

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В КАНАТАХ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ ВОРОШИЛОВСКОГО МОСТА В ГОРОДЕ РОСТОВ-НА-ДОНУ



**О. В. Крутиков**  
Генеральный директор  
ООО «Т. К. М.»,  
кандидат технических наук



**И. Ш. Гершуни**  
Главный специалист  
ООО «Т. К. М.»,  
кандидат технических наук,  
доцент

**В** рамках разработки рабочей документации по объекту «Реконструкция мостового перехода через реку Дон в створе Ворошиловского проспекта в городе Ростове-на-Дону» в 2014 г. выполнено обследование русловой части существующего моста. Среди задач обследования было определение усилий в канатах верхней плиты балочно-консольного пролетного строения.

Ворошиловский мост через реку Дон в городе Ростове-на-Дону построен Мостоотрядом №10 Мостотреста Главмостостроя СССР и сдан в постоянную эксплуатацию в 1965 году. Проект моста разработан проектной организацией «Гипрокоммундортранс» МКХ РСФСР при участии института «Гипротранс-мост» Минтрансстроя СССР. Проект организации строительства и производства работ – ЦПКБ Мостотреста. Ворошиловский мост является городским и предназначен для связи районов города и для междугородного сообщения. Мост запроектирован под временные нормативные нагрузки по схемам: автомобильная Н-30 совместно с толпой на тротуарах интенсивностью 400 кгс/м<sup>2</sup> и одиночная тяже-

лая колесная нагрузка НК-80. Технические условия проектирования: СН 200-62 и СН 365-67. Конструктивно мост состоит из трех частей: правобережной эстакады (2×32,4 м), левобережных эстакадных пойменных пролетных строений (8×32,4 м) и руслового пролетного строения (79,38 + 131,8 + 79,38 м). Русловое пролетное строение в осях опор 2, 3, 4 и 5 – балочно-консольное, с подвесным пролетом. Балочно-консольная часть с коробчатыми главными балками на клеевых и бетонизируемых стыках из железобетона, предварительно напряженно-го канатами.

Общий вид русловой птички пролетного строения с разбивкой по блокам и схемой расположения канатов приведен на рисунке 1.

По проекту канат в верхней плите представляет собой канаты двойной свивки по ГОСТу 7666-55 из проволоки  $R_n = 19\ 000$  кгс/см<sup>2</sup> (133Ø3 + 42Ø1,2) диаметром 45 мм. Масса каната по проекту  $m = 8,744$  кг/м. Усилие в канатах по проекту без учета потерь составляет около 127 тс. Фактически усилия определялись при обследовании моста в канатах верхнего ряда каждой из коробок у тротуаров. Выполнено вскрытие одежды ездового полотна и верхней плиты коробки до обнажения верхнего по высоте ряда канатов. Канаты освобождались со всех сторон от бетона омоноличивания. Расположение мест вскрытия в привязке к блокам коробок, номера канатов, доступных для измерения усилий, и длина вскрытия

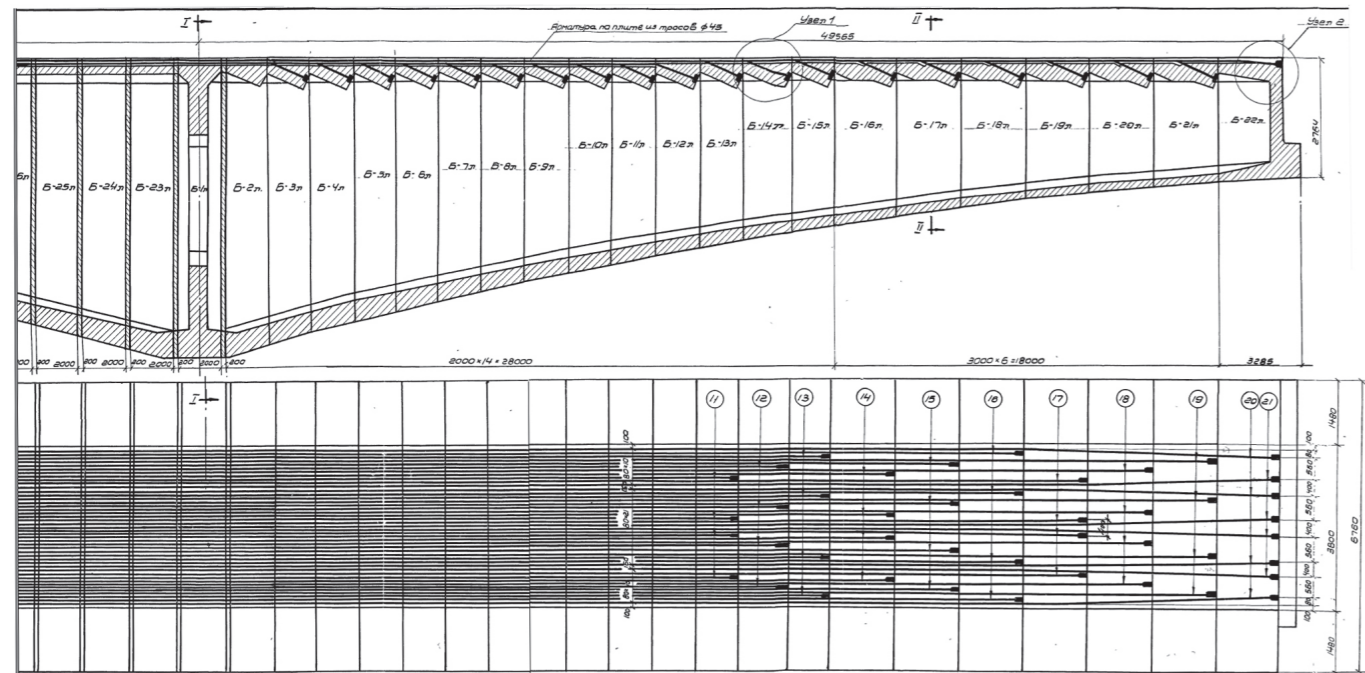


Рис.1 Общий вид "птичек" руслового пролета

(свободная длина каната) приведены в таблице 1. Маркировка блоков и нумерация канатов соответствуют обозначениям, принятым в проекте. Упоминание каната №19 в некоторых строках таблицы в одном вскрытии дважды объясняется его принадлежностью двум ветвям одной петли. В основном для коробок было по два вскрытия: в надпорном блоке Б1 и в блоке Б16, расположенном примерно в ¼ главного пролета. В верхней коробке над опорой 3 дополнительно вскрывалась ниша в блоке Б17, которая затем была объединена с нишей в блоке Б16 (рис. 1). Это позволило более подробно выполнить оценку усилия в канате №19 при различных длинах.

Непосредственное определение усилий на действующей конструкции невозможно, поэтому необ-

ходимо использовать косвенные методы. Промышленностью выпускаются приборы для измерения силы натяжения арматуры частотным методом в соответствии с ГОСТом 22362-77 «Конструкции железобетонные. Методы измерения силы натяжения арматуры». При определении усилия в прибор вводится длина и диаметр арматуры и производятся измерения частот колебаний арматуры. Однако данные приборы предназначены для измерения на арматуре диаметром не более 32–36 мм. С учетом того, что в нашем случае диаметр канатов составляет 45 мм, использовались специально разработанные методики статического и динамического способов измерений.

При статическом способе измерялись перемещения арматуры от

фиксированного усилия оттяжки. При динамическом измерялась частота свободных поперечных колебаний каната.

Измерения на вскрытых канатах производились в следующем порядке.

#### Статический способ

Фиксированные усилия оттяжки создавались с использованием нагрузочного стенда с ручным домкратом и цифрового силомера. Усилия оттяжки создавались до 500 кгс, измерение усилий выполнялось с точностью 0,5 кгс. Поперечные перемещения каната измерялись с помощью индикаторной головки с ценой деления 0,01 мм, закрепленной на неподвижной станине с регулируемой по высоте опорными стойками. Шток с подвижной шариковой опорой индикаторной головки упи-

рался в пластину, жестко прикрепленную к канату.

#### Динамический способ

С помощью одного или двух акселерометров, включенных в электронную измерительную систему на платформе MGCplus (фирма НВМ, ФРГ), производилось измерение ускорений каната при поперечных колебаниях. Длительность записей задавалась порядка двух-трех минут. Выполнялись записи реакции каната на поперечный удар небольшой силы. По записанным реализациям ускорений с помощью программного обеспечения Catman (фирма НВМ, ФРГ) строились спектры. Определялись частоты, соответствующие первым формам собственных колебаний. При использовании двух акселерометров можно было оценивать взаимное фазовое соотношение колебаний точек по длине каната и таким образом более надежно оценивать принадлежность частот формам собственных колебаний. Пример спектров приведен на рис. 2.

Данная методика записи и обработки колебаний канатов была ранее апробирована при определении уси-



Рис. 1. Вскрытие ветвей каната №19 на длине 5,2 м над опорой 3, верхняя коробка, блоки Б16 – Б17

лий в канатах вант мостовых сооружений частотным методом.

Решение задачи нахождения усилия натяжения каната  $N$  произ-

водилось с помощью конечно-элементной стержневой модели по программе Gerpro. Канат задавался как растянуто-изогнутый стержень постоянного сечения, длиной  $L$ , жестко заземленный по концам. При динамическом способе учитывались массы узлов крепления акселерометров.

Использовались следующие исходные данные. Площадь поперечного сечения каната  $A = 987,6 \text{ мм}^2$ . Модуль упругости  $E = 0,17 \text{ тс/мм}^2$ .

При оценке усилий в канате как при статическом, так и при динамическом способе, неопределенной является его изгибная жесткость. Представим момент инерции сечения каната  $I$  через его площадь  $A$  и радиус инерции. Радиус инерции каната, в свою очередь, представим произведением «эталонного» радиуса инерции  $r_0$  и коэффициента изгибной жесткости  $k$ :

$$I = A \cdot (k \cdot r_0)^2$$

Таким образом, будем оценивать степень включения отдельных проволок в работу сечения каната на изгиб с помощью коэффициента изгибной жесткости  $k$ . Для расчетов принят  $r_0 = 11,25 \text{ мм}$  – радиус инер-

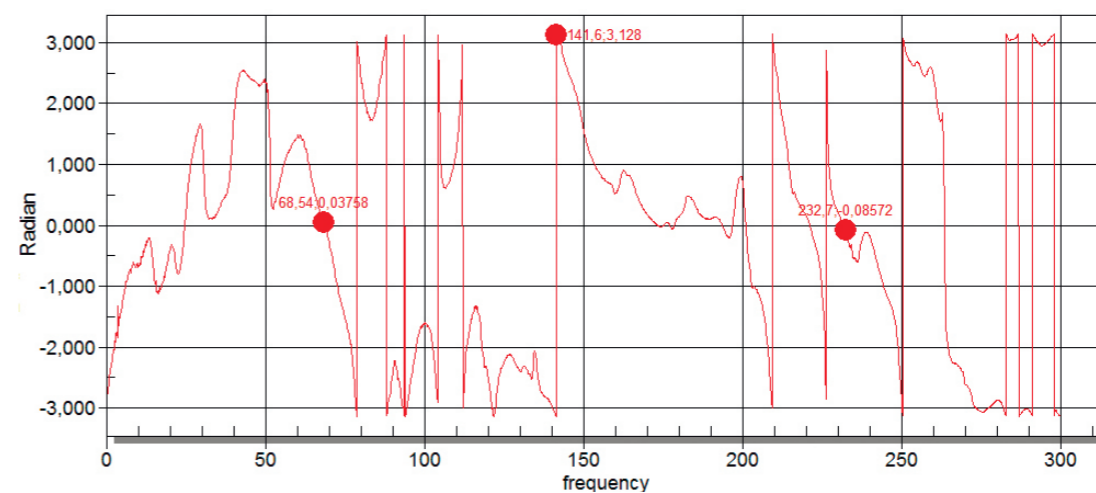
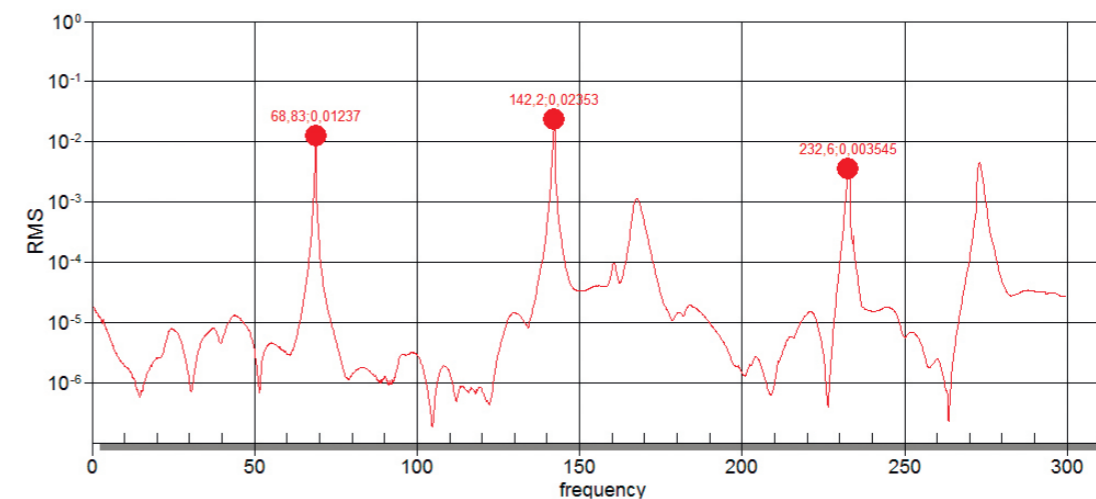


Рис. 2. Взаимные спектры сигнала ускорений каната №19 над опорой 3, верхняя коробка, длина каната 2,5 м

Таблица 1.

Места вскрытия плиты проезжей части и канаты, доступные для измерения усилий

Опора	Коробка	Номера блоков	Номера канатов	Длина, м
3	Верховая	Блок Б1	13; 19	1,7
		Блок Б16	19; 15; 19; 15	2,5
		Блок Б17	19; 19	1,7
		Блок Б16 – Б17	19; 19	5,2
3	Низовая	Блок Б1	16; 15	1,9
		Блок Б16	19; 15; 19	2,5
4	Верховая	Блок Б1	13; 12	2,4
		Блок Б16	19; 15; 16; 19	2,5
	Низовая	Блок Б1	13; 15	2,6
		Блок Б16	19; 15; 18; 19	2,6

Таблица 2.  
Усилия в канатах, тс

Опора	Коробка	Номер каната	Количество измерений	Среднее усилие	Min	Max
3	Верховая	13	1	74,0	74,0	74,0
		15	2	83,9	82,0	86,0
		19	7	86,6	80,0	93,0
	Низовая	15	2	77,3	70,0	84,0
		16	1	75,2	73,4	77,0
		19	2	81,7	79,5	85,0
4	Верховая	12	1	85,3	85,0	85,7
		13	1	95,2	95,0	95,3
		15	1	76,2	76,0	76,3
		16	1	90,4	89,8	91,0
		19	2	81,8	80,0	84,0
	Низовая	13	1	84,1	83,2	85,0
		15	2	99,5	97,8	101,4
		18	1	92,5	90,0	95,0
		19	2	91,3	90,5	92,0

ции стержня сплошного сечения диаметром, равным диаметру каната, 45 мм.

При динамическом способе подбором  $N$  и  $k$  находилось наилучшее приближение частот первой и второй форм свободных колебаний к частотам пиков в спектрах.

При статическом способе полученный из динамического расчета коэффициент  $k$  принимался увеличенным на 10%. Этим увеличением учитывалось снижение трения между проволоками при колебаниях каната по сравнению с трением при статическом воздействии на канат. Затем подбиралось усилие  $N$ , обеспечивающее перемещение каната в  $\frac{1}{2}$  его длины от приложенной нагрузки 500 кгс, равное перемещению, зафиксированному при испытаниях.

Полученные в результате экспериментов усилия  $N$  приведены в таблице 2. Количество измерений соответствует числу вскрытий различной длины и в различных местах по длине каната, в которых данный канат был доступен. Под измерением понимается определение усилия в канате статическим и динамическим методами, которое выполнялось по одному разу в нише вскрытия.

Таким образом, при испытаниях усилия в канатах были определены в различных местах по длине каната, при различных свободных длинах,

динамическим и статическим методами. Усилия в канатах составляют от 74 до 100 тс. Разница с усилием натяжения по проекту объясняется различными потерями: релаксацией напряжения в арматуре, обжатием бетона соседними канатами, ползучестью бетона, трением бетона о стенки канала, потерями в анкерах.

Результаты оценок по определению усилий в канате №19 верховой коробки над опорой 3 показаны на рис. 3. Отмечается достаточно хорошее соответствие результатов по статическому и динамическому способам.

Также отмечается зависимость результатов от свободной длины каната: некоторое возрастание усилия при увеличении длины. Возможно, это связано с перетеканием усилий с бетона плиты, окружающей канат, на сам канат при его вскрытии, с ростом усилия при приближении к анкеру вследствие потерь из-за трения и т. п.

Коэффициенты изгибной жесткости  $k$ , полученные при определении усилий, вошедших в таблицу 2, в зависимости от длины каната показаны на рис. 4. Во всех случаях  $k < 1$ , что подтверждает гипотезу о том, что канат не работает на изгиб единым сечением.

Оценим возможность использования аналитических методов при

вычислении усилия в канате, а также необходимость учета изгибной жесткости каната.

Из литературы (С. Тимошенко, Д. Х. Янг «Колебания в инженерном деле») известны выражения для собственных частот растянутой струны:

$$f_i = \frac{i}{2l} \sqrt{\frac{N}{m}} \quad (1),$$

и для растянутого свободно опертого стержня:

$$f_i = \frac{i}{2l} \sqrt{\frac{N}{m} + \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \frac{EI}{m}} \quad (2).$$

В формулах приняты обозначения:

- $i$  – порядковый номер формы свободного колебания;
- $f_i$  – частота колебаний;
- $l$  – длина струны (стержня);
- $I$  – момент инерции сечения;
- $m$  – масса единицы длины каната;
- $E$  – модуль упругости каната;
- $N$  – осевое усилие.

Несоответствия аналитических моделей условиям, учитываемым при расчете численным методом, заключаются в пренебрежении изгибной жесткостью:  $EI = 0$  (формула 1), и в шарнирном концевом закреплении вместо жесткого закрепления (формула 2).

При известной первой частоте собственных колебаний можно

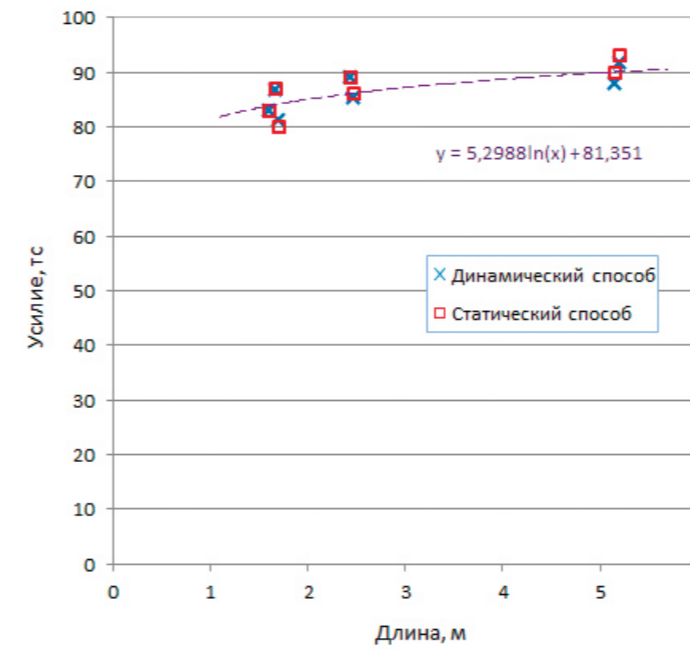


Рис. 3. Оценки усилий в канате №19 в зависимости от свободной длины

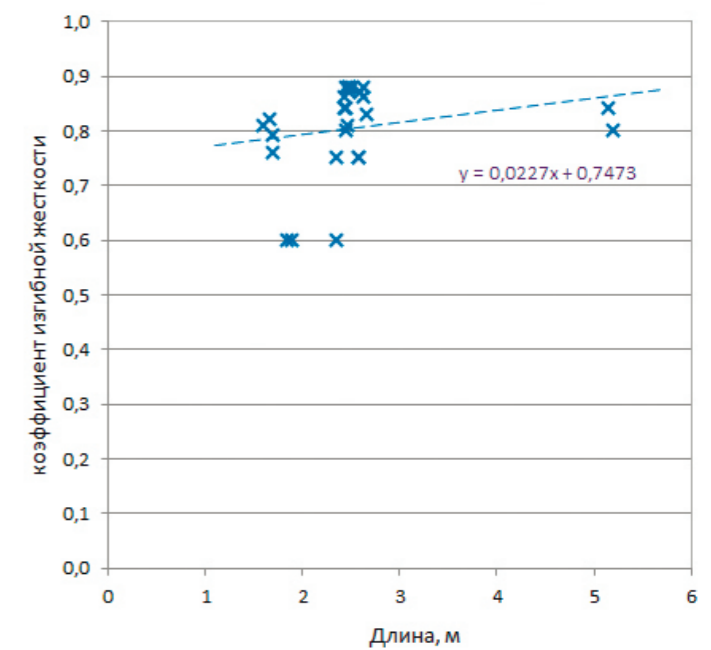


Рис. 4. Коэффициент изгибной жесткости  $k$  в зависимости от свободной длины каната

получить выражение для усилия в струне:

$$N_I = (2lf_1)^2 m \quad (3),$$

и в растянутом, свободно опертом стержне:

$$N_{II} = (2lf_1)^2 m - \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 EI \quad (4).$$

Были выполнены численные эксперименты по сравнению результатов численного и рассмотренных аналитических методов. Длины канатов задавались от 1,5 до 20 м. Коэффициент изгибной жесткости был принят  $k = 0,8$ . Расчетом каната по численной методике на усилия натяжения  $N_0 = 60$  и  $N_c = 100$  тс были получены частоты первых форм свободных колебаний  $f_1$ .

Затем по формулам (3) и (4) были получены аналитические оценки усилия в канате  $N_I$  и  $N_{II}$  с использованием  $f_1$  и при неизменности остальных параметров.

В таблице 3 показаны результаты вычислений. Видно, что формула растянутого, свободно опертого стержня на длине 1,5 м дает ошибку 61% при  $N = 60$  тс и 42% при  $N = 100$  тс. При увеличении длины ошибка уменьшается. Для снижения ошибки до 2–3% длина участка каната должна быть около 20 м. Формула струны дает несколько большие ошибки по сравнению с формулой растянутого, свободно опертого стержня.

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. С использованием численного метода установлены усилия в канатах: от 74 до 100 тс, коэффициенты изгибной жесткости: от 0,6 до 0,9.

2. Усилия, полученные статическим и динамическим способами, дают близкие результаты.

3. Использование моделей без учета заделки концов каната в бетон при длине вскрытия до 10 м дает существенно завышенные оценки усилия.

4. При учете в расчетной модели заделки концов каната длина вскрытия может составлять от 1,5 до 2 м.

Таблица 3.  
Результаты вычисления усилий

№ п/п	l, м	$N_0$ , тс	$f_1$ , Гц	$N_I$ , тс	$N_{II}$ , тс	Ошибка $N_I$ , %	Ошибка $N_{II}$ , %
1	1,5	60	113,0	102	96	71	61
2	2,0	60	78,4	88	84	46	40
3	2,5	60	60,0	80	78	34	30
4	5,0	60	27,7	69	68	14	13
5	10,0	60	13,4	64	64	6,5	6,3
6	20,0	60	6,59	62	62	3,1	3,0
7	1,5	100	135,9	148	142	48	42
8	2,0	100	96,3	132	129	32	29
9	2,5	100	74,7	124	122	24	22
10	5,0	100	35,2	111	110	11	10
11	10,0	100	17,2	105	105	4,9	4,8
12	20,0	100	8,47	102	102	2,4	2,3