

## К вопросу о проектировании биметаллических мостов

*А.В. Макаров, А.Э. Купрещенко*

*Волгоградский государственный технический университет*

**Аннотация:** Описаны достоинства металлических мостов, в сравнении с железобетонными, а также материалы мостов их хим. состав и характеристики. Наиболее нагруженные элементы балок следует выполнять из высокопрочных сталей, а все остальные из обычной мостовой стали, получая биметаллическую конструкцию. Показано как следует назначать пролеты неразрезной плети, чтобы пролетные моменты оказались равными. Приведена формула и оптимальное соотношение. В статье предложено проектировать пролетное строение из трех типов стандартных блоков. Блоки различаются длиной и использованием различных сталей.

**Ключевые слова:** биметаллический, пролетное строение, марки стали, объемлющая эпора, нормальные напряжения, монтажный блок, листовой прокат.

Автодорожные мосты балочных систем, как известно, строятся железобетонные и металлические. В Советском Союзе в основном мосты строились из сборного железобетона. Была создана мощная производственная база по производству типовых сборных железобетонных конструкций и деталей для гражданского, промышленного и транспортного строительства. Такой подход позволял строить относительно быстро и не дорого. Однако наряду с достоинствами имеются и существенные недостатки. Это трудности в возведении не типовых мостов, сложности утилизации конструкций, невозможность (неэффективность) повторного использования материала.

Металлические мосты имеют существенные преимущества по сравнению с железобетонными. Главными являются возможность перекрывать большие пролеты и утилизация – старый металл можно переплавить и изготовить новую конструкцию. Но сталь это дорогой материал, требующий изъятия большого количества ресурсов (руды, угля) и использовать его надо эффективно.

Эффективность конструкции определяется эффективным использованием материала, так чтобы действующие напряжения

---

нормальные, касательные и приведенные во всех сечениях конструкции были бы максимальными от воздействия полных загрузжений. Достичь этого можно разными путями. Первый путь, при котором пояса двутавровых балок делаются составными, широко применяется в современном мостостроении. Здесь ширина и толщина стальных листов пояса подбирается так, чтобы максимальное нормальное напряжение не превышало допустимых значений. Важно при проектировании пояса избежать концентраторов напряжений. Не допускать скачкообразного изменения площади поперечного сечения поясов, а выполнять плавный переход [1], как показано на рисунке 1.

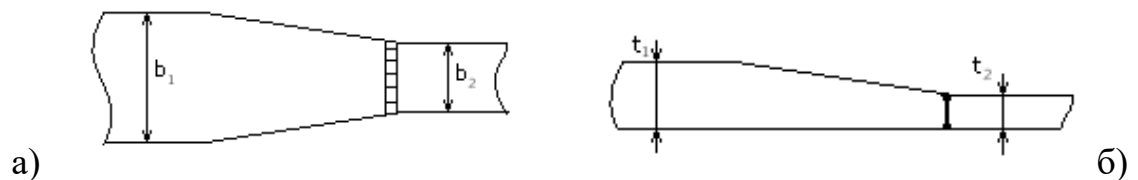


Рис. 1. Изменение листов пояса а) по ширине, б) по толщине.

К недостаткам составных сечений балок можно отнести большую трудоёмкость, связанную со строжкой металлических листов по толщине и их объединение.

Второй путь связан с использованием при изготовлении балки различных по прочности сталей, который получил название биметаллического пролетного строения. Такая балка легче, менее трудоёмка в изготовлении. Однако такие пролетные строения не получили пока широкого применения из-за не проработанных вопросов проектирования. Пролетные строения мостов собираются из блоков длиной 21 и 10,5 метров, и требуется, чтобы внутри блока было возможно меньшее число соединений. Только тогда биметаллическое пролетное строение сможет конкурировать с составным.

Мостовые конструкции изготавливают из листовой и фасонной горячекатаной стали. Применяют толстолистовую и широкополосную универсальную сталь; уголковую, двутавровую, швеллерную, полосовую, круглую и

другую фасонную сталь [2]. Конструкции мостов подвергаются динамическим нагрузкам, поэтому в соответствии с требованиями для их изготовления применяют высококачественные низколегированные конверторные стали (СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы). К ним относятся стали 16Д, 15ХСНД, 10ХСНД изготовленные в соответствии с [3] и 15Г2АФДпс, 14Г2АФД изготовленные в соответствии с (ГОСТ 19282-73). Химический состав мостовых сталей приведен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Сталь	C	Si	Mn	Cr	N	Cu	P	S
16Д	0,1-0,18	0,12-0,25	0,4-0,7	0,3	0,3	0,2-0,35	0,035	0,04
15ХСНД	0,12-0,18	0,4-0,7	0,4-0,7	0,6-0,9	0,3-0,6	0,2-0,4	0,035	0,035
10ХСНД	0,12	0,8-1,1	0,5-0,8	0,6-0,9	0,5-0,8	0,4-0,6	0,035	0,035

Таблица 2

Сталь	C	Si	Mn	Cr	N	Cu	В
15Г2АФДпс	0,12-0,18	0,17	1,2-1,6	0,3	0,3	0,2-0,4	0,08-0,15
14Г2АФД	0,12-0,18	0,3-0,6	1,2-1,6	0,4	0,3	0,15-0,3	0,07-0,12

В обозначении марок стали цифры и буквы означают: двухзначные цифры слева - примерное среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы справа от цифр: Г - марганец, С - кремний, Х - хром, Н - никель, Д - медь, Ф - ванадий, Б - ниобий, А - азот, П - фосфор, цифры после букв - примерное % содержание соответствующего элемента в целых единицах, буквы «пс» в конце марки - полуспокойную сталь [4].

Прочностные характеристики листового проката при растяжении рассмотренных сталей приведены в таблице 3.

Таблица 3

Марка стали	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
-------------	------------------------------	-----------------------	----------------------------

16Д	375-510	225	26
15ХСНД	470-670	335	19
10ХСНД	530-670	390	19
15Г2АФДпс	540	390	19
14Г2АФД	540	390	19

Кроме представленных и давно используемых в мостостроении сталей, для создания биметаллических мостов могут использоваться стали с более высокими механическими характеристиками, такие как углеродистые и низколегированные стали повышенной прочности [5].

Таблица 4

Сталь	C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr
S890QL	0,20	0,80	1,70	0,020	0,010	0,015	0,005	1,50
Сталь	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr	
S890QL	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15	

Механические характеристики листового проката марки S890QL и некоторых подобных представлены в таблице 5.

Таблица 5

Марка стали	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
S890QL	880-1100	830-890	11
S890Q	880-1100	830-890	11
S890QL1	880-1100	830-890	11

Символы, используемые в EN 10025-6: Q - испытания на энергию ударной вязкости проведены при температуре -20°C; QL - испытания на энергию ударной вязкости проведены при температуре -40°C; QL1 - испытания на энергию ударной вязкости проведены при температуре -60°C.

Прокат из сталей, приведенных в таблице 5, производится по стандарту EN 10025-6 (часть шестая), который определяет технические

условия для горячекатаных конструкционных сталей с закалкой и последующим отпуском. Закалкой называется процесс нагрева стали до температуры выше критической точки и последующего быстрого охлаждения с помощью воды, масла или водовоздушной смеси. После заковки сталь становится твердой и хрупкой, с сильными внутренними напряжениями. Для улучшения характеристик производится последующий отпуск. Отпуск - процесс повторного нагрева, но уже ниже критической точки. Данная операция увеличивает пластичность стали. В результате получается сталь с хорошим соотношением прочности и пластичности, которая также хорошо сваривается, гнется и удобна в работе. Усовершенствование процессов заковки и отпуска позволяет получать листовую сталь с пределом текучести до 1300 МПа, что более чем в 4 раза превышает характеристики основной конструкционной стали. Использование таких сталей для изготовления пролетных строений позволит облегчить конструкцию и уменьшить трудоёмкость работ. Однако более высокая стоимость прочного металла сводит на нет все достоинства.

Экономически эффективным можно запроектировать биметаллическое пролетное строение лишь при условии использования прочного металла для сечений с большими усилиями. А для этого требуется, чтобы пролетные моменты во всех пролетах были бы равными. Рассмотрим наиболее широко применяющееся трех пролетное неразрезное пролетное строение цельнометаллического моста загруженного равномерной нагрузкой  $q_{\text{пост}}$  (собственный вес).

Опорные моменты составят  $M_{\text{оп}} = -\frac{q \cdot l^2 (n^2 + 1)}{4(2 \cdot n + 3)}$ . В центральном

пролете максимальный пролетный момент действует в среднем сечении, а в крайних отстоит от середины на величину  $\frac{M_{\text{оп}}}{l \cdot n \cdot q}$ , как показано на рис. 2

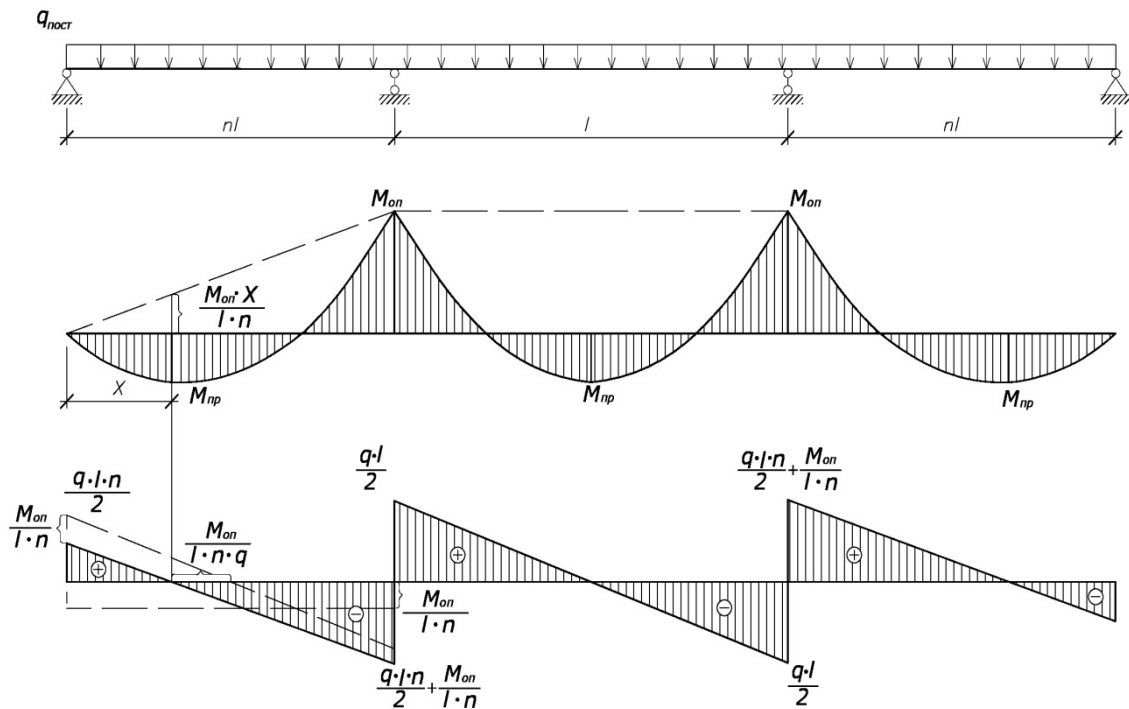


Рис. 2. Схема неразрезного пролетного строения с выровненными пролетными изгибающими моментами.

Приравняем максимальные изгибающие моменты в крайнем и среднем пролетах и получим следующее выражение:

$$\frac{ql^2}{8} - \frac{ql^2(n^3 + 1)}{4 \cdot (2 \cdot n + 3)} = \left( \frac{ql \cdot n}{2} - \frac{M_{оп}}{l \cdot n} \right) \cdot \left( \frac{ql}{2} - \frac{M_{оп}}{l \cdot n \cdot q} \right) - \frac{q}{2} \left( \frac{l \cdot n}{2} - \frac{M_{оп}}{l \cdot n \cdot q} \right)^2$$

Подставляя значение  $M_{оп}$  и решая трансцендентное уравнение относительно  $n$  получим  $n = 0,794$ . Именно при таком  $n$  моменты будут одинаковы. При проектировании пролетного строения одинаковые пролетные моменты позволят получить одинаковые монтажные блоки. Отклонение соотношения пролетов даже на небольшую величину резко увеличивает разницу пролетных изгибающих моментов, что показано в таблице 6, что потребует индивидуального проектирования каждого блока. Разумеется, не всегда возможно подобрать такие пролеты, чтобы они удовлетворяли найденному соотношению  $n = 0,794$ , потому что металлические мосты составляют из блоков равных 21 или 10,5 метров.

Таблица 6

№	Схема моста	$n$	$M_{\text{край}}$	$M_{\text{сред}}$
1	42+63+42	0,666	15469	24700
2	52,5+63+52,5	0,833	26430	23400
3	51,5+63+51,5	0,817	25369	23660
4	51+64+51	0,797	24948	24557

Таким образом, деление на пролеты неразрезного пролетного строения должно быть не по границам монтажных блоков, а по лучшему соотношению пролетов, как показано на рисунке 3.

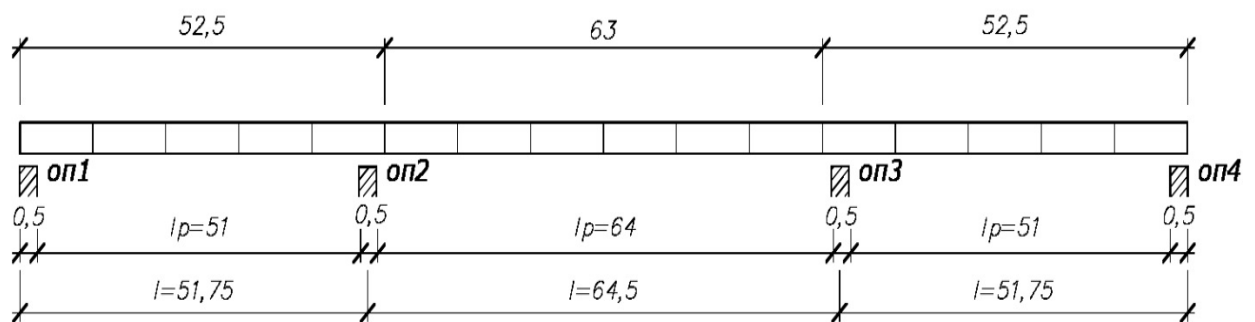


Рис. 3. Пролетное строение с делением на монтажные блоки и пролеты.

Для реализации изложенных предложений по проектированию биметаллического пролетного строения было рассмотрено реальное мостовое сооружение. Описание моста: длина – 168 м., схема моста 51,75+64,5+51,75; габарит Г10 + тротуар 2\*1,5 + барьерное ограждение 2\* 0,45 + перильное ограждение 2\*0,2. Таким образом, ширина пролетного строения – 14,3 м. Пролетное строение моста цельнометаллическое с ортотропной плитой и двумя главными балками; высота стенки – 2,3 м. Нагрузка: постоянная составила  $q_{\text{пост}}=55,59$  кН/м, временная вертикальная крайнего пролета  $q_{\text{вр}}=54,48$  кН/м, среднего пролета  $q_{\text{вр}}=49,416$  кН/м. Опорные части должны быть запроектированы в соответствии с требованиями [6] и обеспечивать

необходимые угловые и горизонтальные смещения [7]. Надежность мостового сооружения определяется в соответствии с [8].

Выполняя необходимые расчеты неразрезного трехпролетного моста (рис. 3) на постоянную и временную нагрузки [9,10] получим объемлющие эпюры изгибающих моментов и поперечных сил, представленные на рисунке 4. Расчеты приведены в таблицах 7,8.

Таблица 7

№сеч	х	М пост	Временные моменты			Объемлющие	
			A14 1пр	A14 2 пр	A14 3 пр	Mmax	Mmin
1	0	0	0	0	0	0	0
2	10	7890	9690	-2202	473,7	18053,7	5688
3	20,5	10100	13877	-4515	971,1	24948,1	5585
4	31	6010	11944	-6827	1468,5	19422,5	-817
5	41,5	-4310	3886	-9140	1965,9	1541,9	-13450
6	51,5	-19000	-8682	-11233	2415,9	-16584,1	-38915
7	62	-2910	-6832	3100	566,2	756,2	-9742
8	72,5	6770	-4893	11706	-1283,4	18476	593,6
9	83	9990	-3132	14567	-3133,2	24557	3724,8

Таблица 8

№сеч	Q пост	Временные усилия			Объемлющие	
		Q 1пр	Q 2пр	Q 3пр	Q max	Q min
1	1072,3	1246,3	-220,2	47,37	2366	852
2лев	-1818,6	-1568,8	-220,2	47,37	-1771	-3608
2пр	1813,9	173,4	1612,4	-173,4	3600	1640
3лев	-1813,9	173,4	-1612,4	-173,4	-1640	-3600
3пр	1818,6	-47,37	220,2	1586,8	3626	1771
4	-1072,3	-47,37	220,2	-1246,3	-852	-2366



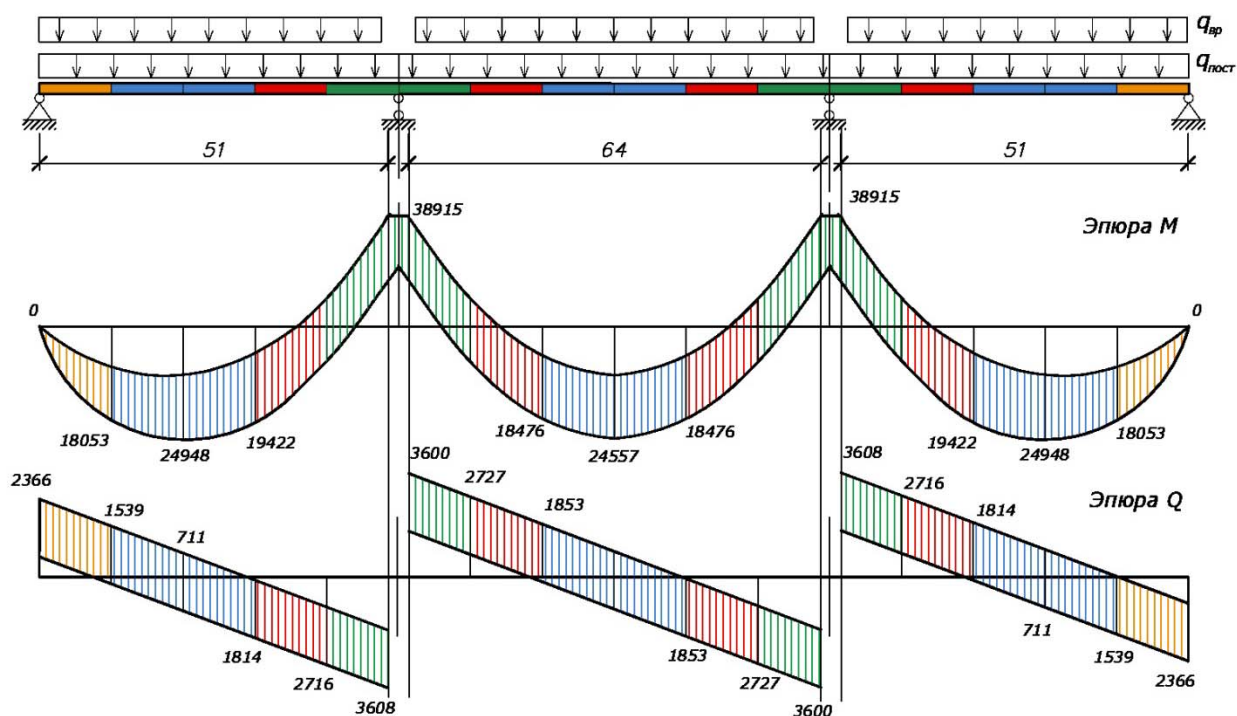


Рис.4. Объемлющие эпюры с поблочной разметкой. Цветом выделены блоки, работающие в одинаковых условиях.

Анализ эпюр показал, что пролетное строение можно составить из четырех модульных блоков.

**Блок А** (синий цвет) длиной 21 метр. Максимальный изгибающий момент 24948 кНм, поперечная сила небольшая 1853 кН., поэтому из стали S890QL выполняется только нижний пояс (Рис.5).

**Блок Б** (зеленый цвет) длиной 21 метр.  $M_{max}=38915$  кНм и  $Q_{max}=3660$  кН. Из стали S890QL выполняется нижний пояс, стенка балки и стринги ортотропной плиты в центральной части блока длиной 10 метров.

Крайний **Блок К** (желтый цвет) и промежуточный **Блок П** длиной по 10,5 метров в данном случае можно запроектировать одинаковыми и свести количество типовых блоков к трем: А, Б и К. Этот **Блок К** с действующими  $M_{max}=19422$  кНм и  $Q_{max}=2716$  кН потребует запроектировать из стали S890QL нижний пояс и стенку балки (Рис.5). Все

остальные конструктивные элементы сечения, ребра жесткости, поперечные балки и связи выполняются из мостовой стали 10ХСРД.

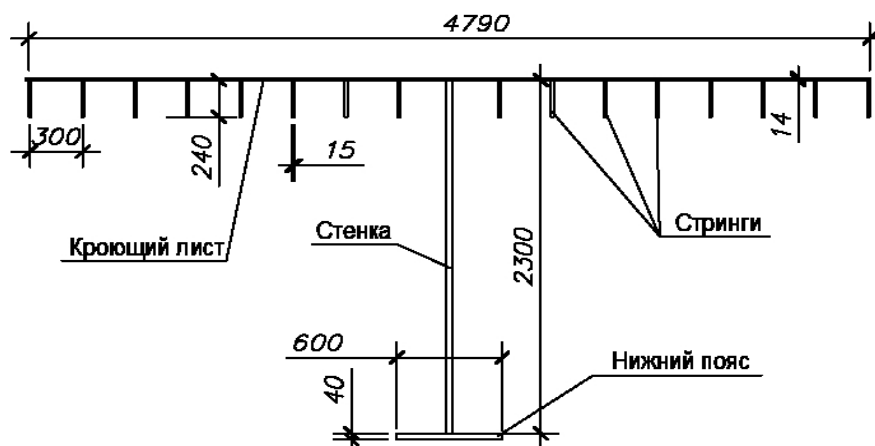


Рис. 5. Приведенное сечение биметаллической балки.

Таким образом, можно сделать ряд важных выводов, опираясь на которые будет возможно проектировать биметаллические пролетные строения мостов не только прочными, но и экономичными:

- деление неразрезной трехпролетной конструкции следует производить не в зависимости от блоков, а учитывая эффективное соотношение пролетов, выравнивающее изгибающие моменты;

- трехпролетная неразрезная плеть длиной 168 метров состоит из трех типовых блоков, что унифицирует и облегчает изготовление конструкции;

- использование стали повышенной прочности уменьшает трудоемкость изготовления конструкции за счет уменьшения технологических операций и ее собственный вес, позволяя снизить расход стали;

- сталь повышенной прочности используется только в тех местах, где действуют большие усилия, в остальных сечениях применяется обычная сталь, что не приводит к удорожанию сооружения.

### Литература

1. Мосты и сооружения на дорогах. Учеб. для вузов: В 2-х ч./ Под ред. П.М. Саламахина. Ч. 2. – М.: Транспорт, 1991. 344 с.

2. Корнеев М.М. Стальные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию. – К., 2003. – 547 с.
3. Марочник стали и сплавов. URL: [splav-kharkov.com/choose\\_type\\_class.php?type\\_id=3](http://splav-kharkov.com/choose_type_class.php?type_id=3)
4. Макаров А. В. Инженерные сооружения в дорожном строительстве: курс лекций: в 2-х ч. Ч. 2: Искусственные сооружения на дорогах / М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. техн. ун-т. - Волгоград: Изд-во ВолГГТУ, 2016. № госрегистрации 0321702662. Лек.9, слайд 9.
5. Henan HZZ Iron and Steel Co., LTD URL: [ru.steel-grade-plate.com/carbon-and-low-alloy-high-strength-steel-plate/en-10025-6/en-10025-6-s890ql-carbon-and-low-alloy-high-st.html](http://ru.steel-grade-plate.com/carbon-and-low-alloy-high-strength-steel-plate/en-10025-6/en-10025-6-s890ql-carbon-and-low-alloy-high-st.html).
6. Макаров А.В., Карпов В.С. Рекомендации по подбору опорных частей с целью увеличения срока службы мостового строения // Инженерный вестник Дона, 2017, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4079](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4079)
7. Макаров А.В., Журавлев А.В. Деформирующиеся плоские опорные части мостов // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4707](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4707)
8. Рекунов С.С. Об оценке надёжности и восстановлении эксплуатационных качеств мостовых сооружений // Транспортные сооружения. 2016. Т. 3. № 2. С. 7.
9. Игнатъев В.А., Макаров А.В. Решение неполной алгебраической проблемы собственных векторов и собственных значений для задач динамики и устойчивости методом частотно-динамической конденсации // Строительная механика и расчет сооружений. 2005. № 1. С. 14-20.
10. Pshenichkina V.A., Voronkova G.V., Rekunov S.S. Research of the dynamical system “beam – stochastic base” / Procedia Engineering. 2016. V. 150. pp. 1721-1728.

## References

1. Mosty i sooruzheniya na dorogakh. [Bridges and road structures]. Ucheb. dlya vuzov: V 2-kh ch. Pod red. P.M. Salamakhina. Ch. 2. M.: Transport. 1991. 344 p.
2. Korneyev M.M. Stalnyye mosty: teoreticheskoye i prakticheskoye posobiye po proyektirovaniyu. [Steel bridges: theoretical and practical guide to design] K.. 2003. 547 p.
3. Marochnik stali i splavov. [Steel and alloys brand name]. URL: [splav-kharkov.com/choose\\_type\\_class.php?type\\_id=3](http://splav-kharkov.com/choose_type_class.php?type_id=3)
4. Makarov A. V. Inzhenernyye sooruzheniya v dorozhnom stroitelstve [Engineering structures in road construction]: kurs lektsiy: v 2-kh ch. Ch. 2: Iskusstvennyye sooruzheniya na dorogakh. M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federatsii. Volgogr. gos. tekhn. un-t. Volgograd: Izd-vo VolgGTU. 2016. № gosregistratsii 0321702662. Lek.9. slayd 9.
5. Henan HZZ Iron and Steel Co., LTD URL: [ru.steel-grade-plate.com/carbon-and-low-alloy-high-strength-steel-plate/en-10025-6/en-10025-6-s890ql-carbon-and-low-alloy-high-st.html](http://ru.steel-grade-plate.com/carbon-and-low-alloy-high-strength-steel-plate/en-10025-6/en-10025-6-s890ql-carbon-and-low-alloy-high-st.html).
6. Makarov A.V., Karpov V.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4079](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4079)
7. Makarov A.V., Zhuravlev A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4707](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4707)
8. Rekunov S.S. Transportnyye sooruzheniya. 2016 V. 3, № 2. P.7
9. Ignatyev V.A., Makarov A.V. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2005. № 1. pp. 14-20.
10. Pshenichkina V.A., Voronkova G.V., Rekunov S.S. Procedia Engineering. 2016. V. 150. pp. 1721-1728.