Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering https://t-s.today

2023, Том 10, № 3 / 2023, Vol. 10, Iss. 3 https://t-s.today/issue-3-2023.html

URL: https://t-s.today/PDF/12SATS323.pdf

DOI: 10.15862/12SATS323 (https://doi.org/10.15862/12SATS323)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Применение алгоритмов нечеткой логики для прогнозирования технического состояния водопропускных труб на железной дороге

Рюмин М.Г.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Рюмин Максим Геннадьевич, e-mail: averti@bk.ru

Аннотация. Настоящая статья является частью диссертационного исследования автора в области разработки методики прогнозирования технического состояния водопропускных труб на железных дорогах с применением математического аппарата нечеткой логики.

Одной из распространённых методик оценки искусственных сооружений, является метод балльной оценки. При обследовании, каждому выявленному дефекту присваивается некоторое количество баллов. Затем количество баллов суммируется по разработанной методике и, по полученному результату делается вывод о состоянии объекта. Однако, в условиях существенной субъективности и ограниченных входных данных, вопрос прогнозирования технического состояния сооружения достаточно трудоемок.

Как дополнительный, к уже существующим методам прогнозирования технического состояния сооружения, в частности, водопропускных труб, предлагается применить метод, базирующийся на принципах нечеткой логики, являющимися обобщением нечеткой логики и теории множеств. В нечеткой логике, в отличие от классической, вместо величин истина и ложь используется величина степень истинности, принимающей любые значения из бесконечного множества от 0 до 1 включительно.

Для прогнозирования изменения состояния и определению скорости ухудшения технических характеристик водопропускной трубы, необходимо создание модели, в которой методы балльных оценок трансформируются в оценки, представляемые в терминах аппарата нечеткой логики.

В статье представлена методика применения алгоритмов нечеткой логики для прогнозирования технического состояния водопропускных труб на железных дорогах. В результате проведенных исследований, получены численные градации терма «Возраст водопропускной трубы». При ограниченных и субъективных входных данных, выраженных численно в терминах нечеткой логики — «Возраст водопропускной трубы» и «Состояние водопропускной трубы», возможно рассчитать значения терма «Скорость деградации водопропускной трубы».

Автором представлен метод прогнозирования технического состояния водопропускных труб на железной дороге, основанный на принципах нечеткой логики, строящейся на фундаментальной теории множеств. Разработанная математическая модель позволяет рассчитать время перехода сооружения из одного технического состояния в другое. Для реализации нечеткого логического вывода представленной модели используется пакет Fuzzy Logic Toolbox в программной среде MATLAB.

Ключевые слова: нечеткая логика; нечеткое множество; математическая модель; прогнозирование; водопропускные трубы; железная дорога; техническое состояние

Application of fuzzy logic algorithms for predicting the pipe-culvert technical condition on railways

Maksim G. Ryumin

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Corresponding author: Maksim G. Ryumin, e-mail: averti@bk.ru

Abstract. This article is part of the author's dissertation research in the field of developing a methodology for predicting the pipe-culvert technical condition on railways using the mathematical apparatus of fuzzy logic.

One of the common methods for assessing engineering structures is the point rating method. During the examination, each identified defect is assigned a certain number of points. Then the number of points is summed up according to the developed methodology and, based on the obtained result, a conclusion is drawn about the condition of the object. However, in conditions of significant subjectivity and limited input data, the issue of predicting the structure technical condition is quite labor-intensive.

As an addition to existing methods for predicting the structure technical condition, in particular pipe-culvert, it is proposed to apply a method based on the fuzzy logic principles, which is a generalization of fuzzy logic and set theory. In fuzzy logic, unlike classical logic, instead of the values true and false, the truth value degree is used, which takes any value from an infinite set from 0 to 1 inclusive.

To predict changes in condition and determine the deterioration rate of the technical characteristics of a pipe-culvert, it is necessary to create a model in which scoring methods are transformed into estimates presented in terms of fuzzy logic.

The article presents a methodology for using fuzzy logic algorithms to predict the pipe-culvert technical condition on railways. As a result of the research, numerical gradations of the term «pipe-culvert Age» were obtained. With limited and subjective input data, expressed numerically in terms of fuzzy logic — «pipe-culvert Age» and «pipe-culvert Condition», it is possible to calculate the values of the term «pipe-culvert Degradation Rate».

The author presents a method for predicting the technical condition of railway pipe-culverts, based on the principles of fuzzy logic, founded on fundamental set theory. The developed mathematical model makes it possible to calculate the structure transition time from one technical state to another. To implement fuzzy logical inference of the presented model, the Fuzzy Logic Toolbox package is used in the MATLAB software environment.

Keywords: fuzzy logic; fuzzy set; mathematical model; forecasting; pipe-culverts; railway; technical condition

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons "Attribution" («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons "Attribution" 4.0 Global License

Введение

Introduction

При развитии сети железных дорог, по оценкам экспертов, около половины выделяемых средств тратиться на ремонт и реконструкцию уже построенных линейных объектов, т. к. это оказывает существенное влияние на безопасность движения поездов.

При этом, важную роль в транспортной инфраструктуре отводится искусственным сооружениям, в связи с чем возникает вопрос о возможности прогнозировать возникающие изменения технического характера [1–3].

Одной из распространённых методик оценки сооружений, является метод балльной оценки. При обследовании, каждому выявленному дефекту присваивается некоторое количество баллов. Затем количество баллов суммируется по разработанной методике и, по полученному результату делается вывод о состоянии искусственного сооружения [4–7]. В реальных условиях эксплуатации, для осмотра объекта, нет возможности привлечь несколько экспертов. Поэтому, уже определенную экспертами оценку в баллах для различного рода дефектов, проводят сотрудники эксплуатирующей организации.

Для определения текущего состояния искусственного сооружения был разработаны ряд нормативных документов.

В 1991 году утверждено «Положение по оценке технического состояния и содержания искусственных сооружений на дорогах Союза ССР». В дальнейшем, в соответствии с действующими инструкциями и техническими условиями, учетом достигнутого уровня разработки и внедрения Автоматизированной информационно-аналитической содержания искусственных сооружений (АСУ ИССО), Департаментом пути и сооружений ОАО «РЖД» была принята «Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений железных дорог РФ, 2006 г.».[1] А в 2019 году, в целях повышения качества работ по оценке технического состояния и содержания искусственных сооружений железных дорог, ОАО «РЖД» утверждена «Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений ОАО «РЖД». [2] Причем количество баллов, для определения технического состояния сооружения в данных нормативах, четко определено (табл. 1).

[1] Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 14 нояб6ря 2016 г. № 2288р.

[2] Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений ОАО «РЖД»: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 01 октября 2019 года. № 2162/р / переработана взамен Инструкции от 23 декабря 2005 года ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС). — М., 2019. — 123 с.

Таблица 1 / Table 1

Нормативные документы по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железной дороге

Regulatory documents for assessing the condition and maintenance of engineering structures on the railway

Положение по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Союза ССР/ Главное управление пути МПС СССР. — М.: Транспорт, 1991, — 28 с. Regulations on assessing the condition and maintenance of engineering structures on the railways of the USSR / Main Directorate of the Railway Ministry of the USSR. — M.: Transport, 1991, — 28 p.		Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации/ Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». — М., 2006. — 120 с. Instructions for assessing the condition and maintenance of engineering structures on the railways of the Russian Federation / Department of Track and Structures of public limited company Russian Railways. — M., 2006. — 120 p.		Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений ОАО «РЖД» / Центральная Дирекция Инфраструктуры ОАО «РЖД». — М., 2019. — 123 с. Instructions for assessing the condition and maintenance of engineering structures of public limited company Russian Railways / Central Directorate of Infrastructure of public limited company Russian Railways. — M., 2019. — 123 p.	
Состояние сооружения Condition of the structure	Бальная оценка Point rating	Состояние сооружения Condition of the structure	Бальная оценка Point rating	Состояние сооружения Condition of the structure	Бальная оценка Point rating
Отличное Excellent	$4{,}50 \le К_{ББО} \le 5{,}0$ $К_{ВВО}$	Отличное Excellent	$4{,}5 \le K_{пр}^{сост\ (сод)} \le 5{,}0$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$	Отличное Excellent	$K_{пр}^{сост\ (сод)} = 5{,}00$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$
Хорошее Good	$3{,}50 \le К_{ББО} < 4{,}50$ $К_{ВВО}$	Хорошее Good	$3{,}5 \le K_{пр}^{сост\ (сод)} < 4{,}5$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$	Хорошее Good	$4{,}00 \le K_{пр}^{сост\ (сод)} < 5{,}00$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$
Удовлетворительное Satisfactory	$2{,}50 \le К_{ББО} < 3{,}50$ $К_{ВВО}$	Удовлетворительное Satisfactory	$2{,}5 \le K_{пр}^{сост\ (сод)} < 3{,}5$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$	Удовлетворительное Satisfactory	$3{,}00 \le K_{пр}^{сост\ (сод)} < 4{,}00$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$
Неудовлетворительное Unsatisfactory	$2{,}50 \le К_{ББО} < 3{,}50$ $К_{ВВО}$	Неудовлетворительное Unsatisfactory	$K_{пр}^{сост\ (сод)} < 2{,}5$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$	Неудовлетворительное Unsatisfactory	$2{,}00 \le K_{пр}^{сост\ (сод)} < 3{,}00$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$
—	—	—	—	Предотказное Pre-failure	$1{,}00 \le K_{пр}^{сост\ (сод)} < 2{,}00$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$
—	—	—	—	Неработоспособное Inoperative	$K_{пр}^{сост\ (сод)} = 0{,}00$ $К_{pr}^{sost\ (soda)}$

Составлено автором / Compiled by the author

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Входные данные для оценки технического состояния водопропускных труб ограниченны и достаточно субъективны, что делает вопрос прогнозирования технического состояния достаточно трудоемким [8].

Математический аппарат нечеткой логики

Mathematical tool of fuzzy logic

Как дополнительный, к уже существующим методам прогнозирования технического состояния сооружения, водопропускных труб в частности, предлагается применить метод, базирующийся на принципах нечеткой логики, являющимися обобщением нечеткой логики и теории множеств. В нечеткой логике, в отличие от классической, вместо величин истина и ложь используется величина степень истинности, принимающей любые значения из бесконечного множества от 0 до 1 включительно. Это позволяет моделировать процессы, изменение параметров которых произведено с низкой точностью, или в условиях существенной субъективности.

Для прогнозирования изменения состояния и определению скорости ухудшения технических характеристик водопропускной трубы, необходимо создание модели, в которой методы балльных оценок трансформируются в оценки, представляемые в терминах аппарата нечеткой логики. Создание данной модели, является одним из направлений диссертационного исследования автора в области разработки методики прогнозирования технического состояния водопропускных труб на железных дорогах с применением математического аппарата нечеткой.

Для описания нечётких множеств, следует определится с терминами и понятиями в нечёткой логике.

Нечетким множеством A, на универсальном множестве U, называется совокупность пар $(\mu_A(u), u)$, где $(\mu_A(u)$ — степень принадлежности элемента $u \in U$ нечеткому множеству A. [4]

Степень принадлежности — это число из диапазона $[0, 1]$.

Функцией принадлежности называется функция, позволяющая для произвольного элемента универсального подмножества вычислить степень его принадлежности нечеткому множеству [4].

Функция принадлежности выступает характеристикой нечеткого множества. Если обозначить через $\mu_A(x)$ степень принадлежности нечеткому множеству А, то нечетким множеством А называется множество упорядоченных пар вида:

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

$$A = \left\{ {\mu_A(x)}/{x} \right\}, \mu_A(x) \in [0,1].$$

При построении функций принадлежности с каждым нечетким множеством удобно ассоциировать некоторое нечеткое свойство, нечеткий признак или нечеткий атрибут, которые характеризуют элементы универсального множества. Методы построения функций принадлежности делятся на прямые и косвенные [9].

Прямые методы построения функций принадлежности. В прямых методах эксперты просто задают для каждого $x \in U$ значение функции принадлежности $\mu_A(x)$. Как правило, прямые методы построения функций принадлежности используются для таких свойств, которые могут быть измерены при помощи некоторой количественной шкалы [10].

Косвенные методы построения функций принадлежности. Косвенные методы применяются в тех случаях, когда отсутствуют очевидные измеримые свойства, которые могут быть использованы для построения нечетких моделей рассматриваемой предметной области. Среди косвенных методов наиболее известен так называемый *метод попарных сравнений*.

Функции принадлежности удобно задавать в параметрической форме. В этом случае задача построения функции принадлежности сводится к определению ее параметров. Обычно функции принадлежности имеют 2, 3 и 4 параметра.

Функции принадлежности могут быть — трапециевидные (класса Т), Z-образные (класса Z), S-образные (класса S), сигмоидальные функция принадлежности, П-образные функции принадлежности (класс П).

Наиболее характерным примером таких функций является *функция принадлежности класса t (треугольная).* В общем случае она может быть задана аналитически следующим выражением:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, x \le a \\ \frac{x-a}{b-a}, a \le x \le b \\ \frac{c-x}{c-b}, b \le x \le c \\ 0, c \le x \end{cases},$$

где a, b, c — некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением $a \le b \le c$.

Для описания нечетких множеств вводятся следующие понятия.

Лингвистические переменные — числовые переменные, имеющие имя, с которой связаны лингвистические описания.

Терм-множество — множество всех возможных значений лингвистической переменной.

Терм — любой элемент терм-множества. Терм задается нечетким множеством посредством функции принадлежности.

Процесс обработки данных в нечеткой логике происходит в несколько этапов (рис. 1).

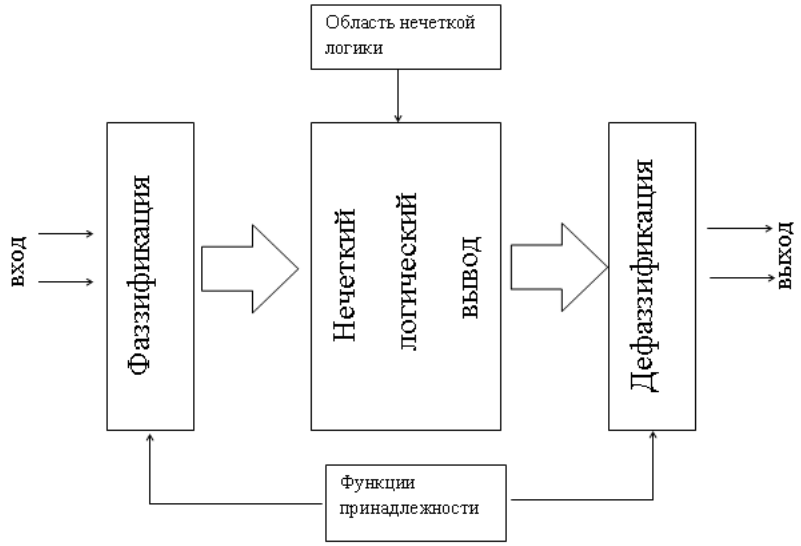

Рисунок 1. *Процесс обработки нечеткой логики (сделано автором)*

Figure 1. *Fuzzy logic process (made by the author)*

Алгоритмы нечеткого логического вывода различаются видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефаззификации. Разработаны модели нечеткого вывода Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото и др.

Часто используемым алгоритмом нечеткого вывода является алгоритм Мамдани, который и применяется в представленной методике прогнозирования технического состояния водопропускных труб.

Основные этапы нечеткого вывода (рис. 2):

1. Формирование базы правил.

2. Фаззификация входных переменных.

3. Агрегирование подусловий в правилах нечеткого вывода.

4. Активизация подзаключений в правилах нечеткого вывода.

5. Аккумулирование заключений в правилах нечеткого вывода.

6. Дефаззификация.

***Рисунок 2**. Структура нечеткого вывода (сделано автором)*

***Figure 2.** Fuzzy inference structure (done by the author)*

Рассмотрим этапы нечеткого вывода более подробно.

1. Составление нечеткой базы правил.

База правил нечеткой логики представляет собой набор правил следующего типа:

IF «утверждение» THEN «результат» (ЕСЛИ «утверждение» ТО «результат).

«Утверждение» может быть комбинацией условий и операторов AND, OR, NOT.

2. Фаззификация.

Процедура нахождения значений функции принадлежности нечетких множеств на основе обычных исходных данных.

3. Агрегирование подусловия в нечетких правилах.

Процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы.

4. Активизация подзаключений в нечетких правилах.

Степень активизации правила вычисляется на основе оценки утверждений каждого правила, состоящая из логических комбинаций нескольких утверждений. Результатом операции «AND» является минимальное значение степеней истинности предложений. Другими словами, это процедура нахождения степени истинности каждого из подзаключений.

5. Аккумулирование заключений нечетких правил.

Процедура нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных.

6. Дефазификация.

На последнем этапе нечеткого логического вывода, выходное нечеткое множество уже определено, но не может быть напрямую использовано для предоставления оператору точной информации или для управления исполнительным механизмом. Дефаззификация, это процедура нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из лингвистических переменных.

В предлагаемой модели, в качестве входных данных используется возраст водопропускной трубы и техническое состояние на момент осмотра [11]. На основании предоставленных данных делается расчёт скорости деградации объекта и прогноз времени перехода из одного технического состояния в другое (рис. 3).

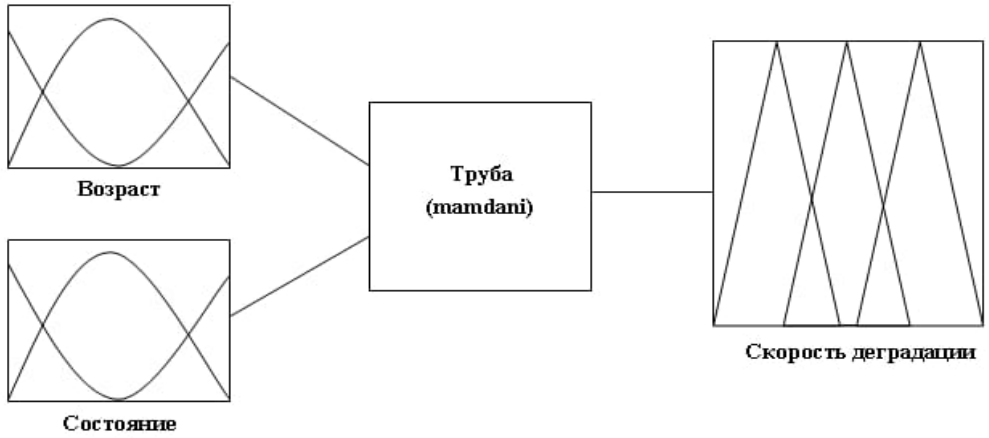

Рисунок 3. *Входные параметры для определения скорости деградации водопропускной трубы (сделано автором)*

Figure 3. *Input parameters for determining the degradation rate of a pipe-culvert (made by the author)*

Создание модели в терминах аппарата нечеткой логики

Creating a model in terms of fuzzy logic inference

Примем следующие обозначения:

«Возраст водопропускной трубы» = {«новая», «молодая», «средняя», «старая», «очень старая»};

«Состояние водопропускной трубы» = {«неработоспособное», «предотказное», «неудовлетворительное», «удовлетворительное», «хорошее», «отличное»}.

«Скорость деградации водопропускной трубы» = {«очень медленно», «медленно», «средняя», «быстро», «очень быстро»}.

Где, *лингвистические переменные*: «Возраст водопропускной трубы», «Состояние водопропускной трубы», «Скорость деградации водопропускной трубы».

Терм-множество: {«новая», «молодая», «средняя», «старая», «очень старая»}; {«неработоспособное», «предотказное», «неудовлетворительное», «удовлетворительное», «хорошее», «отличное»}; {«очень медленно», «медленно», «средняя», «быстро», «очень быстро»}.

Термы: «новая», «отлично», «очень быстро» и т. д.

Таким образом, для определения скорости деградации объекта потребуется информация о следующих параметрах: возраст и состояние водопропускной трубы.

Входные параметры — это две нечеткие лингвистические переменные: «Возраст водопропускной трубы» = {«новая», «молодая», «средняя», «старая», «очень старая»; и «Состояние водопропускной трубы» = {«неработоспособное», «предотказное», «неудовлетворительное», «удовлетворительное», «хорошее», «отличное»}.

Выходные параметры — это нечеткая лингвистическая переменная «Скорость деградации водопропускной трубы» = {«очень медленно», «медленно», «средняя», «быстро», «очень быстро»}.

Численные градации терма «Состояние водопропускной трубы» известны и могут быть описаны в лингвистических переменных математического аппарата нечеткой логики (рис. 4).

Рисунок 4. *Функция принадлежности терма «состояние водопропускной трубы» (сделано автором)*

Figure 4. *Term membership function «pipe-culvert state» (made by the author)*

Определение градаций возраста водопропускной трубы

Determination of pipe-culvert age gradations

Для определения численных градаций терма «Возраст водопропускной трубы» было рассмотрено несколько сотен водопропускных труб на железных дорогах (рис. 5). На основании проведенных исследований составлено количественное распределение и время введения в эксплуатацию (возраст) водопропускных труб. Определение степени принадлежности трубы к тому или иному возрастному диапазону

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

в дальнейшем используется в математической модели экспресс-оценки изменения технического состояния.

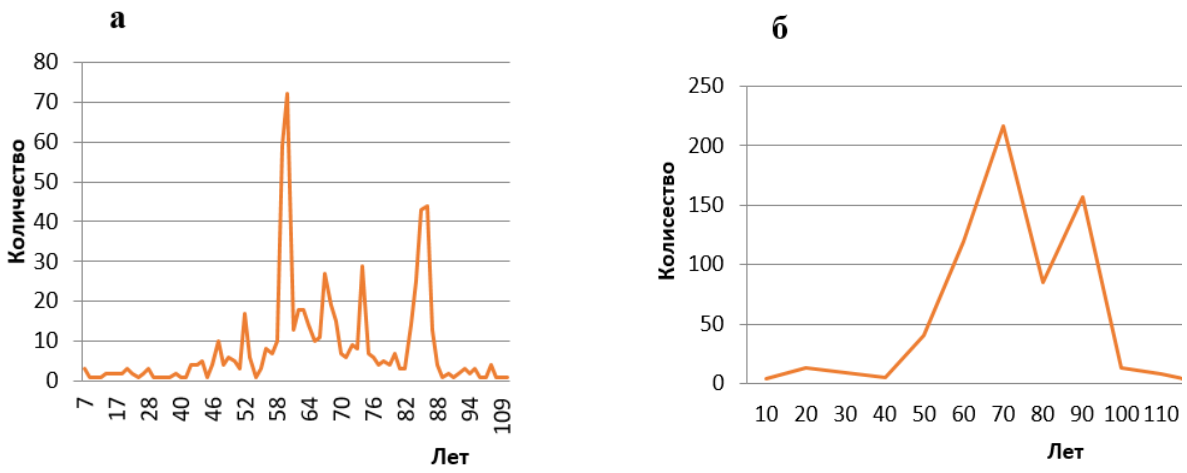

Рисунок 5. *Распределение количества водопропускных труб по времени ввода в эксплуатацию: а) степень градации с точностью до года; б) степень градации с точностью до десятка лет (разработано автором)*

Figure 5. *Distribution of the pipe-culverts number by installation time: a) degree of gradation with an accuracy of up to a year; b) degree of gradation with an accuracy of ten years (developed by the author)*

Следует отметить, что для использования в представленной модели, были рассмотрены водопропускные трубы из различных материалов: железобетонные, смешанные, каменные, бетонные, металлические, деревянные и определены границы функций принадлежности для данного терма. Данные исследований были обработаны для использования в расчётном аппарате нечеткой логики (рис. 6).

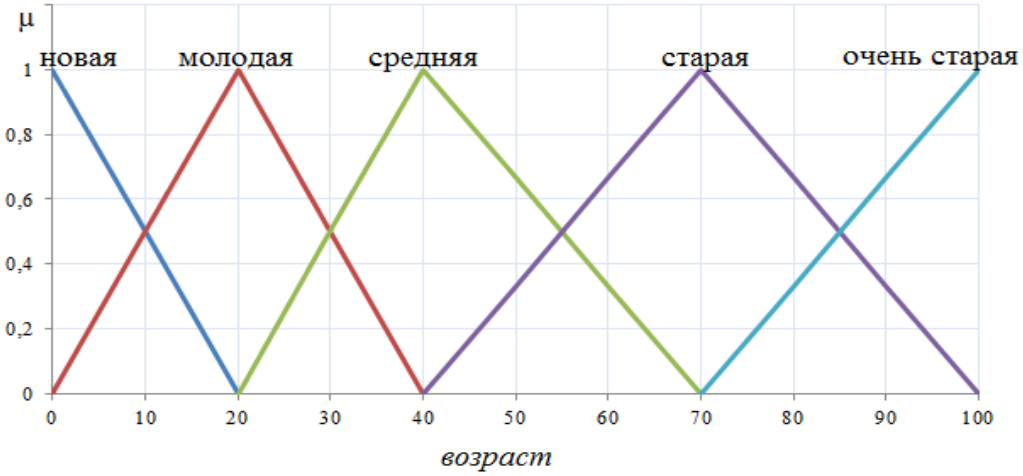

Рисунок 6. *Функция принадлежности терма — «возраст водопропускной трубы» (разработано автором)*

Figure 6. *Term membership function — «pipe-culvert age» (developed by the author)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Для удобства пользователей данные диапазоны представлены в виде таблицы (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Возрастная градация водопропускных труб для использования при расчётах в терминах аппарата нечеткой логики

Pipe-culverts age gradation for use in calculations in terms of fuzzy logic inference

Возрастная градация водопропускных труб Pipe-culverts age gradation	Возраст A1 (лет) Age A1 (years)	Возраст A2 (лет) Age A2 (years)	Возраст A3 (лет) Age A3 (years)
1	2	3	4
Новые New	0	0	20
Молодые Young	0	20	40
Средние Average	20	40	70
Старые Old	40	70	100
Очень старые Very old	70	100	100

Разработано автором / Developed by the author

Система правил и расчет скорости деградации

System of degradation rate rules and calculation

Для дальнейших расчетов и определения скорости деградации водопропускной трубы, необходимо составить систему правил в терминах нечеткой логики: ЕСЛИ/IF «утверждение», ТО/THEN «результат». Например:

ЕСЛИ/IF возраст водопропускной трубы «молодая» И/AND состояние водопропускной трубы «удовлетворительное», ТО/THEN скорость деградации «быстро»;

ЕСЛИ/IF возраст водопропускной трубы: «новая» И/AND состояние водопропускной трубы: «неудовлетворительное» ТО/THEN скорость деградации водопропускной трубы: «очень быстро»;

ЕСЛИ/IF возраст водопропускной трубы: «средняя» И/AND состояние водопропускной трубы: «удовлетворительное» ТО/THEN скорость деградации водопропускной трубы: «средняя»;

ЕСЛИ/IF возраст водопропускной трубы: «старая» И/AND состояние водопропускной трубы: «хорошее» ТО/THEN скорость деградации водопропускной трубы: «очень медленно»;

ЕСЛИ/IF возраст водопропускной трубы: «очень старая» И/AND состояние водопропускной трубы: «неудовлетворительное» ТО/THEN скорость деградации водопропускной трубы: «медленно»;

и т. д.

Для предложенной модели составлено 30 таких правил (табл. 3), которые могут представлены в лингвистических терминах нечеткой логики, как функции принадлежности терма — «Скорость деградации водопропускной трубы» (рис. 7).

Таблица 3 / Table 3

Скорости деградации водопропускной трубы

Pipe-culvert degradation rates

Возраст **Age** / **Состояние** **State**	**Новая** New	**Молодая** Young	**Средняя** Average	**Старая** Old	**Очень старая** Very old
Неработ. Inoperative	Очень быстро Very fast	Очень быстро Very fast	Очень быстро Very fast	Очень быстро Very fast	Очень быстро Very fast
Предотк. Pre-failure	Очень быстро Very fast	Очень быстро Very fast	Быстро Fast	Быстро Fast	Быстро Fast
Неуд. Unsatisfactory	Очень быстро Very fast	Быстро Fast	Быстро Fast	Средняя Average	Средняя Average
Удов. Satisfactory	Быстро Fast	Средняя Average	Средняя Average	Медленно Slowly	Медленно Slowly
Хорошее Good	Медленно Slowly	Медленно Slowly	Медленно Slowly	Медленно Slowly	Очень медленно So slow
Отл. Excellent	Медленно Slowly	Очень медленно So slow	Очень медленно So slow	Очень медленно So slow	Очень медленно So slow

Разработано автором / Developed by the author

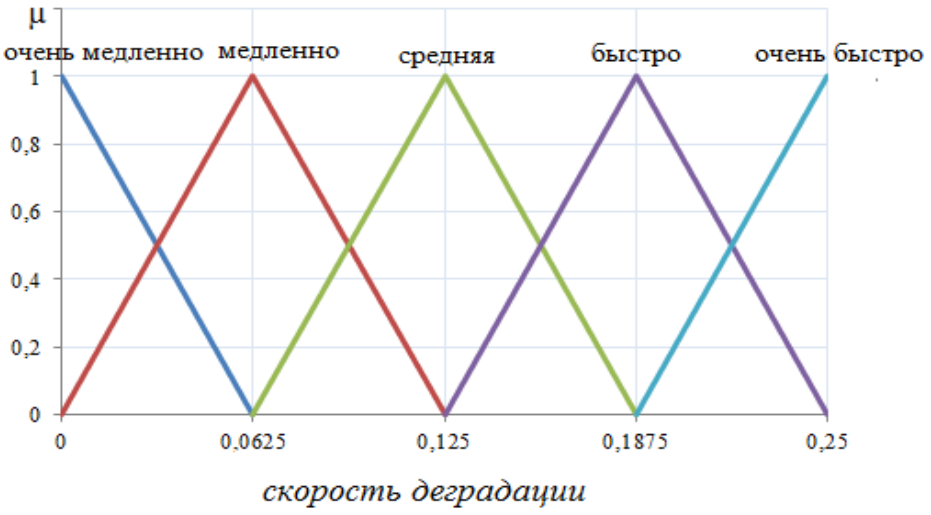

Рисунок 7. *Функция принадлежности терма — «Скорос№№ть деградации водопропускной трубы» (разработано автором)*

Figure 7. *Term membership function — «Pipe-culvert degradation rate» (developed by the author)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Пример расчета с реализацией в программном комплексе

Calculation example with implementation in the software package

Для облегчения расчетов, возможно использование лицензионных программных продуктов — Matlab, Maple, Wolfram Mathematica и других, где уже имеются установленные расчётные комплексы для применения аппарата нечеткой логики.

Рассмотрим пример.

Для реализации нечеткого логического вывода представленной модели используется пакет Fuzzy Logic Toolbox в среде MATLAB.

Водопропускная труба железобетонная, с прямоугольным очертанием свода. Отверстие 1,50х2,00 м. Полная длина трубы 11,00 м. Построена в 1961 годах. Оголовки раструбного типа. Высота насыпи — 2,33 м. Водоток сезонный — течение слева направо.

Обследование проведено в 2021 году. Приведенная бальная оценка на момент обследования $K^*_{BS} = 3{,}5$. Техническое состояние «удовлетворительное». Скорость деградации (рис. 8), т. е. приращение базовых бальных оценок в год:

$$V_{degr} = 0{,}0213 \text{ баллов/год.}$$

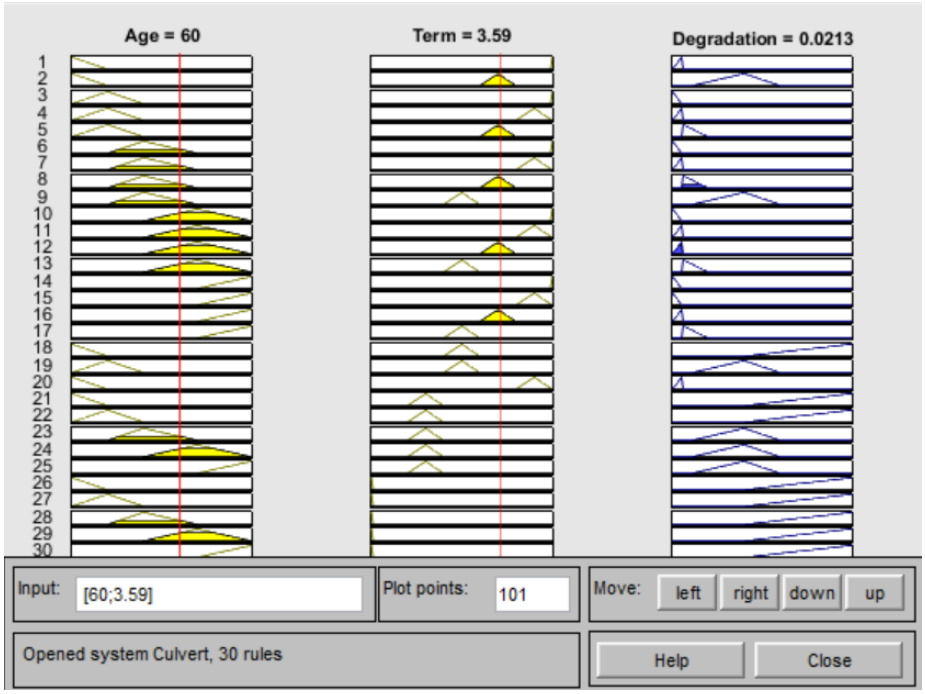

Рисунок 8. *Расчет скорости деградации водопропускной трубы в программном комплексе Matlab (сделано автором)*

Figure 8. *Pipe-culvert degradation rate calculation in the Matlab software package (made by the author)*

Определим возраст, когда состояние трубы станет неудовлетворительным:

$$T = \frac{K_{BS}^{0} - K_{BS}^{poor}}{V_{degr}} = \frac{5-3,59}{0,0213} = 66,2 \text{ года};$$

$$T^{*} = T - T_{age} = 66,2 - 60 = 6,2 \text{ года}.$$

Следовательно, ремонт необходимо произвести не позднее, чем через 6 лет и два с половиной месяца.

По результатам исследований разработан алгоритм расчёта для представленной модели, реализованный в программном комплексе среды VBA.

Для удобства пользователей предусмотрен простой в использовании интерфейс [12; 13]. Достаточно ввести данные осмотра водопропускной трубы, и в окне появятся данные о времени перехода объекта из одного технического состояния в другое. Данные результатов обследования водопропускной трубы автоматически записываются в электронный журнал (рис. 9).

A	B	C	D	E	F	G	H	I
Программа								
Код сооружения	**Тип сооружения**	**КМ**	**Пикет**	**Год постройки**	**Оценка**	**Год обследования**	**Скорость деградации**	**Время перехода**
1	ВТ	12	ПК-15	1956	4,2	2021	0,038	1

Рисунок 9. *Электронный журнал обследования водопропускной трубы с рассчитанным временем изменения технического состояния (разработано автором)*

Figure 9. *Pipe-culvert inspection log with the calculated time of change in technical condition (developed by the author)*

Применяемая модель может быть использована, как экспресс-метод оценки технического состояния водопропускных труб на железных дорогах [14; 15].

Выводы и перспективы

Conclusions and future directions

В данной работе представлена математическая модель, созданная на расчетном аппарате нечёткой логики, для прогнозирования изменения технического состояния инженерных сооружений. Разработан программный комплекс для простоты и удобства её реализации.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

В результате, возможно решить следующие задачи:

- построить кривую вероятности ухудшения эксплуатационных характеристик в зависимости от срока эксплуатации;
- спрогнозировать вероятность возникновения аварийной ситуации и её характер;
- назначить обоснованный срок проведения следующего обследования, руководствуясь кривой вероятности ухудшения эксплуатационных характеристик;
- принять обоснованное решение о необходимости ремонта или реконструкции на основе анализа вероятности возникновения аварийной ситуации;
- спрогнозировать состояние объекта после ремонта и вероятность ухудшения её эксплуатационных характеристик в зависимости от срока эксплуатации.

Модель нарастания количества дефектов верифицируется по результатам проведенных инспекций. Будучи верифицирована один раз, в дальнейшем модель может быть использована для прогнозирования технического состояния трубы в будущем.

Принадлежность к состоянию «Неудовлетворительное» может быть трансформирована далее в вероятностную функцию для всего периода эксплуатации сооружения.

Полученные и обработанные данные о состоянии большого числа сооружений могут быть использованы при создании нормативной документации.

В проведенном исследовании установлено, что в условиях низкой точности и субъективности результатов обследования водопропускных труб на железных дорогах, моделировать процессы ухудшения технических характеристик и делать экспресс-прогноз таких изменений, позволяет метод нечеткой логики, базирующийся на понятии нечеткого множества. Предложенная методика позволяет планировать сроки обследования и ремонта, что существенно повышает безопасность содержания искусственных сооружений на железных дорогах и снизит стоимость владения объектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черных, В.К.** Прогнозирование долговечности многоэлементных конструкций мостов / В.К. Черных, И.И. Овчинников // Техническое регулирование в транспортном строительстве. — 2020. — № 2. — С. 103–109. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42801550. — EDN BVGSKN. (дата обращения: 28.08.2023).
2. **Церех, С.Г.** Прогнозирование поведения водопропускных труб с учетом деформаций и повреждений эксплуатационного характера / С.Г. Церех, И.Г. Овчинников. — DOI https://doi.org/10.15593/24111678/2022.03.09 // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2022. — № 3. — С. 79–87. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49539302. — EDN PZYYHI. (дата обращения: 28.08.2023).
3. **Варламова, Т.В.** К вопросу обеспечения надежности железобетонных водопропускных труб / Т.В. Варламова, А.Д. Шаклина // Техническое регулирование в транспортном строительстве. — 2016. — № 5. — С. 39–43. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27687198. — EDN XHWVYH. (дата обращения: 28.08.2023).
4. **Караханян, В.Б.** Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям / В.Б. Караханян, И.И. Овчинников, М.А. Баев [и др.]. — DOI https://doi.org/10.15862/12SATS220 // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 2. — С. 12SATS220. — URL: https://t-s.today/12SATS220.html. — EDN EZHHZC. (дата обращения: 28.08.2023).
5. **Кашеварова, Г.Г.** Экспертная система для практической диагностики строительных конструкций / Г.Г. Кашеварова, Ю.Л. Тонков. — DOI https://doi.org/10.22337/2077-9038-2022-1-85-91 // Academia. Архитектура и строительство. — 2022. — № 2. — С. 85–91. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48680056. — EDN FMVXWR. (дата обращения: 28.08.2023).
6. **Кашеварова, Г.Г.** Современные интеллектуальные и цифровые технологии в технической диагностике строительных объектов / Г.Г. Кашеварова, С.В. Максимова, Ю.Л. Тонков, А.Е. Семина // Вестник Приволжского территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: сборник научных трудов. Том Выпуск 24 / Нижний Новгород: ННГАСУ, 2021. — С. 100–106. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49738178. — EDN KJAAWW. (дата обращения: 28.08.2023).
7. **Логинова, О.А.** Ключевые факторы при определении вида ремонта железобетонной водопропускной трубы / О.А. Логинова, А.А. Кладов // Техника и технология транспорта. — 2022. — № 4. — С. 25. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49938600. — EDN SCRKYC. (дата обращения: 28.08.2023).
8. **Яшнов, А.Н.** Алгоритмизация прогнозирования изменения технического состояния искусственных сооружений на железных дорогах / А.Н. Яшнов, М.Г. Рюмин // Наука и техника транспорта. — 2023. — № 2. — С. 97–101. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54092260. — EDN MCQFFG. (дата обращения: 28.08.2023).
9. **Штовба, С.Д.** Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.
10. **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. — Пер. с англ. А.Г. Подвесовский, Ю.В. Тюменцев. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. — 978 с.
11. **Kudryavtsev, S.** Dynamic Characteristics of Transport Structures / S. Kudryavtsev, V. Stefanyuk, N. Sokolova. — DOI https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.056 // Transportation Research Procedia. — 2021. — Т 54. — С. 129–135. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521002209. — EDN FIMUXM. (дата обращения: 28.08.2023).
12. **Poliakov, V.** The artificial intelligence and optimization of multibody dynamical system with predicted dynamic behavior / V. Poliakov. — DOI https://doi.org/10.1109/CSCC49995.2020.00009 // 24th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC), Chania, Greece, 19–22 July 2020 / Chania: IEEE, 2020. — С. 1–4. — URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9402403. — EDN HEQJDY. (дата обращения: 28.08.2023).

13. **Muradian, K.O.** Computer Modelling of the Structural Materials Structure to Improve their Strength Characteristics / K.O. Muradian, O.V. Smirnova, I.V. Nesterov, V.I. Kondrashchenko. — DOI https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928443 // 2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), Sochi, Russia, 2019 / Под ред. Vatin N., Borodinecs A., Teltayev B. Сочи: IEEE, 2019. — С. 428–431. — URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8928443. — EDN SIKVSQ. (дата обращения: 28.08.2023).

14. **Ryumin, M.G.** Forecast for Terms of Culvert Inspection and Repair / M.G. Ryumin, E.S. Shepitko. — DOI https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.095 // Procedia Engineering. — 2017. — Т 189. — С. 598–604. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817322208. — EDN XMYQFO. (дата обращения: 28.08.2023).

15. **Nesterov, I.** Application of Soft Computing in the Engineering Structures Technical Condition Forecast / I. Nesterov, M. Ryumin, E. Badina. — DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_39 // Proceedings of EECE 2020. EECE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 150 / Кам: Springer, 2021. — С. 402–410. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72404-7_39. — EDN JYNHBB. (дата обращения: 28.08.2023).

Сведения об авторах:
Рюмин Максим Геннадьевич — старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: averti@bk.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=574935

Статья получена: 28.08.2023. Принята к публикации: 11.09.2023. Опубликована онлайн: 25.09.2023.

REFERENCES

1. Chernykh V.K., Ovchinnikov I.I. Prediction of Durability of Multi-Element Bridge Structures. *Technical regulation in transport construction*. 2020; (2): 103–109. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42801550 (accessed 28th August 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

2. Tsereh S.G., Ovchinnikov I.G. Forecasting the Behavior of Culverts Taking into Account Deformations and Operational Damages. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2022; (3): 79–87. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.15593/24111678/2022.03.09.

3. Varlamova T.V., Shaklina A.D. To the Question of The Reliability of Reinforced Concrete Culverts. Technical regulation in transport construction. 2016; (5): 39–43. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27687198 (accessed 28th August 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

4. Karakhanyan V.B., Ovchinnikov I.I., Baev M.A., Ovchinnikov I.G. Features of the progressive destruction of bridge structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020; 7(2): 12SATS220. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.15862/12SATS220.

5. Kashevarova G.G., Tonkov Y.L. Expert System for Practical Diagnostics of Building Structures. *Scientific Journal "Academia. Architecture and Construction"*. 2022; (2): 85–91. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.22337/2077-9038-2022-1-85-91.

6. Kashevarova G.G., Maksimova S.V., Tonkov Yu.L., Semina A.E. [Modern intelligent and digital technologies in technical diagnostics of construction projects]. In: [Bulletin of the Volga Territorial Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences: collection of scientific works. Volume Issue 24]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering; 2021. p. 100–106. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49738178 (accessed 28th August 2023). (In Russ.).

7. Loginova O.A., Kladov A.A. Key Factors in Determining the Type of Repair of Reinforced Concrete Culvert. Electronic Scientific Publication (ESP) — "Technique and Technology of Transport". 2022; (4): 25. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49938600 (accessed 28th August 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

8. Yashnov A.N., Ryumin M.G. Forecasting Algorithmisation of Change in Technical Condition of Railway Artificial Structures. Science and Technology in Transport. 2023; (2): 97–101. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54092260 (accessed 28th August 2023). (In Russ., abstract in Eng.).

9. Shtovba S.D. Proyektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [Design of fuzzy systems using MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom; 2007. (In Russ.).
10. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Berlin: Springer-Verlag; 2001. (In Eng.).
11. Kudryavtsev S., Stefanyuk V., Sokolova N. Dynamic Characteristics of Transport Structures. *Transportation Research Procedia*. 2021;54: 129–135. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.056.
12. Poliakov V. The artificial intelligence and optimization of multibody dynamical system with predicted dynamic behavior. In: 24th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC), Chania, Greece, 19-22 July 2020. Ханья: IEEE; 2020. p. 1–4. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/9402403 (accessed28th August 2023). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1109/CSCC49995.2020.00009.
13. Muradian K.O., Smirnova O.V., Nesterov I.V., Kondrashchenko V.I. Computer Modelling of the Structural Materials Structure to Improve their Strength Characteristics. In: 2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), Sochi, Russia, 2019. Sochi: IEEE; 2019. p. 428–431. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/8928443 (accessed28th August 2023). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928443.
14. Ryumin M.G., Shepitko E.S. Forecast for Terms of Culvert Inspection and Repair. Procedia Engineering. 2017; 189: 598–604. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.095.
15. Nesterov I., Ryumin M., Badina E. Application of Soft Computing in the Engineering Structures Technical Condition Forecast. In: Vatin, N., Borodinecs, A., Teltayev, B. (eds). Proceedings of EECE 2020. EECE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 150. Cham: Springer; 2021. p. 402–410. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72404-7_39 (accessed28th August 2023). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_39.

Information about the authors:
Maksim G. Ryumin — Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: averti@bk.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=574935

Submitted: 28th August 2023. Revised: 11th September 2023. Published online: 25th September 2023.