



УДК 621.436.052:629

Асламова Вера Сергеевна,

д. т. н., профессор кафедры «Техносферная безопасность»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(914)904-58-09, e-mail: aslamovav@yandex.ru

Тайван Тунгалаг,

ведущий инженер локомотивного депо АО Улан-Баторской железной дороги,
e-mail: tai11mn@yahoo.com

Рущ Елена Анатольевна,

д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и экология»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(983)416-50-07, e-mail: lrush@mail.ru

Каргапольцев Сергей Константинович,

д. т. н., профессор, проректор, Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(395)2638304, e-mail: kck@irgups.ru

Гозбенко Валерий Ерофеевич,

д. т. н., профессор кафедры «Математика»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(914)951-60-21, e-mail: gozbenko@yandex.ru

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ЗАМЕНЫ ВОЗДУШНОГО ФИЛЬТРА ТЕПЛОВОЗА

V. S. Aslamova, Tungalag Taivan, E. A. Rush, S. K. Kargapol'tsev, V. E. Gozbenko

REGRESSION MODEL OF AUTOMATED CONTROL OF TIMELINESS OF REPLACING THE DIESEL LOCOMOTIVE'S AIR FILTER

Аннотация. В статье выполнен анализ литературных источников и опыта четырехлетней эксплуатации тепловоза серии 2ТЭ116УМ № 016 на Улан-Баторской железной дороге (Монголия). Результаты анализа показали, что турбокомпрессор не исчерпывает свой ресурс эксплуатации до очередного планово-предупредительного ремонта, так как из-за наступления такого явления, как помпаж, нарушается устойчивость его работы. Установлено, что основными причинами появления помпажа являются: срыв потока со стенок диффузора, и/или с лопаток направляющего аппарата, и/или с лопаток рабочего колеса. Эти отклонения от рабочего режима вызваны различными факторами, главным из которых является загрязнение воздушного фильтра. Выполнен анализ динамики наступления помпажа, проведения ревизии и замены воздушного фильтра. Получена эмпирическая зависимость расхода воздуха от степени повышения давления в турбокомпрессоре. Для дальнейшей автоматизации контроля безпомпажной работы турбокомпрессора при режиме функционирования тепловоза, задаваемого контроллером, исследованы зависимости помпажного пробега от температуры окружающей среды, степени повышения давления и давления на входе турбокомпрессора, зависящего от степени загрязнения воздушного фильтра. Были обработаны исходные данные с контроллера в пакете Statgraphics Plus и получены адекватные регрессионные уравнения для определения величины пробега до начала помпажа от каждого параметра в отдельности и от совокупного влияния всех параметров. Коэффициенты детерминации полученных регрессионных зависимостей составляют 92–99 %.

Ключевые слова: регрессионная модель, помпаж, турбокомпрессор, расход, пробег, степень повышения давления, воздушный фильтр, автоматизированный контроль.

Abstract. The article analyzes the literature sources and experience of four-year operation of the diesel locomotive of series 2TE116UM № 016 on the Ulan-Bator railway (Mongolia). The results of the analysis showed that the turbocharger does not exhaust its service life until regular preventive maintenance, because due to the onset of such a phenomenon as surging, stability of its operation is disrupted. It has been established that the main causes of surge appearance are: flow failure from the walls of the diffuser, and/or from the vane blades, and/or from the impeller blades and others. These deviations from the operating conditions are caused by various factors, the main one of which is the contamination of the air filter. The dynamics of the onset of surging, the revision and the replacement of the air filter are analyzed. An empirical dependence of the air flow on the degree of pressure increase in the turbocharger is obtained. In order to automate the control of the turbocharger's unattended operation in the diesel locomotive operation mode set by the controller, the dependence of the pumping distance on the ambient temperature, the degree of pressure increase and the pressure at the inlet of the turbocharger, depending on the degree of air filter contamination, was investigated. The source data from the controller was processed in the Statgraphics Plus package and adequate regression equations were obtained to determine the mileage before the surge from each parameter individually and from the combined effect of all parameters. The coefficients of determination of the regression dependencies obtained are 92–99%.

Keywords: regression model, surging, turbocharger, flow, mileage, degree of pressure increase, air filter, automated control.

Введение

Огромное значение для разработки автоматизированных процессов управления функционированием сложных систем играет математический анализ экспериментальных данных с последующей их аппроксимацией. Проведение аппроксимации с одновременной статистической обработкой

данных зачастую обеспечивается методами регрессионного анализа [1]. Из всего множества функций, зависящих от входных переменных и внешних воздействий, только функция регрессии имеет минимальную ошибку прогноза выходной переменной исследуемого объекта. Поэтому регрессионные модели широко применяются в



различных производственно-экономических и образовательных системах [1–8]. Разработка регрессионных моделей помогает избежать полного перебора вариантов при проектировании и выборе оптимальных режимов работы оборудования и технологических процессов за счет использования информационных технологий. Чтобы получить достаточно хорошее приближение к реально протекающему процессу, требуется использование более сложной многофакторной регрессионной модели, которую рассмотрим ниже.

Динамика помпажа турбокомпрессора, графики ревизии и замены фильтров

В процессе эксплуатации тепловозов воздушные фильтры дизеля постепенно загрязняются. При этом уменьшается площадь их проходного сечения, что приводит к снижению расхода воздуха через дизель [10]. Расходная характеристика смещается в зону меньших расходов, повышается температура выхлопных газов. Увеличение температуры газов не может компенсировать уменьшение расхода воздуха газов, поэтому частота вращения турбины и компрессора снижается. В результате повышения давления наддува расход воздуха уменьшается, а режим совместной работы турбокомпрессора и двигателя перемещается в точку на другой гидравлической характеристике, расположенной ближе к границе помпажа.

Изменение расхода воздуха через двигатель приводит к изменению индикаторного КПД и частоты вращения вала двигателя. При этом изменяется и КПД турбокомпрессора, что сказывается на экономичности рабочего процесса двигателя.

Если при загрязнении воздушных фильтров поддерживать постоянную частоту вращения вала дизеля за счет увеличения подачи топлива, то это приведет к еще большему увеличению температуры выхлопных газов. В этом случае расходная характеристика дизеля и линии рабочих режимов турбокомпрессора будут располагаться ближе к границе помпажа [11].

В работах [12–16] выполнена оценка влияния снижения давления наддува на выходные параметры работы тепловозного дизеля, а также воздействия степени загрязнения воздушных фильтров на устойчивость работы турбокомпрессора тепловоза.

Результаты анализа эксплуатационных данных показали, что турбокомпрессор не исчерпывает свой ресурс эксплуатации до очередного планово-предупредительного ремонта из-за наступления помпажа, нарушающего устойчивость его работы (рис. 1).

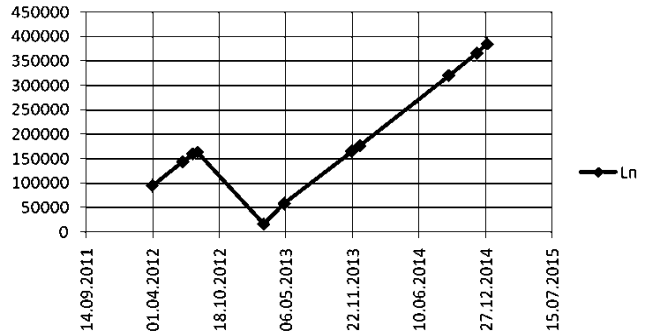


Рис. 1. Динамика наступления помпажа при пробеге L_n

Установлено, что основными причинами появления помпажа являются: срыв потока со стенок диффузора, и/или с лопаток направляющего аппарата, и/или с лопаток рабочего колеса; а также неустойчивость течения в безлопаточном пространстве; автоколебания воздуха в системе компрессор – продувочно-наддувочный ресивер. Отклонения от рабочего режима вызваны различными факторами, основным из которых является загрязнение воздушного фильтра.

Как видно из рис. 1, помпаж наступал через 0,5–3 месяца после ревизии воздушного фильтра, через 4,5–6,5 месяцев после замены фильтра.

Для предотвращения появления помпажа работники Улан-Баторской железной дороги пытались как можно чаще проводить ревизию (рис. 2), или замену (рис. 3) воздушного фильтра тепловоза, что приводило к большим материальным затратам.

С целью выявления количественного влияния технологических параметров турбокомпрессора тепловоза на пробег, при котором наступает помпаж, и разработки эмпирических моделей для автоматизированного контроля безпомпажного пробега выполнена статистическая обработка экспериментальных данных в пакете Statgraphics Plus.

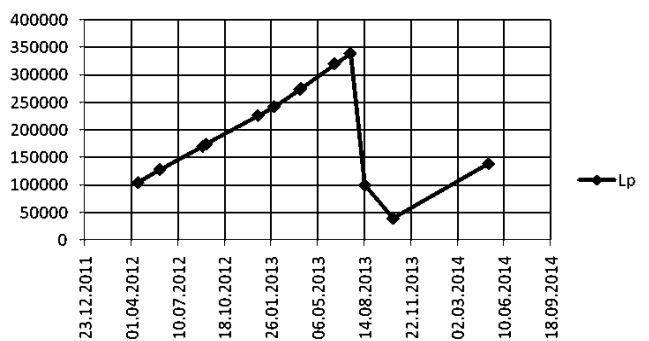


Рис. 2. Динамика проведения ревизии воздушного фильтра при пробеге тепловоза L_p

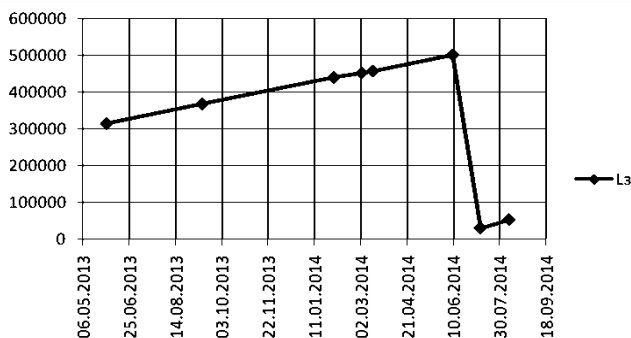


Рис. 3. Динамика замены воздушного фильтра

Обозначим: T – температура воздуха окружающей среды, °C; p_z – давление перед турбокомпрессором, Па; π_k – степень повышения давления; G – расход воздуха, кг/с. С увеличением пробега L теплового гидравлическое сопротивление воздушного фильтра возрастает вследствие его загрязнения и растет величина p_z . Для предотвращения помпажа выполняют замену или ревизию фильтра, в процессе которой его подвергают очистке, что приводит к уменьшению величины p_z . Поэтому длину пробега теплового L_{np} , при которой возник помпаж, вычисляли по формуле

$$L_{np} = L - L_{\phi}, \quad (1)$$

где L – от начала эксплуатации, км; L_{ϕ} – пробег, при котором была выполнена ревизия или замена фильтра.

Расход воздуха зависит от величины π_k и описывается линейной регрессией (2) (рис. 4). Коэффициенты достоверности регрессии (2): коэффициенты детерминации R^2 и Дарбина–Уотсона DW , среднеквадратическая σ и абсолютная Δ ошибки приведены в табл. 1.

$$G = -0,9188 + 2,2345\pi_k. \quad (2)$$

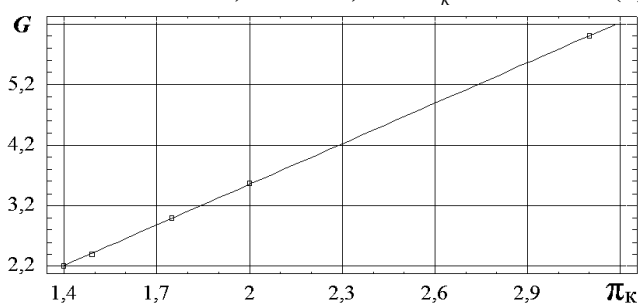


Рис. 4. Зависимость расхода воздуха G от степени повышения давления π_k в турбокомпрессоре

На рис. 5 приведено сопоставление экспериментальных данных G_s с результатами расчета G_p по формуле (2). Коэффициенты достоверности регрессии (2) приведены в табл. 1.

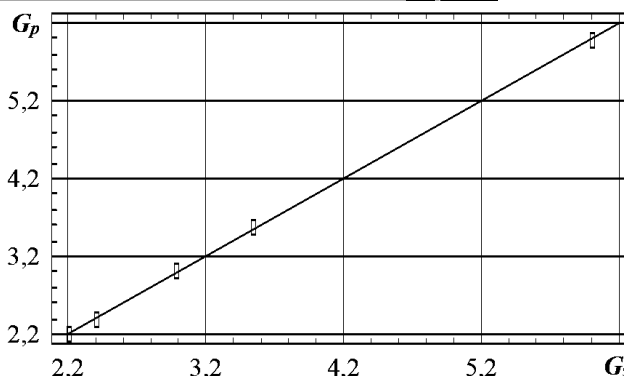


Рис. 5. Сопоставление рассчитанных по формуле (1) значений G_p с экспериментальными значениями G_s

Исследуя влияние каждого параметра отдельно на величину безпомпажного пробега, получили одномерные регрессии, коэффициенты достоверности которых приведены в табл.

Зависимость L_{np} от T носит квадратичный характер (см. рис. 6).

$$L_{np} = 106674,0 - 1674,98T - 152,46T^2 \quad (3)$$

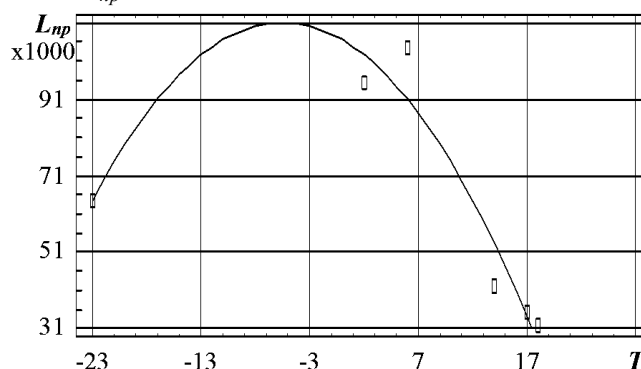


Рис. 6. Зависимость помпажного пробега от температуры воздуха

Наибольшее значение L_{np} можно найти из необходимого условия максимума функции:

$$\frac{\partial L_{np}}{\partial T} = 1674,98 - 2 \cdot 152,46 \cdot T = 0 \rightarrow \max L_{np}$$

$$\text{при } T = \frac{1674,98}{304,92} \approx 5,49 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Коэффициенты достоверности регрессии (3) даны в табл. 1. О точности найденной регрессии можно судить по рис. 7, на котором приведено сопоставление рассчитанных по формуле (3) значений пробега L_{np} (ось абсцисс) с экспериментальными L_{np} (ось ординат).

Зависимость L_{np} от π_k – параболическая (см. рис. 8). Коэффициенты достоверности регрессии (4) представлены в табл. 1.

$$L_{np} = -5,130 \cdot 10^6 + 3,810 \cdot 10^6 \pi_k - 693361,0 \pi_k^2. \quad (4)$$

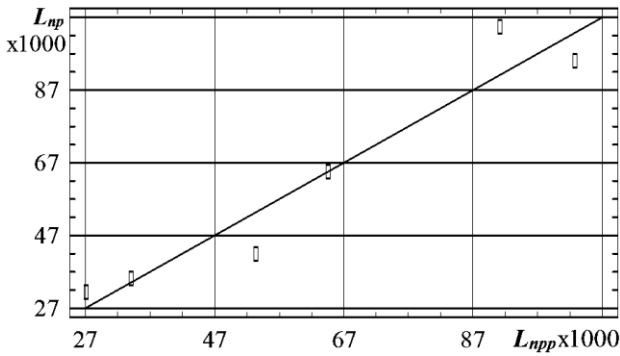


Рис. 7. Сопоставление рассчитанных по формуле (13) значений L_{np} с экспериментальными L_{np}

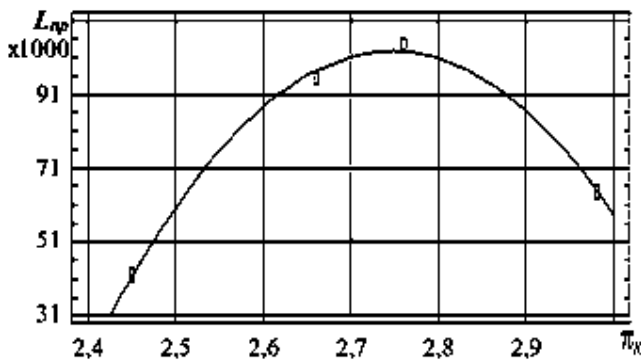


Рис. 8. Зависимость L_{np} от π_k

Из необходимого условия существования экстремума функции найдем, что наибольшее значение L_{np} достигается при $\pi_k = 2,747$, т. к.

$$\frac{\partial L_{np}}{\partial \pi_k} = 3809610,0 - 2 \cdot 693361 \cdot \pi_k = 0 \rightarrow \max L_{np}$$

$$\text{при } \pi_k = \frac{3809610}{1386722} \approx 2,747.$$

О точности найденной регрессии можно судить по рис. 9, на котором приведено сопоставление рассчитанных по формуле (4) значений пробега L_{np} (ось абсцисс) с экспериментальными L_{np} (ось ординат).

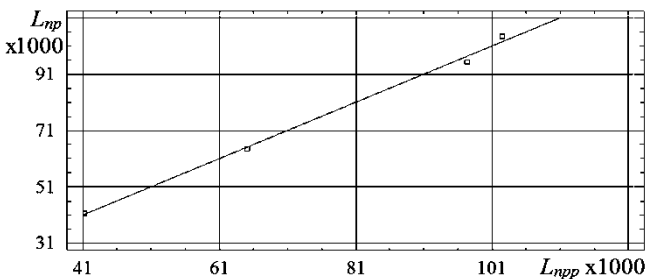


Рис. 9. Сопоставление рассчитанных по формуле (4) значений L_{np} с экспериментальными L_{np}

Регрессионная зависимость $L_{np} \times 1000$ от параметра p_z – квадратичная (см. рис. 10):

$$L_{np} = -2,91352 \cdot 10^6 + 39,29 \cdot p_z - 0,00013 p_z^2. \quad (5)$$

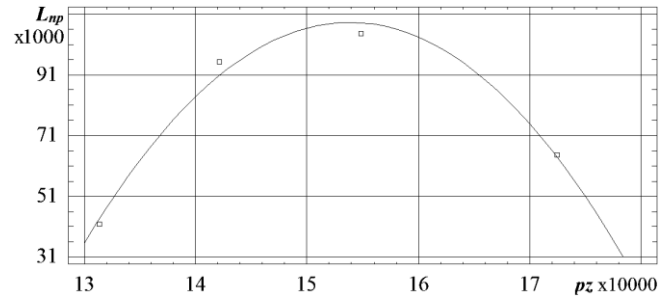


Рис. 10. Зависимость L_{np} от p_z

Коэффициенты достоверности регрессии (5) приведены в табл. 1. На рис. 11 приведено сопоставление рассчитанных по формуле (5) значений пробега L_{np} (ось абсцисс) с экспериментальными данными L_{np} (ось ординат).

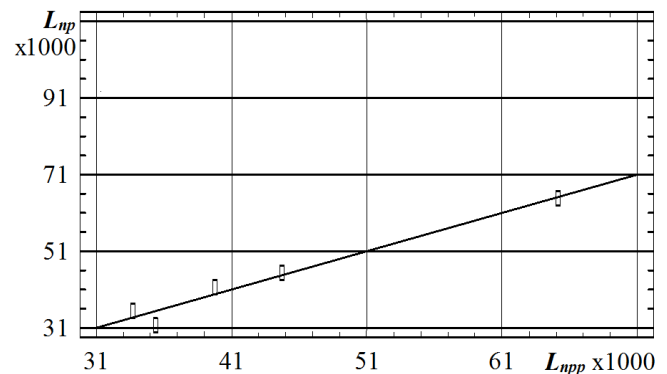


Рис. 11. Сопоставление рассчитанных по формуле (5) значений L_{np} с экспериментальными L_{np}

Характерной чертой современного этапа управления железнодорожным транспортом является автоматизация процессов производства и управления. Она достигается за счет создания автоматизированных и автоматических систем машин, робототехнических комплексов, создания автоматизированных рабочих мест специалистов и руководителей с использованием информационных технологий для анализа процессов и машин, выбора вариантов автоматизации [15, 16]. Компьютерные технологии позволят эффективно применять моделирование и программные комплексы в процессе управления тепловозами.

Многопараметрическое уравнение линейной регрессии, описывающее совместное влияние рассматриваемых параметров, имеет вид

$$L_{np} = -43418,4 + 43607,8 \cdot \pi_k^2 - 1,172 p_z - 154,837 T^2. \quad (6)$$

Из формулы видно, что с увеличением параметров p_z и T помпаж наступает быстрее (L_{np} уменьшается), а при росте параметра π_k значение L_{np} возрастает. Коэффициенты достоверности регрессии (6) даны в табл. 1.



Т а б л и ц а 1

Коэффициенты достоверности регрессий

Номер формулы	$R^2, \%$	DW	σ	Δ
(2)	99,99	2,74	0,0156	0,0113
(3)	92,16	1,54	11392,60	10859,30
(4)	99,67	1,45	2917,77	21744,0
(5)	98,46	1,45	6181,34	19119,70
(6)	96,99	3,26	7231,95	4331,31

Полученное уравнение (6) позволит в процессе эксплуатации тепловоза контролировать величину безпомпажного пробега, которая не должна превышать значения L_{npp} , полученного по формуле (6), и точно описывает 99,26 % исходных данных.

О точности найденной регрессии можно судить по рис. 12, на котором приведено сопоставление рассчитанных по формуле (6) значений пробега L_{npp} (ось абсцисс) с экспериментальными L_{np} (ось ординат).

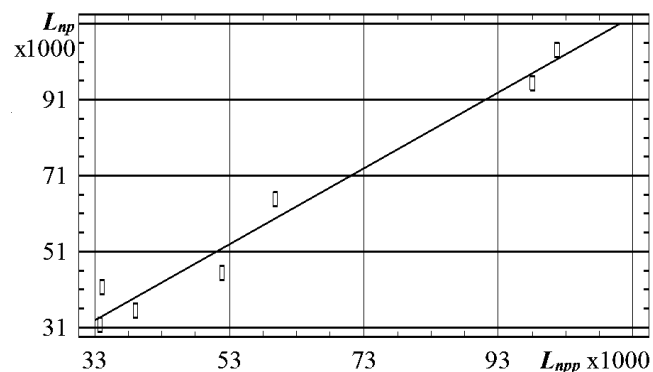


Рис. 12. Сопоставление рассчитанных по формуле (6) значений L_{npp} с экспериментальными L_{np}

Таким образом, полученная многопараметрическая линейная регрессия использована при разработке автоматизированного программного модуля [17], контролирующего величину пробега тепловоза и не допускающего появления помпажа в результате своевременной замены воздушного фильтра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Повышение безопасности дорожного движения в 2013 – 2020 годах : федерал. целевая программа : утв. постановлением Правительства РФ от 3 октября 2013 г. N 864. М., 2013.
2. Бурков В.Н., Кондратьев В.Д., Щепкин А.В. Механизмы повышения безопасности дорожного движения. М. : ЛИБРОКОМ, 2012. 208 с.
3. Экспертная система мониторинга и обеспечения безопасности дорожного движения / В.А. Корчагин и др. // Вестник Липец. гос. техн. ун-та. 2016. № 3 (29). С. 33–38.
4. Корчагин В.А., Клявин В.Э. Экспертная система в решении задач повышения безопасности дорожного движения // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. Электрон. журн. 2016. № 4(10). URL: <http://www.adimadi.ru/madi/article/view/313> (дата обращения 24.04.2017).
5. Построение экспертных систем : пер. с англ. / под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената. М. : Мир, 1987. 441 с.
6. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2000. 384 с.
7. Муромцев Д.И. Введение в технологию экспертных систем. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2005. 93 с.
8. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. М. : Вильямс, 2007. 1152 с.
9. Повышение безопасности движения автомобилей на основе анализа аварийности и моделирования ДТП / В.А. Корчагин и др. // Фундаментальные исследования. 2015. № 6-2. С. 251–256.
10. Корчагин В.А., Ляпин С.А. Методические основы управления потоковыми процессами на автомобильном транспорте. Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2007. 246 с.
11. Ризаева Ю.Н., Корчагин В.А. Ноосферологические подходы создания социоприродоэкономических транспортно-логистических систем // Автотранспортное предприятие. 2012. № 1. С. 45–48.
12. Ризаева Ю.Н., Корчагин В.А., Корчагина Т.В. Научно-обоснованное управление открытыми автотранспортными системами // Фундаментальные исследования. 2012. № 11. С. 148–152.
13. Научно-практический метод повышения уровня безопасности дорожного движения / В.А. Корчагин и др. // Автотранспортное предприятие. 2016. № 11. С. 19–22.
14. Боровиков В.А. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. СПб. : Питер, 2003. 688 с.
15. Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Кластерный анализ // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ : пер. с англ. М. : Финансы и статистика, 1989. 215 с.
16. Slyunkina ES, Kliavin VE, Gritsenko EA, Petruhin AB, Zambon F, He N et al. Activities of the Bloomberg Philanthropies Global Road Safety Programme (formerly RS10) in Russia: promising results from a sub-national project. Injury. Int J Care Injured. 2013; 44 Suppl 4:S64–9.
17. Intersectoral Action to Improve Road Safety in two Regions of the Russian Federation / Viktor Kondratiev, Vladimir Klyavin, Margaret Peden,



Shivam Gupta et al. // Public Health Panorama. Volume 1, ISSUE 2, September 2015. S. 198–204.
18. Practical steps in enhancing road safety Lessons from the Road safety in 10 countries project (RS

10) 2010–2014 in the Russian Federation / E. Yurasova, D. Sethi, M. Peden, V. Klyavin et al. // WHO Regional Office for Europe. 2015. 64 p.

УДК 625.122 + 519.816

Подвербный Вячеслав Анатольевич,
д. т. н., профессор кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(3952) 638-356, e-mail: vpodverbniy@irgups.ru
Гераськина Елена Олеговна,
ассистент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей»,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(3952) 638-356, e-mail: vpodverbniy@irgups.ru

ВЫБОР ВАРИАНТА ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ПО УКРЕПЛЕНИЮ ОТ РАЗМЫВА ПЕСЧАНОГО ОТКОСА В ПОЛОСЕ ОТВОДА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ МНОГОМЕРНОЙ НЕЧЕТКОЙ ПОЛЕЗНОСТИ

V. A. Podverbnyy, E. O. Geras'kina

CHOICE OF THE VARIANT OF THE DESIGN DECISION ON STRENGTHENING FROM WASHOUT SANDY SLOPE IN THE RAILS RIGHT OF WAY ON THE BASIS OF CRITERION OF MULTIDIMENSIONAL FUZZY UTILITY

Аннотация. В статье рассмотрена задача выбора варианта проектного решения по укреплению от размыва песчаного откоса в полосе отвода железнодорожной линии на основе критерия многомерной нечеткой полезности. Варианты предусматривали комплексы различных мероприятий по укреплению от размыва песчаного откоса с тем, чтобы ликвидировать последствия паводка и предотвратить возможность деформаций при последующей эксплуатации железной дороги. Сравнение вариантов и выбор защитного сооружения был выполнен с использованием методики на основе многомерной нечеткой полезности, предложенной Е. О. Гераськиной, научный руководитель профессор В. А. Подвербный. В качестве лица, принимающего решение, выступал главный инженер проекта Б. П. Мухаров. Были предложены три варианта проектного решения: первый вариант – укрепление первого (основного) оврага матрацами Рено в комплексе с каменно-бетонным водонаправляющим лотком, укрепление второго оврага скальным грунтом; второй вариант проектного решения – укрепление первого (основного) оврага матрацами Рено, укрепление второго оврага скальным грунтом; третий вариант проектного решения – укрепление оврагов и основания откоса скальным грунтом. Для сравнения использовались лингвистические критерии: K_1 – стоимость строительства, K_2 – сложность строительства, K_3 – надежность сооружения. По критерию многомерной нечеткой полезности варианты расположились в следующей последовательности (по убыванию предпочтительности): третий вариант; второй вариант; первый вариант. Выбор был сделан в пользу третьего варианта проектного решения с максимальным значением многомерной нечеткой полезности – укрепление оврагов и основания откоса скальным грунтом.

Ключевые слова: защита от размыва, принятие решений, многомерная нечеткая полезность.

Abstract. In article the problem of a choice of a variant of the design decision on strengthening from washout of a sandy slope in the rails right of way on the basis of criterion of multidimensional fuzzy utility is considered. Variants provided complexes of various actions for strengthening from washout of a sandy slope to liquidate consequences of a June high water and to prevent possibility of deformations at the subsequent operation of the railway. Comparison and a choice of a variant of a protective construction professor has been executed with use of a technique on the basis of the multidimensional indistinct utility offered by E. O. Geraskina, the supervisor of studies – V. A. Podverbnyj. The chief engineer of the project B. P. Muharov acted as the person, making the decision. Three variants of the design decision have been offered: the first variant of the design decision – strengthening of the first (basic) ravine by Renault mattresses in a complex with a kamunno-concrete water directing tray, strengthening of the second ravine by a rocky ground; the second variant of the design decision stone – strengthening of the first (basic) ravine by Renault mattresses, strengthening of the second ravine by a rocky ground; the third variant of the design decision – strengthening of ravines and the slope basis by a rocky ground. For comparison linguistic criteria were used: K_1 – building cost, K_2 – complexity of building, K_3 – reliability of a construction. By criterion of multidimensional indistinct utility variants have settled down in the following sequence (on preference decrease): the third variant; the second variant; the first variant, where – estimations of multidimensional utility of variants with the greatest confidence. The choice has been made in favour of the third variant of the design decision with the maximum value of multidimensional fuzzy utility – strengthening of ravines and the slope basis by a rocky ground.

Keywords: protection against washout, decision-making, multidimensional fuzzy utility.

Введение

В 2011 году Восточно-Сибирскому институту проектирования транспортных систем (ВСИПТС ИрГУПС) службой пути ВСЖД было выдано задание на проектирование модернизации

нечетного пути на перегоне Улан-Удэ – Заудинский Восточно-Сибирской железной дороги.

В технических условиях на проектирование было выдвинуто требование о разработке проектного решения по защите от заноса песком отвер-