 г. – p. 105-140.
29. Hayes-Roth F., Jacobstein. N. The State of Knowledge-Based Systems // Communications of the ACM. – March 1994 г. – 6: Т. 37. – p. 27-39.
30. Rosenblatt F. Principles of neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. – New York : Spartan Books, 1962. – 176 p.

31. Овчинников И.Г. Применение экспертных систем для решения задач расчета, проектирования и оценки состояния конструкций (статья) // Строительная механика и расчет сооружений. 1991. N 3, с. 87-93.
32. Овчинников И.Г., Перекрестов В.А. Экспертные системы в задачах строительной механики // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1991, № 9, с. 110-113.
33. Овчинников И.Г., Разработка экспертных систем проектирования и оценки эксплуатационного состояния мостовых конструкций // "Автомобильные дороги", 1993, № 10, с. 17-19.
34. Peter Haardt and Ralph Holst. The German Approach to Bridge Management: Current Status and Future Development (IBSMC08-008) // Transportation research board Circular October 2008 – Buffalo, New York – s. 3-5.
35. William E. Robert, Allen R. Marshall, Richard W. Shepard and Jose Aldayuz The Pontis Bridge Management System: State-of-the-Practice in in Implementation and Development http://camsys.com/pubs/pontis_implementation.pdf.
36. Rade Hajdin Kuba 4.0 The Swiss road structure management system (IBSMC08-027) // Transportation research board Circular October 2008 – Buffalo, New York – s. 47-62.
37. S.J. Kale, H.S. Chore, P.A. Dode. An Expert System Based Conceptual Design of Bridges: An Overview // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) ISSN: 2278-1684, PP: 29-32 www.iosrjournals.org.
38. Горбачева И.А., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Исследование применимости постулатов мостовой эстетики к задаче проектирования мостов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/12TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12TS417. С. 1-27.
39. Biswas M. and Welch. J.G. BDES: A Bridge Design Expert System // Engineering with computers, 1987. 2, 125-136.
40. Spenser W.J., Atkins R.M., Podlaha P. The development of an expert system for the preliminary design of bridges // Civil Engineering Systems Volume 6, 1989 – Issue 1-2, p. 51-57.
41. Miles J.C., Moore C.J. An expert system for the conceptual design of brisges // Topping. BHV (ed), AI Techniques and Applications for Civil and Structural Engineers. CIVIL-COMP Press, Edinburg, 1989 p., 171-176.
42. Choi. C.K. and Choi I.H. An expert system for selecting types of bridges // Computers and Structures, 1993, 48(2), 183-192.
43. Qiang, S., Gong, H. (1991). Expert system ES-PDLB for preliminary design of long-span bridge // Structure Engineering and Construction, Proceedings of the 3rd East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Shanghai, China, 1991, 1, 659-665.
44. Adeli. H., Balasubramanyam, K.V. Knowledge Based System for Design of Bridge Trusses // Journal of Computing in Civil Engineering, 1988, 2(1), p. 1-20.

Nigamatova Olga Ivanovna

Ural state university of railway transport, Yekaterinburg, Russia
E-mail: olganigamatova@ya.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

Shvarts Aleksandr Yurievich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: shvartsaleksandr@gmail.com

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgeart@mail.ru

About development of intellectual systems of design and assessment of technical condition of bridge constructions. Part 1

Abstract. In this work four stages of life cycle of a bridge construction are considered: design, production, construction (installation), operation. It is noted that the operational phase is the longest and makes decades. Therefore problems of long safety and loading capacity of bridge constructions need to pay special attention. Further in work questions of inspections of bridge constructions and processing of the obtained information for the purpose of obtaining the short, but capacious conclusion about a condition of a bridge construction are considered. At the same time several techniques of information processing for the purpose of obtaining such conclusion are considered. Automation of process of assessment of a condition of a bridge construction by development of intellectual system which would allow to store and process expert knowledge in the field is noted importance.

Then some intellectual (expert) systems for design of bridge constructions are considered, and emphasis is placed on foreign developments. Bridge Design Expert System for design of flying structures of small and average bridges, and some other expert systems is considered. As an example features of the expert system "Bentley LEAP Bridge Enterprise" which is widely used for design of small reinforced concrete bridges in the USA and also the expert system "LEAP Bridge Steel" of the same Bentley allowing to carry out design, three-dimensional modeling, the settlement analysis, assessment of loading capacity of metal bridges are in more detail described.

Keywords: intellectual systems; expert systems; design of bridges; inspection of bridges; assessment of a condition of bridges; durability of bridges; safety of bridges

REFERENCES

1. RBC. (n.d.). *Why there are not enough bridges in Russia*. [online] Available at: <http://www.rbc.ru/newspaper/2016/05/25/573de5139a79478774746561> (in Russian).
2. Kramer E.L. (1990). *Ehkspluatatsiya avtodorozhnyh mostov. [Operation of road bridges.]* Moscow: Transportation, pp. 64-191.
3. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. (n.d.). *Tables of Frequently Requested NBI Information*. [online] Available at: <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/britab.cfm>.
4. World Economic Forum. (n.d.). *The Global Competitiveness Report 2016-2017*. [online] Available at: http://www3.weforum.org/docs/GCR2016-2017/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2016-2017_FINAL.pdf.
5. Bystrov V.A. (1993). *Ehkspluatatsiya i nadezhnost' avtodorozhnyh i gorodskih mostov. [Operation and reliability of road and city bridges.]* Saint-Petersburg: Publishing House of St. Petersburg, pp. 129.
6. The Kodeks Consortium. (n.d.). ОДМ 218.4.001-2008 *Methodical recommendations on the organization of inspection and testing of bridge structures on highways*. [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200065669> (in Russian).
7. Ereemeev V.P., Yarcev I.V. (1982). Classification of defects in road bridges. *Car roads*, 3, pp. 64-191. (in Russian).
8. Ovchinnikov I.G., Efimov P.P., Ovchinnikov I.I., Skachkov Yu.P. (2002). *Razvitie tekhnicheskikh normativov, ispol'zuemykh pri proektirovanii i stroitel'stve mostovykh sooruzhenij. [Development of technical standards used in the design and construction of bridge structures.]* Penza: PenzGASA, p. 96.
9. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I. (2007). Ways of ensuring the strength and durability of transport facilities in aggressive operating conditions. *Problems of strength of structural elements under the influence of loads and working media*, pp. 17-24. (in Russian).
10. Ovchinnikov I.G., Kononovich V.I., Ovchinnikov I.I. (2009). On design and construction errors in bridge construction. *Collection of materials of the X International scientific and technical conference "Actual problems of construction and construction industry"*, pp. 55-56. (in Russian). [Accessed 29 June – 2 July 2009].
11. The Kodeks Consortium. (n.d.). ОДМ 218.3.014-2011 *Methodology for assessing the technical condition of bridge structures on highways*. [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200088790> (in Russian).
12. Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Yu., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. (2017). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/01TS417.pdf> (in Russian) DOI 10.15862/13TS417.
13. Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Yu., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. (2017). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/14TS417> (in Russian) DOI 10.15862/14TS417.
14. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. (2018). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3. *Russian journal*

- of transport engineering*, [online], 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/08SATS118.
15. Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. (2018). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/05SATS118.
 16. RIA News. (n.d.). Incidents. [online] Available at: <https://ria.ru/incidents/20110519/376769899.html> (in Russian).
 17. Interfax. (n.d.). *In Russia*. [online] Available at: <http://www.interfax.ru/russia/498470> (in Russian).
 18. Russian newspaper. (n.d.). *Incidents*. [online] Available at: <https://rg.ru/2014/12/11/reg-cfo/bridge-anons.html> (in Russian).
 19. Dvinainform. (n.d.). *Incidents*. [online] Available at: <http://www.dvinainform.ru/incidents/2015/12/11/38650.html> (in Russian).
 20. Ovchinnikov I.G. (1996). Issues of survey and assessment of the state of operated bridge structures. *Scientific and technical almanac*, 2, pp. 26-29. (in Russian).
 21. Nigmatova O.I., Ovchinnikov I.G. (2016). International experience of applying expert systems for assessing the condition of bridge structures. *Naukovedenie*, [online] 1(8). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/66TVN116.pdf> (in Russian).
 22. Nigmatova O.I., Ovchinnikov I.G. (2015). Metodika ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya mostovykh konstrukcij v usloviyah neopredelennosti. [*Technique for assessing the technical condition of bridge structures under conditions of uncertainty.*] Chelyabinsk: Publishing house "PEARS", p. 308.
 23. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I. (2009). Application of the theory of fuzzy sets to the assessment of the state of bridge structures. *Roads of Russia of 21 centuries*, 5, pp. 92-96. (in Russian).
 24. Averkin A.N., Gaaze-Rapoport M.G., Pospelov D.A. (1992). Tolkovyj slovar' po iskusstvennomu intellektu. [*Explanatory Dictionary of Artificial Intelligence.*] Moscow: Radio and Communication, p. 256.
 25. Pospelov G.S. (1980). Sistemnyj analiz i iskusstvennyj intellekt. [*System Analysis and Artificial Intelligence.*] Moscow: Preprint of the Computing Center of the USSR Academy of Sciences, p. 370.
 26. Quillian M.R. (1968). Semantic memory. *Semantic information processing*, pp. 227-270.
 27. Minsky M. (1975). *A Framework for Representing Knowledge*. New York: McGraw-Hil, pp. 132-143.
 28. Roussopoulos N. (1976). A semantic network model of data bases. *Department of Computer Science, University of Toronto*, 104, pp. 105-140.
 29. Hayes-Roth F., Jacobstein. N. (1994). The State of Knowledge-Based Systems. *Communications of the ACM*, 6(37), pp. 27-39.
 30. Rosenblatt F. (1962). *Principles of neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*. New York: Spartan Books, p. 176.

31. Ovchinnikov I.G. (1991). Application of expert systems for solving problems of calculation, design and evaluation of the state of structures. *Construction mechanics and design of structures*, 3, pp. 87-93. (in Russian).
32. Ovchinnikov I.G., Perekrestov V.A. (1991). Expert systems in the tasks of structural mechanics. *Proceedings of high schools. Construction and architecture*, 9, pp. 110-113. (in Russian).
33. Ovchinnikov I.G. (1993). Development of expert systems for the design and evaluation of the operational state of bridge structures. *Car roads*, 10, pp. 17-19. (in Russian).
34. Peter Haardt, Ralph Holst (2008). The German Approach to Bridge Management: Current Status and Future Development (IBSMC08-008). *Transportation research board Circular*, pp. 3-5.
35. Camsys. (n.d.). William E. Robert, Allen R. Marshall, Richard W. Shepard, Jose Aldayuz. *The Pontis Bridge Management System: State-of-the-Practice in Implementation and Development*. [online] Available at: http://camsys.com/pubs/pontis_implementation.pdf (in Russian).
36. Rade Hajdin. (2008). Kuba 4.0 The Swiss road structure management system (IBSMC08-027). *Transportation research board Circular*, pp. 47-62.
37. Kale S.J., Chore H.S., Dode P.A. (n.d.). An Expert System Based Conceptual Design of Bridges: An Overview. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, [online] pp. 29-32. Available at: www.iosrjournals.org ISSN: 2278-1684.
38. Gorbacheva I.A., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. (2017). A study of the applicability of postulates of bridge aesthetics to the problem of designing bridges. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(4), pp. 1-27. Available at: <https://t-s.today/PDF/12TS417.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/12TS417.
39. Biswas M., Welch. J.G. (1987). BDES: A Bridge Design Expert System. *Engineering with computers*, 2, pp. 125-136.
40. Spenser W.J., Atkins R.M., Podlaha P. (1989). The development of an expert system for the preliminary design of bridges. *Civil Engineering Systems*, 1-2(6), pp. 51-57.
41. Miles J.C., Moore C.J. (1989). An expert system for the conceptual design of bridges. *CIVIL-COMP Press*, 1-2(6), pp. 171-176.
42. Choi C.K., Choi I.H. (1993). An expert system for selecting types of bridges. *Computers and Structures*, 48(2), pp. 183-192.
43. Qiang S., Gong H. (1991). Expert system ES-PDLB for preliminary design of long-span bridge. *Structure Engineering and Construction*, 1, pp. 659-665.
44. Adeli H., Balasubramanyam K.V. (1998). Knowledge Based System for Design of Bridge Trusses. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2(1), pp. 1-20.