
Резерв несущей способности мостового сооружения через реку Кальмиус в г. Донецке

А.Н. Миронов¹, И.М. Гаранжа, В.П. Вершинин³, М.Г. Саад

*¹Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Макеевка,
Украина*

Российский университет дружбы народов, Москва

*²Национальный исследовательский московский государственный строительный
университет*

Аннотация: В статье выполнена оценка параметров напряженно деформированного состояния несущих элементов пролетного строения мостового сооружения в г. Донецк, полученных в результате проведения инженерного расчета. Проведен сбор и анализ информации касательно интенсивности дорожного движения автомобильного транспорта на 2020 г. На основании математической модели (представленной в виде геометрической прогрессии) проанализирована история загрузки моста реальной нагрузкой, указывающей на ежегодный рост интенсивности движения автотранспорта по мостовому сооружению. Суммарное усталостное повреждение несущих элементов пролетного строения определено согласно гипотезе Пальмгрена – Майнера, а также период истощения эксплуатационного ресурса для мостового сооружения.

Ключевые слова: нагружение, история нагружения, грузоподъемность, остаточный ресурс, напряженно-деформированное состояние, усталостная долговечность, суммирование Майнера.

Введение

Мост представляет собой инженерное сооружение, предназначенное для пропуска различного вида транспорта через препятствия (водные преграды, каньоны, дороги и т.д.) и состоящее из перечня основных несущих конструктивных элементов – фундаментов, опор и пролетных строений [1,2].

Сооружение автомобильных мостов в Донецком регионе берет свое начало с 1948 года, а средний срок службы существующих мостовых сооружений составляет 50-65 лет [1]. За относительно непродолжительный период эксплуатации мы сможем наблюдать значительный усталостный износ и наличие структурных повреждений конструктивных элементов моста, что не вызывает сомнений ввиду того, что мостостроители послевоенного периода не располагали необходимым набором строительных материалов, конструкций, монтажных технологий и механизмов, которые

доступны их современным коллегам. Кроме того, с поэтапным увеличением населения городов Донбасса, росло и количество автотранспортных средств, что в свою очередь привело к повышению эксплуатационной нагрузки на мосты, которую конструкторы того времени, увы, не имели возможности учесть на этапе проектирования. Как следствие, с течением времени несущие элементы мостов исчерпали свою несущую способность [2–4]. И в настоящее время есть необходимость в детальном обследовании мостовых сооружений с выдачей заключений об их техническом состоянии.

В соответствии с вышеизложенным, стоит отметить, что для мостовых сооружений, эксплуатируемых в Донецком регионе, выявление их ресурса несущей способности, основываясь на анализе напряженно-деформированного состояния несущих конструкций, используя расчетные положения современных отечественных норм (профильных ДБН в Украине и СП в России), безусловно, является актуальной проблемой.

Объект исследования

Рассмотрено искусственное транспортное сооружение через р. Кальмиус по проспекту Ильича в г. Донецке (см. рис. 1), расположенное на автодороге государственного значения с целью пропуска автомобилей, общественного транспорта (автобусов, троллейбусов), с выделенными пешеходными тротуарами.

Расположение моста в плане местности – на прямой, перпендикулярно к естественному препятствию, в продольном профиле – на выпуклой вертикальной кривой, перекрывает р. Кальмиус, которая не является судоходной.

Габаритные размеры исследуемого сооружения:

- общая длина (относительно лицевых граней устоев) – 206 м;
 - мостовой габарит – Г-14 + 2 х 3,0 м;
 - подмостовой габарит – 3,0 м;
-

- мостовое отверстие – 192,0 м;
- глубина подмостового русла – 4,0 м.



а)



б)

Рис. 1. – Мост через р. Кальмиус (проспект Ильича, г. Донецк)

Конструктивное исполнение моста

Рассматриваемое мостовое сооружение включает в себя ряд несущих конструкций массивных железобетонных опор. Устои моста выполнены как монолитные железобетонные массивы на свайном фундаменте с обратными стенками.

Промежуточные опорные конструкции законструированы как прямоугольные призматические массивы с поперечным сечением 15,4 x 1,5 м. Опорные конструкции № 3, 4, 5 и 6 исполнены в виде двух опертых на единый ростверк столбов.

Перекрытие пролетов моста организованы двумя типами трёхпролетных сталежелезобетонных неразрезных балочных [5–7] конструкций:

- в прибрежных пролетах по схеме 15,68 + 16,0 + 17,06 (м);
- в остальных (центральных) пролетах по схеме 33,84 + 37,6 + 33,84 (м).

Как было сказано выше, конструктивное решение центральных пролетов реализовано сталежелезобетонным, состоящим из толщиной 160 мм монолитной железобетонной плиты, объединенной в совместную работу со стальными главными балками в одно общее сталежелезобетонное сечение, при помощи специальных конструктивных приспособлений - жестких анкеров (упоров) из стальных неравнополочных уголков 150x100x10. Крепление упоров к верхним поясам главных балок выполнено через постановку четырех односрезных заклепок диаметром 22 мм. Шаг упоров в центральном пролетном строении варьируется в диапазоне 0,85 – 0,9 м.

Главные стальные балки пролетных строений моста представляют собой клепаные конструкции двутаврового сечения. В центральном пролете высота стенки балок – 1,415 м. Поперечное сечение поясов выполнено переменным по длине пролета, что достигается за счет постановки дополнительных поясных листов в местах действия максимального изгибающего момента. Марка стали принята М16С согласно ГОСТ 6713-53. Монтажные стыки балок выполнены на заклепках посредством соединения отпорочных элементов дополнительными поясными листами и двусторонними листами по стенкам.

В поперечном сечении пролетного строения моста предусмотрено 8 главных балок с шагом установки 2 и 3,4 м. Продольная и поперечная жесткость конструкции, а также её геометрическая неизменяемость и пространственная работа реализуется за счет наличия:

- системы продольных и поперечных связей между главными балками;
- железобетонной плиты проезжей части, образующей горизонтальный жесткий связевой диск.

Определение резерва несущей способности моста

Резерв несущей способности сооружения – обобщенный остаток ресурса сооружения с момента последнего проведения инструментального анализа его технического состояния до перехода в предельное состояние, когда его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособности не представляется возможным (целесообразным).

Резерв несущей способности вычисляется посредством определения усталостной прочности элементов сечения главной пролетной балки [8–10].

В отечественных нормах проектирования мостовых сооружений [для Украины – ДБН В.1.2-15:2009, ДБН В.2.3-22:2009, ДБН В.2.3-26:2010 и СП 35.13330.2011 – для России] подход к расчету на выносливость видится наименее логически выстроенным и обоснованным, в отличие от зарубежных стандартов (Eurocode 3, гармонизированных с нормативами Республики Казахстан – СН РК EN 1991-3, СН РК EN 1993-2, СН РК EN 1993-6, СН РК EN 1990). Следует выделить 2 причины:

1) предлагаемая методика расчета не в полной мере соответствует принципиальному подходу, заложенному в методе предельных состояний. В действующих нормативных документах усталостный расчет конструкций из строительной стали выполняется согласно выражению:

$$\sigma_{\max,ef} \leq \gamma_w R_y m \quad (1),$$

где $\sigma_{\max,ef}$ – максимальное по абсолютному значению нормальное напряжение, вызванное действием нормативных нагрузок; γ_w – понижающий коэффициент прочности при расчете на выносливость; m – коэффициент условий работы; R_y – расчетное сопротивление материала по пределу текучести.

Таким образом, условия нагружения (многократность, пониженный средний уровень в сравнении с воздействиями от нормативной нагрузки) учитываются в правой части предельного неравенства, оговоренного отечественными нормами, т.е. не в левой части, как это предусмотрено методом предельных состояний, а в месте, где оговариваются характеристики конструкционного материала.

2) В отечественных стандартах проектирования никак не рассматривается вероятностная природа воздействия реальных нагрузок на исследуемое сооружение.

Наиболее корректной видится методика, в основу которой положена оценка степени (уровня) усталости материала моста, в соответствии с гипотезами накопления усталостных повреждений и, как следствие, выявления продолжительности срока службы элемента до потери его несущей способности и его сопоставления с нормированным значением. Вышеописанный подход рассмотрен в Eurocode 3. Значит, данная методика состоит в том, что расчет мостов на выносливость выполняется на основании оценивания их долговечности по усталостному критерию.

В свою очередь, усталость, представляет собой процесс поэтапного накапливания в структуре материала во временном промежутке усталостных дефектов. Причиной тому являются знакопеременные напряжения, приводящие к изменению характеристик, трещинообразованию, с

последующим их раскрытием и, в конечном итоге, к разрушению. Оценивается процесс критерием усталостного дефекта (повреждения), который определяется на основе известной гипотезы Пальмгрена - Майнера).

Сбор исходных данных для усталостного расчета пролетного строения остоа через р. Кальмиус

В период с марта по май 2020 года было экспериментально выявлено фактическое количество единиц автотранспорта, проезжающих по мосту в течение 1 часа – в утреннее (с 8:00 до 9:00), полуденное (с 12:00 до 13:00) и вечернее (с 17:00 до 18:00) время суток. Необходимые подсчеты выполнялись три раза в указанные выше временные промежутки в течение дня. Основываясь на их результатах, было определено усредненное значение численности единиц автотранспорта, проезжающих по мосту в каждый из указанных временных интервалов. Результаты приведены в таблице 1.

После определения количества автотранспортных средств, проезжающих по мосту в течение 1 часа в разное время суток, для более корректного вычисления фактической нагрузки на несущие конструкции моста были определены массогабаритные характеристики автотранспорта.

Таблица №1

Усредненная численность единиц автотранспорта

Вид транспорта	Направление движения	
	2	3
1		
Вечер (17:00 – 18:00)	в Донецк	в Макеевку
Легковые автомобили	505	706
Внедорожники (4x4)	23	36
Фургоны	18	39
Грузовые автомобили	0	3
Автобусы	47	38
Троллейбусы	7	10
День (12:00 – 13:00)		
Легковые автомобили	513	686
Внедорожники (4x4)	31	25

1	2	3
Фургоны	28	34
Грузовые автомобили	8	12
Автобусы	51	32
Троллейбусы	7	8
Утро (08:00 – 09:00)		
Легковые автомобили	600	635
Внедорожники (4x4)	24	54
Фургоны	31	15
Грузовые автомобили	3	2
Автобусы	54	32
Троллейбусы	10	7

Известным математическим методом определялась мера силы транспортного потока на мосту – его интенсивность движения за расчетный период времени нахождения моста в эксплуатационном состоянии [8 – 10]. Математическая модель, реализованная в виде геометрической прогрессии показывает рост интенсивности движения автомобильного транспорта:

$$N_t = N_0(1 + \beta)^t \quad (2),$$

где N_t – количество автотранспорта на период времени t ; N_0 – количество автотранспорта на текущий период времени; β – прирост, в % (принимается в диапазоне 3 – 5%). Результаты представлены в таблице 2.

Исходя из имеющегося набора статистических данных, построены «блоки загрузки» и «спектры размаха местных напряжений», соответствующие временному периоду эксплуатации моста и приведенные на рис. 2-11.

Суммарное усталостное повреждение в течение проектной долговечности конструкции определяется по гипотезе Пальмгрена - Майнера, основанной на линейном накоплении усталостных повреждений:

$$D_q = \sum_{i=1}^n \frac{n_{E,i}}{N_{R,i}} = 3,69 \quad (3).$$

Таблица № 2

Фактическое количество автотранспортных средств на мосту за период эксплуатации (1951-2020 гг.)

Год					2000	458	46	41	5
2020	676	68	60	8	1999	436	44	39	5
2018	644	65	57	8	1998	415	42	37	5
2017	613	62	54	7	1997	395	40	35	5
2016	584	59	52	7	1996	376	38	33	4
2015	556	56	49	7	1995	358	36	32	4
2014	530	53	47	6	1994	341	34	30	4
2013	863	87	77	10	1993	325	33	29	4
2012	822	83	73	10	1992	310	31	27	4
2011	783	79	69	9	1991	295	30	26	3
2010	745	75	66	9	1990	281	28	25	3
2009	710	71	63	8	1989	268	27	24	3
2008	676	68	60	8	1988	255	26	23	3
2007	644	65	57	8	1987	243	24	22	3
2006	613	62	54	7	1986	231	23	21	3
2005	584	59	52	7	1985	220	22	20	3
2004	556	56	49	7	1984	210	21	19	2
2003	530	53	47	6	1983	200	20	18	2
2002	504	51	45	6	1982	190	19	17	2
2001	480	48	43	6	1981	181	18	16	2
1980	172	17	15	2	1965	83	8	7	1
1979	164	17	15	2	1964	79	8	7	1
1978	156	16	14	2	1963	75	8	7	1
1977	149	15	13	2	1962	72	7	6	1
1976	142	14	13	2	1961	68	7	6	1
1975	135	14	12	2	1960	65	7	6	1
1974	129	13	11	2	1959	62	6	5	1
1973	123	12	11	1	1958	59	6	5	1
1972	117	12	10	1	1957	56	6	5	1
1971	111	11	10	1	1956	53	5	5	1
1970	106	11	9	1	1955	51	5	5	1
1969	101	10	9	1	1954	48	5	4	1
1968	96	10	9	1	1953	46	5	4	1
1967	91	9	8	1	1952	44	4	4	1
1966	87	9	8	1	1951	42	4	4	1
1965	83	8	7	1					

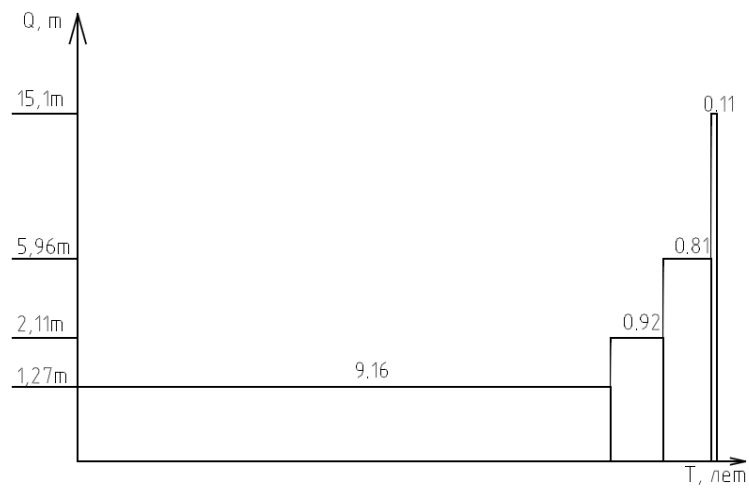


Рис. 2. – Блок загрузки 1951-1961 гг.

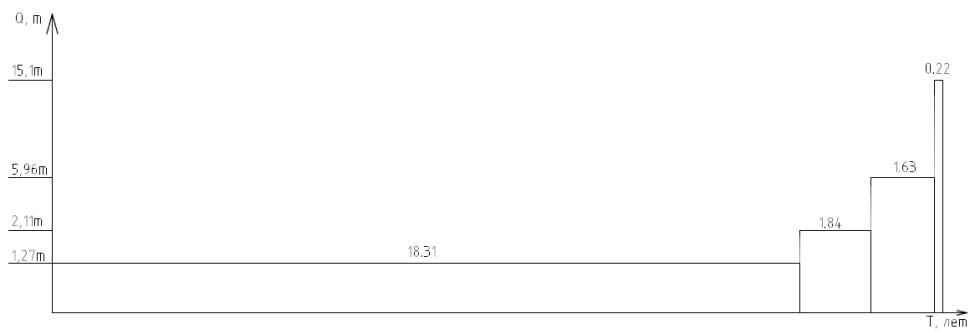


Рис. 3. – Блок загрузки 1962-1983 гг.



Рис. 4. – Блок загрузки 1984-2004 гг.

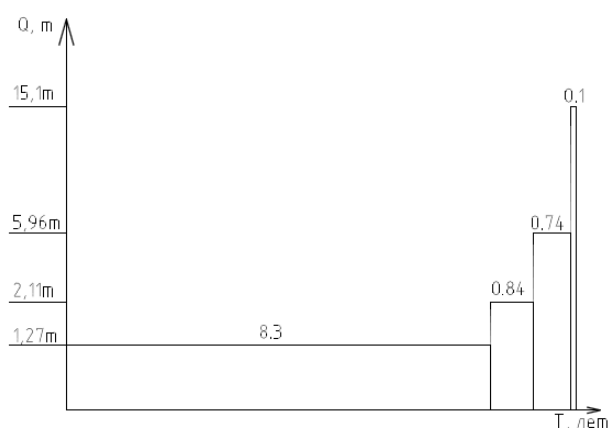


Рис. 5. – Блок загрузки 2005-2014 гг.

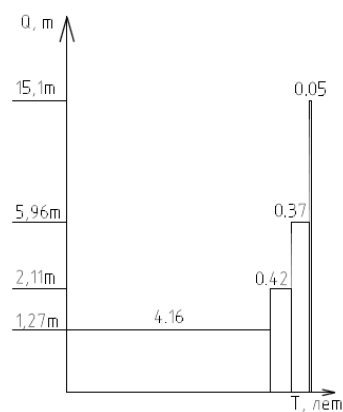


Рис. 6. – Блок загрузки 2015-2020 гг.

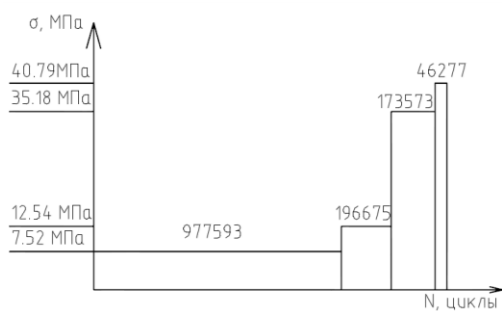


Рис. 7. – Спектр размаха местных напряжений 1951-1961 гг.

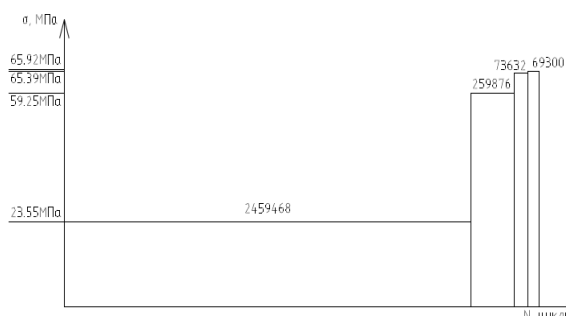


Рис. 8. – Спектр размаха местных напряжений 1984-2004 гг.



Рис. 9. – Спектр размаха местных напряжений 1962-1983 гг.

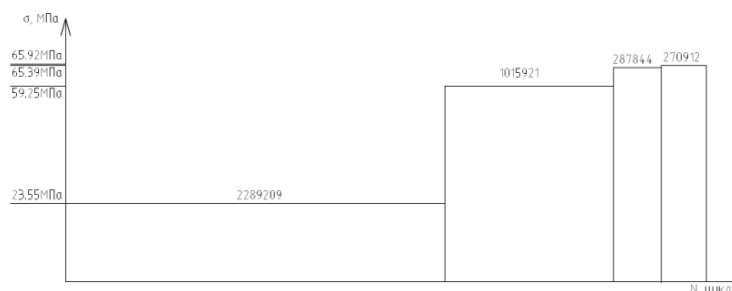


Рис. 10. Спектр размаха местных напряжений 2005-2014 гг.

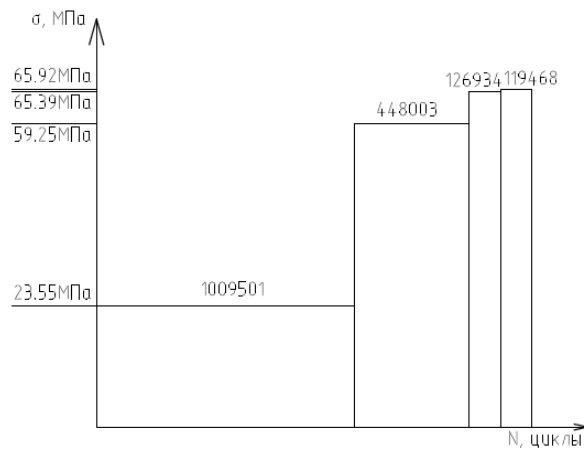


Рис. 11. Спектр размаха местных напряжений 2015-2020 гг.

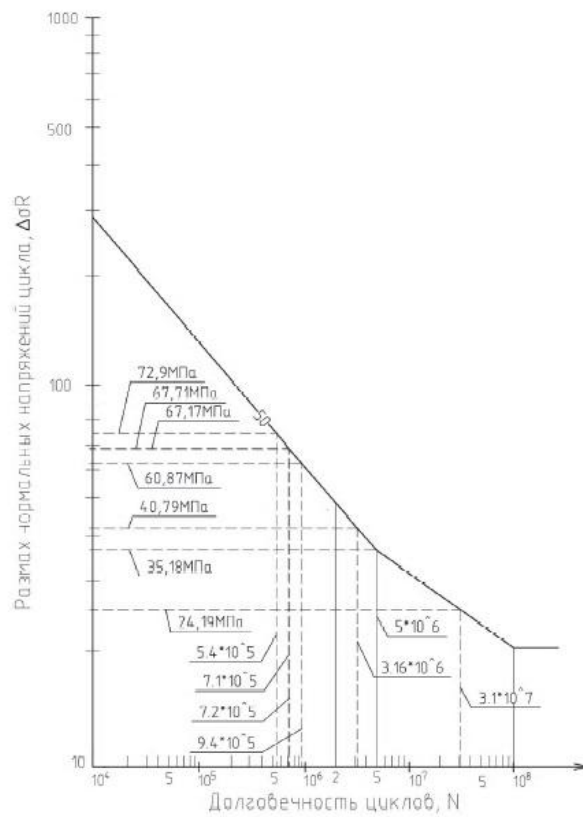


Рис. 12. Кривая сопротивления усталости для 50-й категории элемента по размахам напряжений цикла

Эквивалентный спектр размахов напряжений:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = 72,9 \text{ МПа} \quad (4),$$

$$\sqrt[m]{D_q} \cdot \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} = \sqrt[3]{3,69} \cdot \frac{50}{1,35} = 57,2 \text{ МПа} \quad (5).$$

Анализ результатов расчета моста на усталость

Оценивание усталостной прочности выполнялось по 2-м критериям:

1) по критерию накопления повреждений – суммарное усталостное повреждение в течение проектной долговечности конструкции определено гипотезой Пальмгрена - Майнера, в основе которой заложен принцип линейного накопления усталостных повреждений:

$$D_q = \sum_{i=1}^n \frac{n_{E,i}}{N_{R,i}} = 3,69 > 1 \quad (6).$$

Вывод – условие не выполняется.

2) по критерию размаха напряжений цикла:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = 72,9 \text{ МПа} > \sqrt[m]{D_q} \cdot \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} = \sqrt[3]{3,69} \cdot \frac{50}{1,35} = 57,2 \text{ МПа} \quad (7).$$

Вывод – условие не выполняется.

Таким образом, результаты расчета дают четкое понимание, что сопротивление усталости мостовой конструкции не обеспечено и можно сделать вывод о полном исчерпании сооружением ресурса несущей способности на момент исследования (весна 2020 года).

Используя данные проведенного исследования, был установлен период времени исчерпания ресурса несущей способности.

Итоговый усталостный эффект по состоянию на:

– 2004 год – $D_q = 0,91$.

– 2005 год – $D_q = 1,07$.

Это означает, что ресурс несущей способности был израсходован еще задолго до момента проведения данного исследования, а именно в период с 2004 по 2005 гг.

Выводы

1. В рамках исследования выполнен статистический анализ интенсивности дорожного движения по мосту через реку Кальмиус в г.

Донецке на 2020 год, включая рассмотрение истории его загрузки реальной нагрузкой в период с 1951 по 2020 г., разработаны «блоки загрузки» в разные временные периоды на основании математической модели в виде геометрической прогрессии, указывающей на ежегодный прирост интенсивности движения автотранспорта по мосту.

2. Экспериментально определена фактическая интенсивность движения на весну 2020 года, наглядно показавшая численное преобладание легкового автотранспорта над иными видами транспортных средств.

3. Суммарное усталостное повреждение, определенное гипотезой Пальмгрена - Майнера, составило 3,69 при допустимом – 1,0.

4. Основываясь на результатах исследования, выявлен период истощения эксплуатационного ресурса несущей способности моста. Ресурс был исчерпан в период с 2004 по 2005 гг.

Литература

1. Стрелецкий Н.Н. Сталежелезобетонные мосты. Москва: Транспорт, 1965. 376 с.

2. Муцанов В.Ф., Миронов А.Н. Уточнение остаточной несущей способности балочных пролетных строений моста через р. Кальмиус в г. Донецке // Материалы X научно-практической конференции под ред. А. В. Улыбина. 2020. С. 129-147.

3. Перельмутер А.В., Гордеев В.М., Горохов Е.В. Состояние и остаточный ресурс фонда строительных металлических конструкций в Украине. Киев: Сталь, 2012. 166 с.

4. Макаров А.В., А.В. Купрещенков А.В. К вопросу о проектировании биметаллических мостов // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4961.

5. Тиратурян А.Н., Ольховой С.А. Оценка деградации прочности нежестких дорожных конструкций на основе натуральных измерений на участке



автомобильной дороги М4 «Дон» п. Тарасовский // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160.

6. Круль Ю.Н. Испытания сталежелезобетонного автомобильно-дорожного моста // Вестник ХНАДУ. 2012. С. 85-89.

7. Лившиц Я.Д., Онищенко М.М., Шкуратовский А.А. Примеры расчета железобетонных мостов. Киев: Высшая школа, 1986. 263 с.

8. Гибшман Е. Е. Проектирование стальных конструкций объединенных с железобетоном в автодорожных мостах. Москва: Автотрансиздат, 1956. 277 с.

9. Chen W.F., Duan L. F. Bridge Engineering Handbook. Edinburgh: Boca Raton FL: CRC Press, 2018. 166 p.

10. Haywood A., Sadler N., Tordoff D. Steel Bridges: A Practical Approach to Design for Efficient Fabrication and Construction // BCSCA Publication. №34 (02). 2016. p. 220-229.

References

1. Streleckij N.N. Stalezhelezobetonnye mosty [Steel-reinforced concrete bridges]. Moskva: Transport, 1965. 376 p.

2. Mushchanov V.F., Mironov A.N. Materialy Nauchno-prakticheskoy konferencii pod red. A. V. Ulybina. 2020. pp. 129-147.

3. A.V. Perel'muter, V.M. Gordeev, E.V. Gorohov Sostojanie i ostatochnyj resurs fonda stroitel'nyh metallicheskih konstrukcij v Ukraine [Condition and residual resource of the fund of building metal structures in Ukraine]. Kiev: Stal', 2012. 166 p.

4. Makarov A.V., A.V. Kupreshchenkov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4961.

5. Tiraturjan A.N., Ol'hovoj S.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160.

6. Krul' Yu.N. Vestnik HNADU. 2012. pp. 85-89.



7. Livshits Ja.D., Onishchenko M.M., Shkuratovskij A.A. Primery rascheta zhelezobetonnyh mostov [Examples of calculation of reinforced concrete bridges]. Kiev: Vysshaya shkola, 1986. 263 p.

8. Gibshman E. E. Proektirovanie stal'nyh konstrukcij ob'edinennyh s zhelezobetonom v avtodorozhnyh mostakh [Design of steel structures combined with reinforced concrete in road bridges]. Moskva: Avtotransizdat, 1956. 277 p.

9. Chen W.F., Duan L. F. Bridge Engineering Handbook. Edinburgh: Boca Raton FL: CRC Press, 2018. 166 p.

10. Haywood A., Sadler N., Tordoff D. BCSA Publication. №34(02). 2016. pp. 220-229.