

Проф. М. И. Евдокимов-Рокотовский



ЗАГАДОЧНЫЙ СЛУЧАЙ
РАЗРУШЕНИЯ ФЕРМЫ МОСТА
пролетом 123,75 метра.



ТОМСК

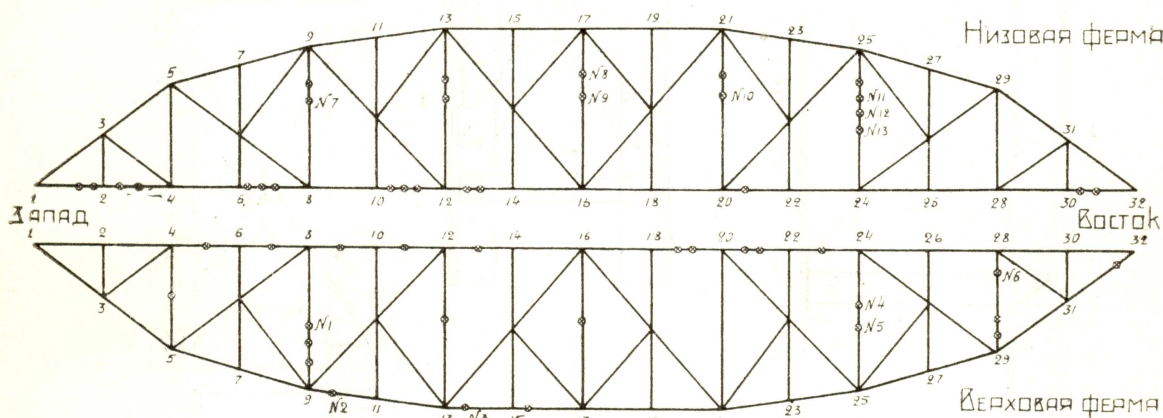
1929

Загадочный случай разрушения фермы моста пролетом 123,75 мтр.

На одной из жел. дор. линий С.С.С.Р. на переходе через реку, впадающую в Большое Озеро, расположен мост пролетом 123,75 м. (58 с).

Ферма моста за последние годы дала ряд загадочных трещин. Волосяные трещины в небольшом количестве были впервые замечены еще в 1918 году. Однако, им не придали тогда какого-либо значения. При осмотре ферм моста весной 1925 года трещины было насчитаны уже в количестве 13 штук. Некоторые из них достигали ширины 0,3 мм. Осенью 1926 года при самом тщательном осмотре фермы моста трещин насчитали до 52 штук.

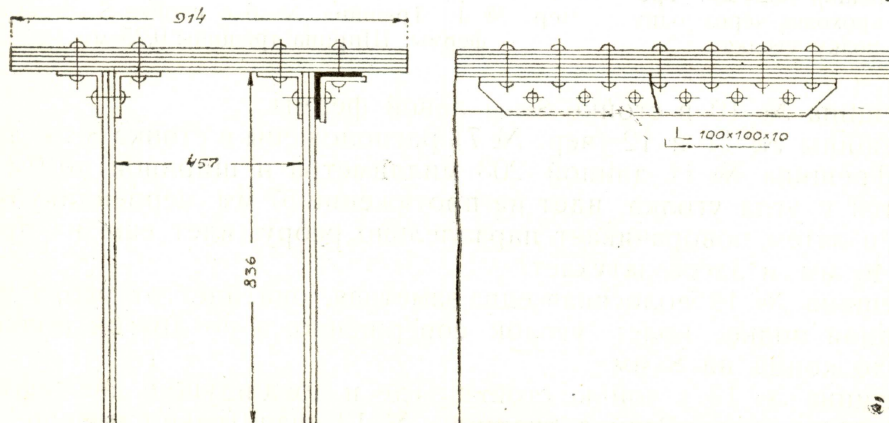
Трещины, замеченные и, так сказать, зарегистрированные весной 1925 года в количестве 13 штук, схематически размечены на прилагаемом чертеже (чер. № 1).



Чер. № 1. Схема моста с показанием мест расположения 52 трещин. Занумерованные тринадцать трещин обнаружены весной 1925 г.

Трещина № 1 в стойке S₈₋₉ с западной стороны правой фермы едва заметная, проходит только через часть уголка, начиная от ребра.

Трещина № 2 в уголке верхнего пояса O₉₋₁₁ правой фермы. Ширина трещины около 0,1 мм. Трещина проходит через весь уголок.



Чер. № 2. Трещина № 3 в уголке верхнего пояса O₁₃₋₁₅. Ширина трещины 0,3 мм. Трещина проходит через весь уголок.

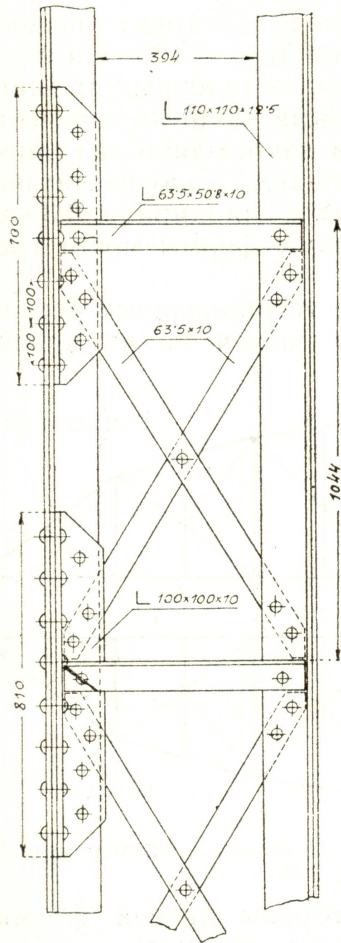
Трещина № 3 так же в уголке верхнего пояса O_{13-15} правой же фермы, но ширина ее немного более и доходит до 0,3 мм. (чер. № 2). Трещина проходит через весь уголок.

Трещины № 4 и № 5 в стойке S_{24-25} правой фермы (чер. № 3). Трещины через одну полку уголка.

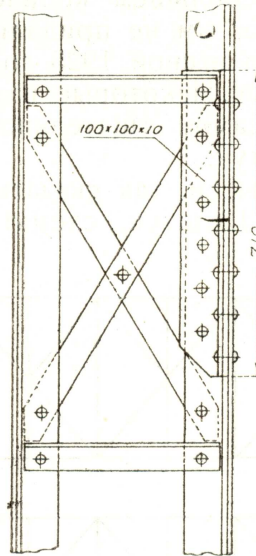
Трещина № 6 в стойке S_{28-29} правой фермы. (чер. № 4).

Трещина № 7 в стойке S_{8-9} в левой ферме (чер. № 5).

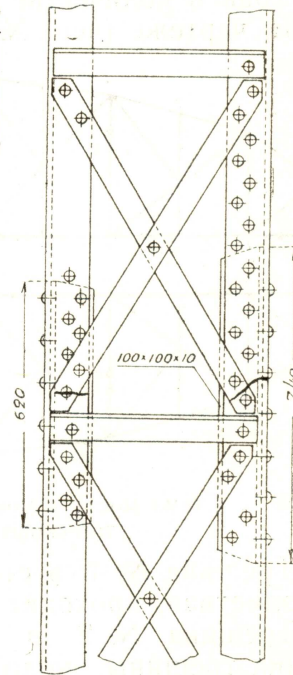
Трещина № 8 и 9 в стойке S_{16-17} левой фермы (чер. № 6).



Чер. № 3 Трещины № 4 и № 5 в стойке S_{24-25} . Ширина трещин 0,2 мм. Трещины проходят через одну полку уголка.



Чер. № 4. Трещина № 6 в стойке S_{28-29} правой фермы. Ширина трещины 0,25 мм.



Трещина № 10 в стойке S_{20-21} левой фермы.

Трещины № 11 и 12 (чер. № 7) расположены в стойке S_{24-25} левой фермы. Трещина № 11 длиной 203 миллиметра и шириной до 0,3 мм. начинается у угла уголка, идет на протяжении 57 мм. перпендикулярно к ребру и затем поворачивает параллельно ребру, идет еще на протяжении 146 мм. и здесь затухает.

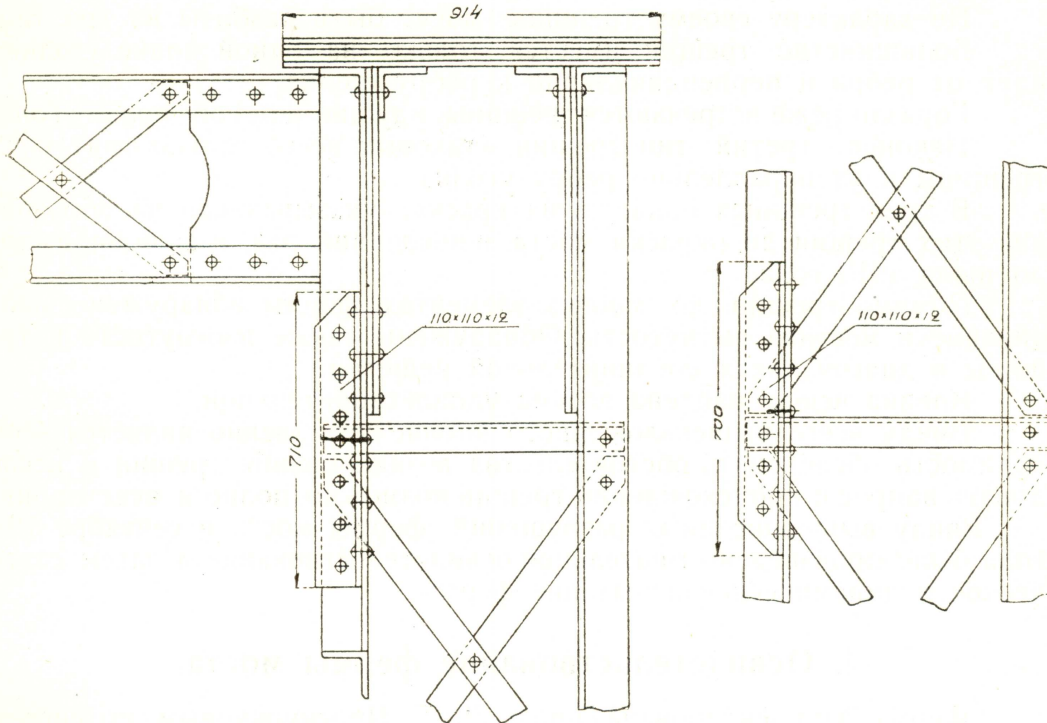
Трещина № 12 волосная едва заметная, она идет от ребра уголка по одной полке, колет уголок совершенно, а по другой полке не доходит до конца на 8 мм.

Трещина № 13 в той же стойке, где и предыдущие две трещины, но немного ниже их. Размер трещины № 13 значительно меньше.

Ввиду такого разрушения фермы моста уже весной 1925 года явилось опасение за целостность и сохранность сооружения. Первым меро-

приятием было то, что все 13 замеченных тогда трещин перекрыли накладками на заклепках подобно тому, как обычно перекрывают стыки.

Осенью 1926 г. при самом тщательном осмотре моста насчитали трещин до 52 штук.



Чер. № 5. Трещина № 7 в стойке S16-17 левой фермы. Ширина трещины 0,3 мм. идет от ребра уголка, через одну палку.

Вот окончательный список известных и, так сказать, зарегистрированных трещин моста (сентябрь 1926 г).

Верховая (южная) ферма:

Нижний пояс: в поясных уголках — U₄₋₆, U₆₋₈, U₈₋₁₀, U₁₀₋₁₂, U₁₂₋₁₄, U₁₈₋₂₀ (две трещины), U₂₀₋₂₂ (две трещины), U₂₂₋₂₄.

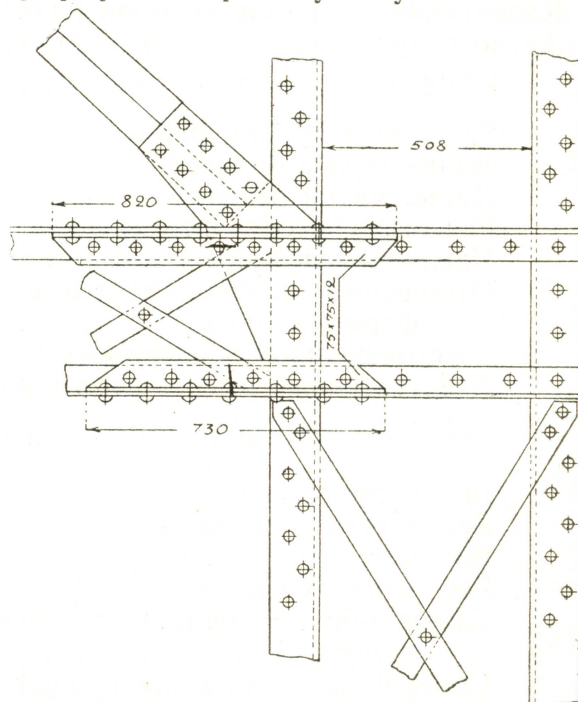
Верхний пояс: в поясных уголках — O₉₋₁₁, O₁₃₋₁₅, O₁₅₋₁₇, O₃₁₋₃₂.

Стойки: в основных уголках — S₄₋₅, S₈₋₉ (три трещины), S₁₂₋₁₃, S₁₆₋₁₇, S₂₄₋₂₅ (две трещины), S₂₈₋₂₉ (три трещины).

Итого в Верховой (южной) ферме 25 трещин.

Низовая (северная) ферма:

Нижний пояс: в поясных уголках — U₀₋₂ (две трещины), U₂₋₄ (две трещины), U₆₋₈ (три трещины) U₁₀₋₁₂ (три трещины), U₁₂₋₁₄ (две трещины), U₂₀₋₂₂, U₃₀₋₃₂ (две трещины).



Чер. № 6. Трещина № 8 и № 9 в стойке S16-17 левой фермы. Трещины находятся в связях, идущих от стойки. Вид со стороны восточного устоя моста.

Стойки: в основных уголках — S₈₋₉ (две трещины), S₁₂₋₁₃ (две трещины) S₁₆₋₁₇ (две трещины), S₂₀₋₂₁ (две трещины) S₂₄₋₂₅ (четыре трещины).
Итого в Низовой (северной) ферме 27 трещин.

А всего 52 трещины.

По характеру своему трещины могут быть разбиты на три типа. Большинство трещин имеется только на одной полке уголка и идут от ребра и перпендикулярно к ребру уголка.

Гораздо реже встречаются трещины, идущие через обе полки уголка.

Наконец, третий тип трещин (таковых всего только три), когда трещины идут параллельно ребру уголка.

В трех трещинах обнаружена краска, указывающая на образование этих трещин до окраски моста, в последний раз, т. е., повидимому, до июля 1915 года.

Помимо трещин во многих элементах фермы обнаружено выпучивание и местная выгнутость. Обнаружены также изогнутость и трещины в диагональках соединительной решетки.

Клепка всюду найдена весьма удовлетворительной.

Ввиду всего вышеизложенного вполне естественно является необходимость обследовать обстоятельства возникновения трещин и исследовать вопрос о происхождении трещин возможно полно и всесторонне.

Ввиду вышеописанных разрушений фермы моста в сентябре 1926 года было произведено тщательное освидетельствование, а затем статическое и динамическое испытание фермы.

1. Освидетельствование фермы моста.

Ферма запроектирована проф. Л. Д. Проскураковым по системе Шведлера и рассчитана по нормам подвижной ж. д. нагрузки 1896 г. Проект фермы моста, как тип, был в свое время принят для Витебск-Жлобинской ж. д., для которой он был утвержден Комитетом Управления по сооруж. ж. д. 9 марта 1900 г. за № 214.

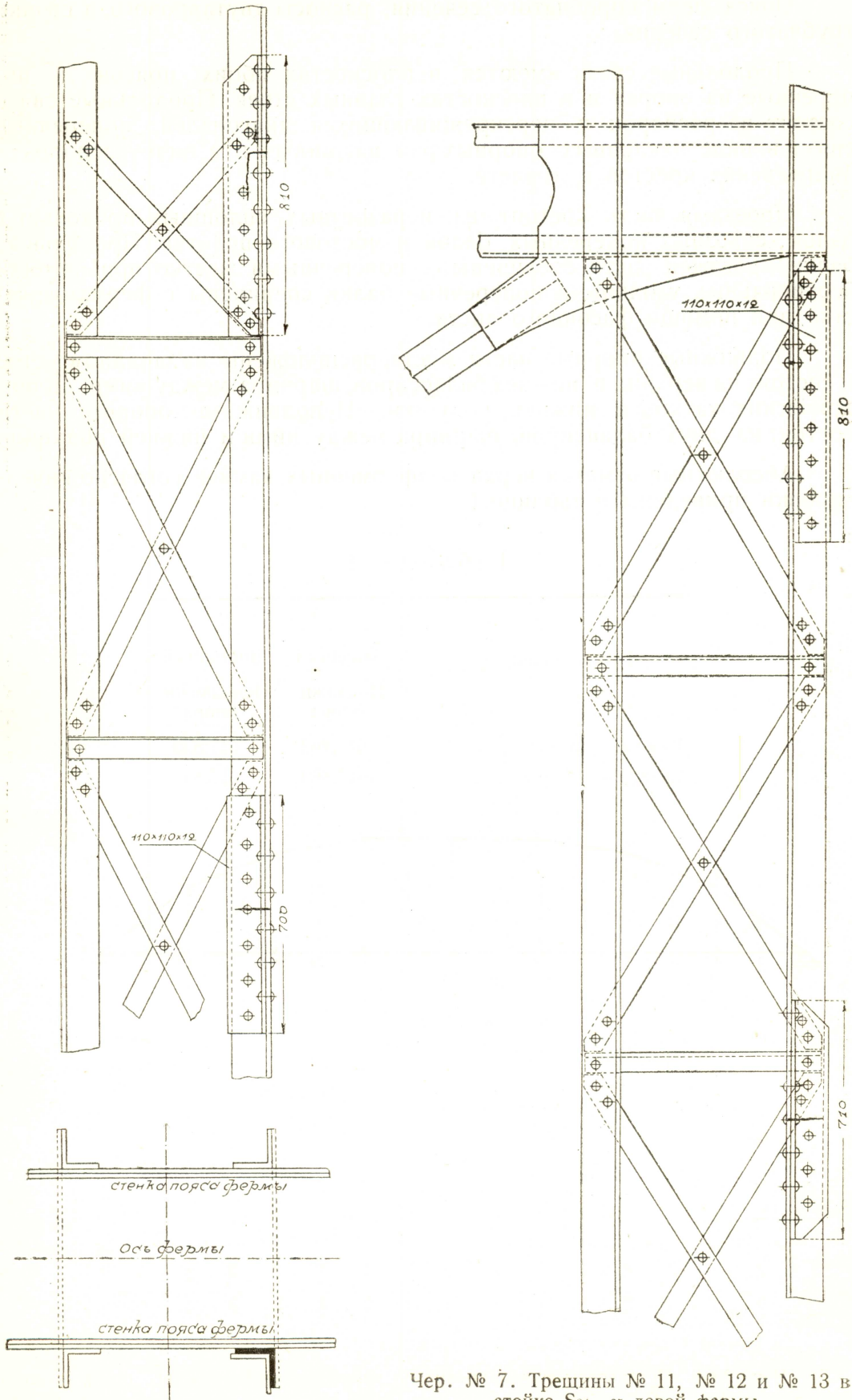
Главнейшие размеры фермы таковы:

Расчетный пролет фермы	126,796 м = 416'
Длина большой панели	15,850 м = 52'
Длина малой панели	7,925 м = 26'
Расчетная высота фермы по середине	18,897 м = 62'
Число панелей	16
Отношение наибольшей расчетной высоты фермы к пролету	1:6,71
Расстояние между осями ферм	7,010 м = 23'
Действительная высота фермы посредине	19,297 м = 63' 3,75''
Строительный подъем 0,4 м. что составляет $\frac{1}{3170}$ от пролета.	
Вес ферм со связями	504,667 tn = 30807,86 пд.
Вес металла проезжей части	108,981 tn = 6652,85 пд.
Вес перил	3,409 tn = 208,05 пд.
Вес опорных частей	17,768 tn = 1084,67 пд.
Таким образом общий вес металла в мосту	634,825 tn = 38753,43 пд.

Согласно проекта и продольного профиля пути мост должен быть расположен на прямой и на горизонтальной площадке.

Освидетельствование и обмер ферм моста дал следующие данные:

Полная длина пролетного строения моста по проезжей части по измерению в натуре равна 128,60 м.



Чер. № 7. Трещины № 11, № 12 и № 13 в стойке S₂₄₋₂₅ левой фермы.

Пояса ферм коробчатого сечения, раскосы двутаврового, а стойки трубчатого сечения.

Продольные связи имеются в плоскостях обоих поясов, а поперечные на опорах и в плоскостях главных стоек. Продольные связи состоят из распорок и перекрещивающихся диагоналей, поперечные связи в виде наклонных опорных рам на опорах и в виде распорок и андреевских крестов в пролете.

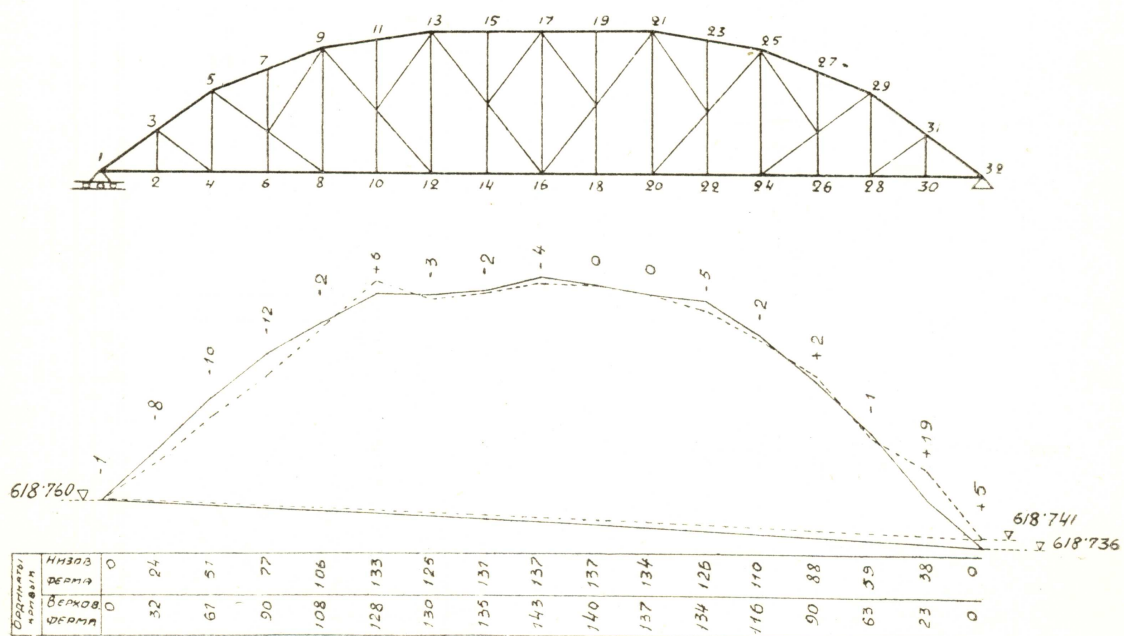
Проезжая часть состоит из неразрезных сплошных продольных балок, сквозных поперечных балок и мостового полотна. Продольные балки проезжей части соединены с поперечными жестко при помощи вертикальных уголков, а поперечные балки соединены с фермами жестко при помощи фасонного листа.

Подвижные опорные части моста расположены на западном устое и состоят из верхних и нижних балансиров, шарнира между ними, цилиндрических катков и нижней подушки.—Неподвижные опорные части состоят из двух балансиров, шарнира между ними и нижней подушки.

Абсолютные отметки верха подферменных камней согласно нивелировки приведены в таблице I.

Таблица I.

Подферменники	Устои	
	Западный	Восточный
	Подвижн. опора	Неподвижн. опора
Южный (правый)	617,862	617,830
Северный (левый)	617,860	617,841



Чер. № 8. Результаты нивелировка по верхнему листу нижнего пояса.

Таким образом подферменные площадки оказались не на одной высоте, в результате чего получается расположение моста не на горизонтальной площадке и кроме того в натуре имеется перекося ферм.

Затем, была произведена нивелировка по узлам главных ферм по верхней грани первых горизонтальных листов нижнего пояса. Во время нивелировки температура воздуха была $+8^{\circ}$ С. Погода была дождливая, небо было сплошь (в 100%) покрыто облаками. Рейки при нивелировке были простые, не складные, без уравний.

Результаты нивелировки сведены в таблице II и представлены графически (чер. № 8)

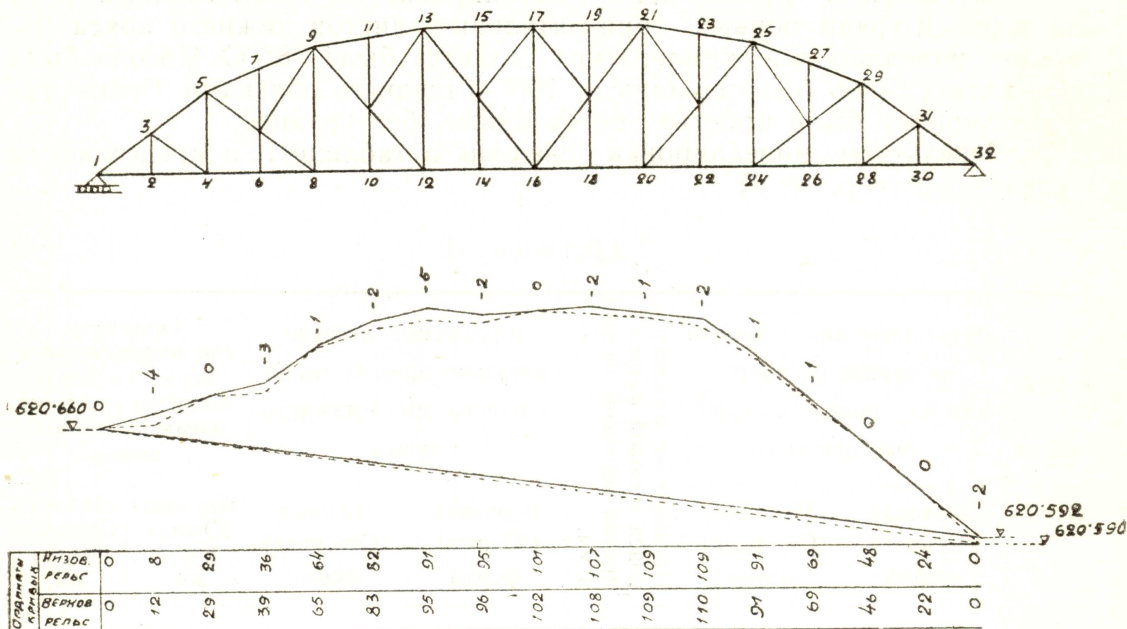
Таблица II.

№№ узлов фермы	Результаты нивелировки по верхнему листу нижнего пояса (абсолют- ные отметки)		Превышение нижнего пояса низовой фермы против верховой фермы в мм.	Абсолютные отметки идеально прямой линии верхнего листа нижнего пояса		Ординаты (по нивелировке) верхнего листа нижнего пояса от идеально прямой линии	
	Верховая (Южная) ферма	Низовая (Северная) ферма		Верховая (Южная) ферма	Низовая (Северная) ферма	Верховая Южная ферма мм.	Низовая Северная ферма мм.
0	618,760	618,759	- 1	618,760	618,759	0	0
1	618,791	618,783	- 8	618,758	618,758	33	25
2	618,819	618,809	- 10	618,757	618,757	62	52
3	618,846	618,834	- 12	618,755	618,756	91	78
4	618,863	618,861	- 2	618,754	618,755	109	106
5	618,871	618,877	+ 6	618,752	618,754	129	123
6	618,881	618,878	- 3	618,751	618,753	130	125
7	618,885	618,883	- 2	618,750	618,752	135	131
8	618,891	618,887	- 4	618,748	618,750	143	137
9	618,886	618,886	0	618,746	618,749	140	137
10	618,882	618,882	0	618,745	618,748	137	134
11	618,878	618,873	- 5	618,744	618,747	134	126
12	618,858	618,856	- 2	618,742	618,746	116	110
13	618,831	618,833	+ 2	618,741	618,745	90	88
14	618,803	618,802	- 1	618,739	618,743	64	59
15	618,761	618,780	+19	618,738	618,742	23	38
16	618,736	618,741	+ 5	618,736	618,747	0	0

Таким образом на основании нивелировки оказалось, что, вопреки проекта и продольного профиля, мост расположен не на горизонтальной площадке, а с уклоном с запада на восток.

Наибольшая разница в отметках опорных точек в поперечном направлении 5 мм., именно: восточный конец верховой фермы ниже такого же конца низовой фермы.

Для выяснения продольного профиля рельсового пути, таковой был пронивелирован по головкам рельса. Результаты нивелировки сведены в таблицу III и представлены графически (чер. № 9).



Чер. № 9. Результаты нивелировки по головке рельса.

Таблица III.

	Результаты нивелировки по головке рельса. В абсолютных отметках		Превышение нивелировки нитки против верховой нитки в мм.	Теоретическое положение головки рельса. В абсолютных отметках		Ординаты (по нивелировке) головки рельса против теоретического положения	
	Верховая (южная) нитка	Низовая (северная) нитка		Верховая (южная) нитка	Низовая (северная) нитка	Верховая (южная) нитка мм.	Низовая (северная) нитка мм.
0	620,660	620,660	0	620,660	620,660	0	0
1	620,668	620,664	-4	620,656	620,654	12	10
2	620,681	620,681	0	620,652	620,652	29	29
3	620,686	620,683	-3	620,647	620,647	39	36
4	620,708	620,707	-1	620,643	620,643	65	64
5	620,722	620,720	-2	620,639	620,638	83	82
6	620,730	620,725	-5	620,635	620,634	95	91
7	620,727	620,725	-2	620,631	620,630	96	95
8	620,727	620,727	0	620,626	620,626	101	101
9	620,730	620,728	-2	620,622	620,621	108	107
10	620,726	620,725	-1	620,617	620,616	109	109
11	620,723	620,721	-2	620,613	620,612	110	109
12	620,700	620,699	-1	620,609	620,608	91	91
13	620,674	620,673	-1	620,605	620,604	69	69
14	620,647	620,647	0	620,601	620,599	46	48
15	620,618	620,618	0	620,596	620,594	22	24
16	620,592	620,590	-2	620,592	620,590	0	0

Строительная высота пролетного строения, будучи замерена стальной лентой, оказалась равной:

На подвижной опоре 2800 2800 мм.

На неподвижной опоре 2750 2760 мм.

Был выяснен вопрос о том, насколько сохранился строительный подъем фермы. Из чер. № 8 видно, что кривые строительного подъема фермы имеют удовлетворительное очертание, а именно величины подъема по середине пролета равны:

Для низовой (северной) фермы 137 мм. или $\frac{1}{925} l$.

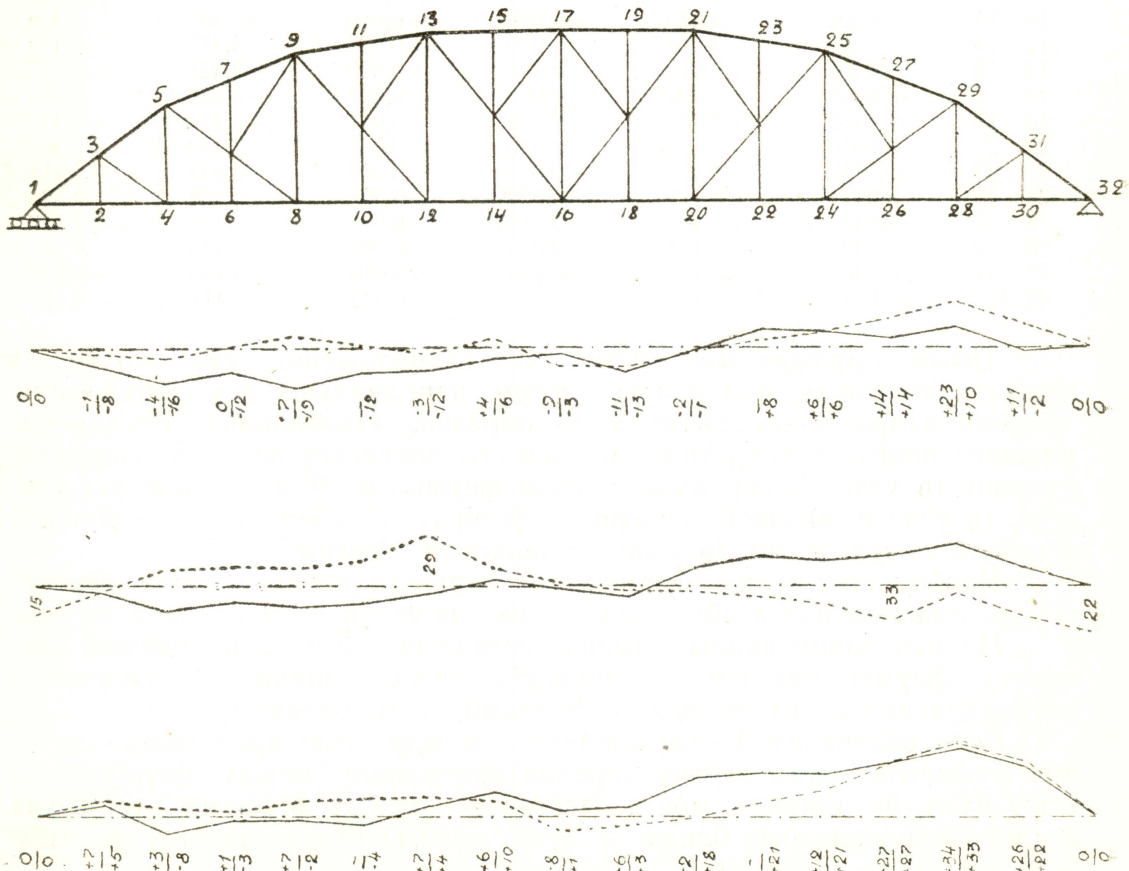
Для верховой (южной) фермы 143 мм. или $\frac{1}{886} l$.

Это должно быть признаком нормальным, иначе говоря, строительный подъем сохранился.

Затем, были определены величины подъемов ферм и рельсового пути по середине пролета и максимально. Результаты получились таковые: (чер. № 9).

Для низовой (северной) нитки рельса для середины пролета моста 101 мм. или $\frac{1}{1252} l$.

Для верховой (южной) нитки рельса для середины пролета моста 102 мм. или $\frac{1}{1242} l$.



Чер. № 10. Расположение ферм и рельсового пути в отношении геометрич. оси моста.

Максимальное же возвышение рельс оказалось не по середине и было равно:

Для низовой (северной) нитки рельса 109 мм. или $\frac{1}{1160}$ l.

Для верховой (южной) нитки рельса 110 мм. или $\frac{1}{1150}$ l.

Наконец были произведены измерения расположения ферм и рельсового пути в отношении геометрической оси моста. Теоретическая ось была разбита по опорным рамам ферм моста, затем произведены замеры в отношении каждого узла фермы как северной (низовой), так и южной (верховой). Разбивка осей произведена для нижнего пояса нивелиром Цейса, а для верхнего—пояса теодолитом Герляха. Результаты этих измерений приведены в таблице и изображены графически на чертеже (черт. № 10).

Таблица IV.

		Низовая (северная) ферма		Ось верхнего пояса	Ось рельсового пути	Верховая (южная) ферма	
		Нижний пояс	Верхний пояс			Нижний пояс м.	Верхний пояс м.
1	1	+3,411	+3,411	0	-0,015	-3,411	-3,411
2	3	+3,403	+3,410	-0,03	-0,003	-3,416	-3,419
4	5	+3,395	+3,407	-0,020	-0,008	-3,403	-3,414
6	7	+3,399	+3,411	-0,008	+0,009	-3,408	-3,412
8	9	+3,392	+3,418	-0,011	+0,008	-3,409	-3,418
10	11	+3,399	+3,413	-0,008	+0,010	-3,407	-3,418
12	13	+3,399	+3,408	-0,006	+0,023	-3,415	-3,418
14	15	+3,405	+3,415	+0,002	+0,009	-3,421	-3,417
16	17	+3,408	+3,402	-0,001	+0,001	-3,412	-3,403
18	19	+3,398	+3,400	-0,004	-0,001	-3,414	-3,405
20	21	+3,410	+3,409	+0,015	-0,001	-3,429	-3,409
22	23	+3,419	+3,417	+0,023	-0,002	-3,444	-3,418
24	25	+3,417	+3,417	+0,020	-0,008	-3,438	-3,423
26	27	+3,425	+3,425	+0,014	-0,019	-3,432	-3,438
28	29	+3,421	+3,434	+0,020	-0,004	-3,445	-3,445
30	31	+3,409	+3,422	+0,009	-0,016	-3,433	-3,437
32	32	+3,411	+3,411	0	-0,022	-3,411	-3,411

Таким образом мы видим, что расположение осей верхнего и нижнего поясов правой и левой ферм неправильно: вся ферма в продольном направлении выгнута S—образно.—Наибольшее отклонение нижнего пояса от теоретической оси его достигает 33 мм. в северную сторону (в узле 23 верховой южной фермы) и 19 мм. в южную сторону (в узле 8 низовой северной фермы)—Наибольшее отклонение верхнего пояса 34 мм. (в узле 29 верховой фермы).

Наибольшая величина смещения верхнего пояса в плане относительно нижнего пояса достигает 26 мм. для узлов 8—9 низовой фермы.

На основании данных замера геометрического расположения элементов фермы имеется возможность учесть влияние отступления в распределении нагрузок между фермами от теоретического.

Если обозначим Δ —расхождение между осью пролетного строения (геометрическим местом середин расстояний между фермами) и осью пути, b —ширина моста расстояние между фермами, то тогда ферма, расположенная ближе к пути, должна будет принять на себя большую долю нагрузки.

Максимальное расхождение согласно замера

$$\Delta_{\max} = 33 \text{ мм.}$$

$$b = 7,010 \text{ мм.}$$

$$\frac{\frac{b}{2} + \Delta}{b} - \frac{1}{2} \cdot 100 = 0,954\%.$$

$$\frac{1}{2}$$

Таким образом величина перегрузки получается весьма незначительной.

Определение геометрической правильности отдельных элементов фермы дало следующие результаты.

Таблица V.

Верховая ферма				Низовая ферма			
Название элемента фермы	Абсолютный размер деформации м	Отношение к длине	Направление выгнутия	Название элемента фермы	Абсолютный размер деформации м	Отношение к длине	Направление выгнутия
0 ₁ -3	—	—	—	0 ₁ -3	—	—	—
0 ₃ -5	—	—	—	0 ₃ -5	—	—	—
0 ₅ -7	0,018	$\frac{1}{467}$	внутр.	0 ₅ -7	0,007	$\frac{1}{1203}$	внутр.
0 ₇ -9	0,008	$\frac{1}{1055}$	наруж.	0 ₇ -9	0,010	$\frac{1}{842}$	внутр.
0 ₉ -11	0,003	—	S обр.	0 ₉ -11	0,006	—	S обр.
0 ₁₁ -13	0,008	$\frac{1}{1000}$	наруж.	0 ₁₁ -13	0,008	$\frac{1}{1000}$	S обр.
0 ₁₃ -15	0,011	$\frac{1}{720}$	наруж.	0 ₁₃ -15	0,005	$\frac{1}{1587}$	S обр.
0 ₁₅ -17	0,012	$\frac{1}{660}$	наруж.	0 ₁₅ -17	0,012	$\frac{1}{660}$	наруж.
0 ₁₇ -19	0,017	$\frac{1}{466}$	наруж.	0 ₁₇ -19	0,005	$\frac{1}{1587}$	наруж.
0 ₁₉ -21	0,006	$\frac{1}{1132}$	S обр.	0 ₁₉ -21	0,008	$\frac{1}{992}$	наруж.
0 ₂₁ -23	0,006	$\frac{1}{1333}$	обр.	0 ₂₁ -23	0,014	$\frac{1}{571}$	наруж.
0 ₂₃ -25	0,004	$\frac{1}{2000}$	внутр.	0 ₂₃ -25	0,012	$\frac{1}{665}$	наруж.
0 ₂₅ -27	0,010	$\frac{1}{842}$	S обр.	0 ₂₅ -27	0,010	$\frac{1}{842}$	S обр.
0 ₂₇ -29	0,006	$\frac{1}{1403}$	наруж.	0 ₂₇ -29	0,003	$\frac{1}{1910}$	наруж.
0 ₂₉ -31	—	—	—	0 ₂₉ -31	—	—	—
0 ₃₁ -32	—	—	—	0 ₃₁ -32	—	—	—

Таблица VI.

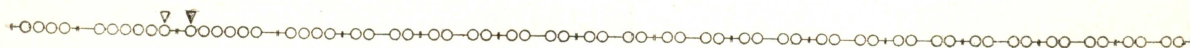
Верховая (южная) ферма				Низовая (северная) ферма			
Название элемента фермы	Абсолютный размер деформации м.	Отношение к длине	Направление выгнутия	Название элемента фермы	Абсолютный размер деформации м.	Отношение к длине	Направление выгнутия
V ₄₋₅	0,014	$\frac{1}{783}$	На восток	V ₄₋₅	0,007	—	На запад
	0,008	—	во внутрь		0,018	$\frac{1}{609}$	Во внутрь
V ₈₋₉	0,005	$\frac{1}{2200}$	На запад	V ₈₋₉	0,008	$\frac{1}{1372}$	
V ₁₂₋₁₃	0,009	$\frac{1}{1220}$	—	V ₁₂₋₁₃	0,011	$\frac{1}{1100}$	—
V ₁₆₋₁₇	—	—	—	V ₁₆₋₁₇	—	—	
V ₂₀₋₂₁	0,003	$\frac{1}{1118}$	На запад	V ₂₀₋₂₁	0,003	—	—
	0,007				0,008		
	0,007				0,005		
V ₂₄₋₂₅	0,005	$\frac{1}{1565}$	На восток	V ₂₄₋₂₅	0,008	$\frac{1}{1370}$	На запад
	0,007				0,005		

Таблица VII.

Верховая (южная) ферма				Низовая (северная) ферма			
Название элемента фермы	Абсолютный размер деформации м.	Отношение к длине	Направление выгнутия	Название элемента фермы	Абсолютный размер деформации м.	Отношение к длине	Направление выгнутие
D ₁₃₋₁₅	0,008	$\frac{1}{1578}$	Наружу.	D ₁₃₋₁₅	0,003	$\frac{1}{2528}$	Внутрь
	0,007				0,005		
D ₁₆₋₂₁	0,015	$\frac{1}{841}$	Наружу.	D ₁₆₋₂₁	0,012	$\frac{1}{1052}$	Внутрь
	0,015				0,0 5		
						$\frac{1}{841}$	

II. Статическое испытание моста.

Статическое испытание ферм моста произведено 5—6 сентября 1926 г. поездом по схеме:



Испытание заключалось в следующих измерениях:

1. Вертикальный прогиб обеих ферм.
2. Продольные перемещения подвижного конца обеих ферм.
3. Напряжения в отдельных элементах ферм.

Испытание произведено при солнечной погоде. Температура $+20^{\circ}$ С.
Скорость ветра NOO —около 0,7 мтр./сек.

Вертикальные прогибы обеих ферм измерялись прогибомерами сист. Френкеля и Клебша.

Упругий прогиб при статическом испытании равнялся:

Для верховой (южной) фермы 39,2 мм. или $\frac{1}{3230} l$

Для низовой (северной) фермы 38,5 мм. или $\frac{1}{3230} l$

Теоретический упругий прогиб рассчитываем по известной формуле Фаермана.

$$f = \alpha \frac{Pl^3}{h^3}$$

где P —эквивалентная нагрузка для изгибающего момента по середине пролета в тоннах на пог. мтр. для одной фермы.

l —расчетный пролет в мтр.

h —расчетная высота фермы по середине пролета в мтр.

α —численный коэффициент, равный

0,0036 для мостов с треугольной и шипенгельной решеткой, рассчитанных по нормам 1896 и 1907 г.

0,0025 для мостов многорешетчатых и многораскосных.

0,0030 для мостов многорешетчатых и многораскосных, рассчитанных по нормам 1896 г., но построенных после 1901 г., т. е. с учетом повышенного допускаемого напряжения металла.

При $\alpha = 0,0030$ $P = \frac{6,74}{2}$ тонны пог. мтр.

$l = 126,796$ мтр. $h = 18,897$ мтр.

Имеем: $f = 57,4$ мм. или $\frac{1}{2210} l$

Таким образом конструктивная поправка (т. е. отношение действительного прогиба к теоретическому) будет равна:

Для верховой (южной) фермы 0,68

Для низовой (северной) фермы 0,67

Те же измерения, будучи приведены к расчетному поезду 1925 Н, дают абсолютный прогиб:

Для верховой фермы 67,1 мм. или относит. прогиб $\frac{1}{1881} l$

Для низовой фермы 65,9 мм. или $\frac{1}{1925} l$

Допускаемый же по нормам НКПС абсолютный прогиб равен 84,3 мм. относительный прогиб $\frac{1}{1500} l$

Т а б л и
Ведомость результатов измерения напря

Название элементов		O ₉₋₁₁		O ₁₅₋₁₇		U ₄₋₅		U ₁₄₋₁₆		
Поезд установл. согласно черт. № 11.		Колесо 15 над узлом 10		Колесо 19 на узлом 14		Колесо 6 над узлом 4		Колесо 18 над узлом 12		
Ф е р м а		Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	
ИЗМЕРЕНИЯ	В отделн. фибр.	a	-271	-254	-329	-274	+326	+260	+209	+201
		b	-227	-264	-301	-274	+299	+250	+226	+210
		c	-257	-84	-284	-325	+215	+228	+336	+329
		d	-358	-428	-150	-139	+226	+245	+314	+323
	Осевое	-281	-258	-294	-265	+290	+251	+243	+233	
	Наибольшее	-358	-428	-329	-325	+326	+260	+336	+329	
	Фибровое	-227	-84	-150	-139	+215	+228	+209	+201	
	Дополнит. в фибрах.	+27	+66	+12	+23	+12	+4	+38	+41	
	В % от осевого	-19	-67	-49	-48	-26	-9	-14	-14	
	Расчетные от	Постоян. нагрузки	-376		-367		+386		+383	
Испытательн поезда		-310		-290		+330		+311		
Конструктив. поправка		0,91	0,83	1,01	0,91	0,88	0,76	0,78	0,75	
Измеренное напряж. приведен. к расчет. 1925 г. „Н“		-479	-437	-504	-454	+498	+430	+409	+393	
Полные от	Испытательного поезда и пост. нагрузки	-657	-634	-661	-632	+676	+637	+626	+616	
	Расчетного поезда и постоянной нагрузки	-855	-813	-871	-821	+884	+816	+792	+776	
Допускаемое по сечению brutto		-899		-901		+933		+792		
Наибольш. допустимое в % от поезда 1925 г. по схеме Н		109		106		109		100		

ца VIII.

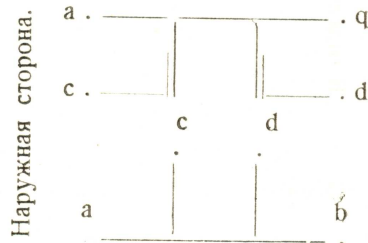
жений при статическом испытании (в kg/cm^2).

D _{5 8}		D ₁₃₋₁₆			
Колесо 3 над узлом 8		Колесо 4 над узлом 16		Колесо 18 *) над узлом 12	
Верхов.	Низов.	Верхов.	Низов.	Верхов.	Низов.
+377	+380	+370	365	210	-230
+438	+447	+450	+460	-240	-250
+516	+511	+296	+386	-112	-219
+466	+525	+466	+442	-218	-217
+449	+466	+396	+413	-195	-229
+516	+525	+466	+460	-240	-250
+377	+380	+296	+365	-112	-217
+15	+13	+18	+11	+23	+9
-16	-19	-25	-12	-43	-5
+270		+188		+188	
+418		+404		-247	
1,07	1,12	0,98	1,02	0,79	0,93
+784	+814	+706	+736	-344	-403
+719	+736	+584	+601	-7	-41
+1054	+1084	+894	+924	-156	-215
+864		+788		-185	
73		81		221	

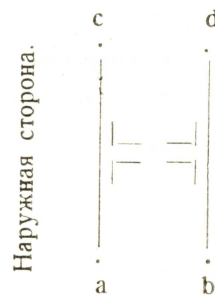
П Р И М Е Ч А Н И Е

Схема расположения приборов:

1. В поясах.



2. В раскосах.



*) Вагоны были отцеплены.

Т а б л и
Ведомость результатов измерения напря

Название элементов		V ₈₋₉		V ₁₆₋₁₇		
Поезд установлен согласно черт. № 11.		Колесо 1 над узлом 10		Колесо 7 над узлом 14		
Ф Е Р М А		Верхов.	Низов.	Верхов.	Низов.	
ИЗМЕРЕННЫЕ	В отдельн. фибрах	a	-82	-79	-265	-163
		b	-54	-63	-4	-16
		c	-164	-132	-200	-259
		d	-159	-203	-50	0
	Осевое	-115	-119	-130	-110	
	Наибольшее	-164	-203	-265	-259	
	Фибровое	-154	-63	-4	0	
	Дополнит. в фибрах	+43	+70	+104	+136	
	В % от осевого напряжения	-53	-47	-97	-100	
	Расчетные от	Постоян. нагрузки	+30		-302	
Испытат. поезда		-225		-317		
Конструктивн. поправка		0,51	0,53	0,41	0,35	
Измеренное напряжение приведен. к расч. 1925 г. „Н“		-204	-212	-244	-208	
Полные от	Испыт. поезда и постоян. нагрузки. .	-85	-89	-432	-412	
	Расчетного поезда и постоян. нагрузки.	-174	-182	-546	-510	
Допускаем. по сечению brutto		-602		-719		
Наибольш. допустимое в % от поезда 1925 г. по схеме Н		298		171		

ца IX.

жений при статическом испытании в г/см²

V ₂₄₋₂₅ *)		Прод. балки п. 4-6 в сеч. 4,37 м. от уз. 4		Ниж. пояс попер. балки узла 6		ПРИМЕЧАНИЕ
Колесо 20 над узл. 22		Колесо 7 над сечен.		Колесо 7 над узл. 6		
Верхов.	Низов.	Верхов.	Низов.	Верхов.	Низов.	
-159	-143	+295	+306	+624	-	<p>Схема расположения приборов.</p> <p>1. В стойках.</p> <p>Наружная сторона</p> <p>Западная сторона</p> <p>c d</p> <p>а b</p> <p>Восточная сторона</p> <p>2. В диагоналях.</p> <p>Наружная сторона</p> <p>c d .</p> <p>а b</p> <p>3. В нижнем поясе попер. балки.</p> <p>Западная сторона</p> <p>c d</p> <p>а b</p> <p>Восточная сторона</p> <p>*) Вагоны были отцеплены.</p>
-150	-120	+404	+406	+454	-	
-80	-37	-	-	+202	-	
-71	-59	-	-	+69	-	
-115	-90	+350	+356	+337	-	
-159	-143	+404	+406	+624	-	
-71	-37	+295	+306	+69	-	
+38	+59	±15	±14	+85	-	
-38	-58			-80	-	
+30		+42		+74		
-176		+440		+483		
0,65	0,51	0,80	0,81	0,70	-	
-260	-204	+523	+530	+571	-	
-85	-60	+392	+398	+411	-	
-230	-174	+565	+572	+645	-	
-602		+694		+728		
243		123		114		

Ввиду того, что по мосту все время производилось движение поездов, остаточный прогиб ферм не обнаружен.

Продольные перемещения подвижного конца ферм, будучи измерены, оказались равными:

Для верховой (южной) фермы . . . 13,8 мм.

Для нижней (северн.) фермы . . . 13,7 мм.

Расчетный же высчитываем по формуле

$$\Delta = \frac{Pl^3}{21 \cdot h} F$$

Что дает $\Delta = 19,0$ мм.

Таким образом, конструктивный коэффициент равен:

Для верховой фермы 0,73

Для нижней фермы 0,72

Помимо определения прогибов фермы моста, при статическом испытании определялись напряжения в отдельных элементах моста. Располагая четырьмя прогибомерами, определяли напряжения в отдельных фибрах элементов.

III. Динамическое испытание.

Динамическое испытание всякого моста по существу своему, вообще говоря, является наиболее важной частью исследования, так как наиболее соответствует действительной работе моста и позволяет более глубоко проникнуть в сущность процессов, развивающихся во время воздействия временной нагрузки. Проходящие поезда приводят мост в колебательное состояние: наблюдаются колебания вертикальные и боковые.

При испытании нашего моста вертикальные колебания измерялись прогибомерами системы Френкеля. Известно, что вертикальные колебания бывают не только при нахождении на мосту поезда (вынужденное колебание), но также и после схода поезда с моста (свободное колебание). Прогибомер Френкеля есть довольно грубый прибор. При посредстве его удастся наблюдать в большинстве случаев только вынужденное колебание. Что же касается свободных колебаний мостов, то обычно они бывают столь малы, что измерение их возможно только приборами, более чувствительными, нежели прибор Френкеля.

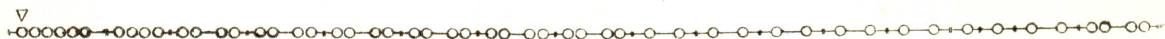
Боковые колебания в плоскостях обоих поясов моста измерялись маятником системы Лейнера.

Испытание фермы производилось 6 и 7 сентября 1926 г.

Динамическое испытание производилось поездом, состоящим из одного паровоза серии Ел., направленного трубой на запад, затем от паровоза на восток находились: тендер, 4 американских полувагона, 2 американских крытых вагона, 2 крытых нормальных товарных вагона, 1 платформа, 3 крытых товарных вагона, 1 платформа и 1 четырехосный классный вагон.

Испытание производилось при солнечной погоде. Температура воздуха была $+20^{\circ}$ С, скорость ветра около 0,1 мтр. сек. и менее.

Схема испытательного поезда при динамическом испытании такова:



Чер. № 12. Схема поезда при динамическом испытании.

Всего было сделано 7 заездов. Скорость движения поезда была от 7 до 40 клм./час., именно: 7-; 11,5-; 18,3-; 19-; 23-; 26 и 40 клм/час.

При медленных заездах были получены совершенно плавные диаграммы. Общий характер диаграмм при значительных скоростях несколько искажается.— Однако несмотря на то, что скорости доходили до 40 клм/час, никакого ударного эффекта все же не обнаружено.

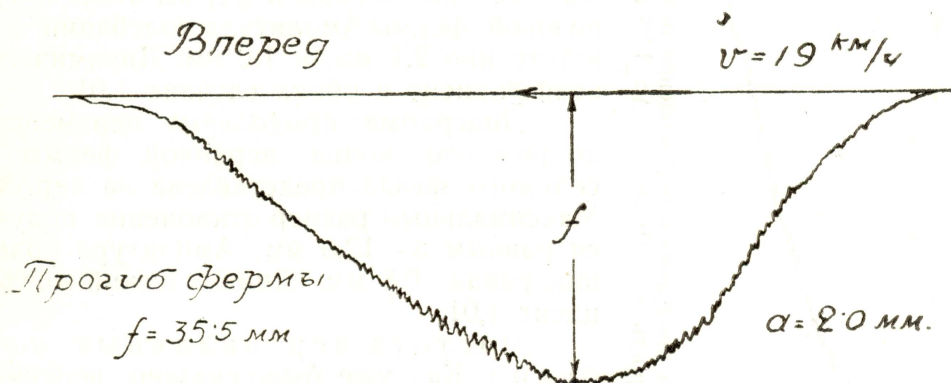
Максимальный упругий прогиб при динамической нагрузке оказался равным 36,0 мм. или $\frac{1}{3526} l$

Наибольший динамический коэффициент получился при скорости $v = 18,3$ клм/час для верховой фермы, где он оказался равным 1,03.

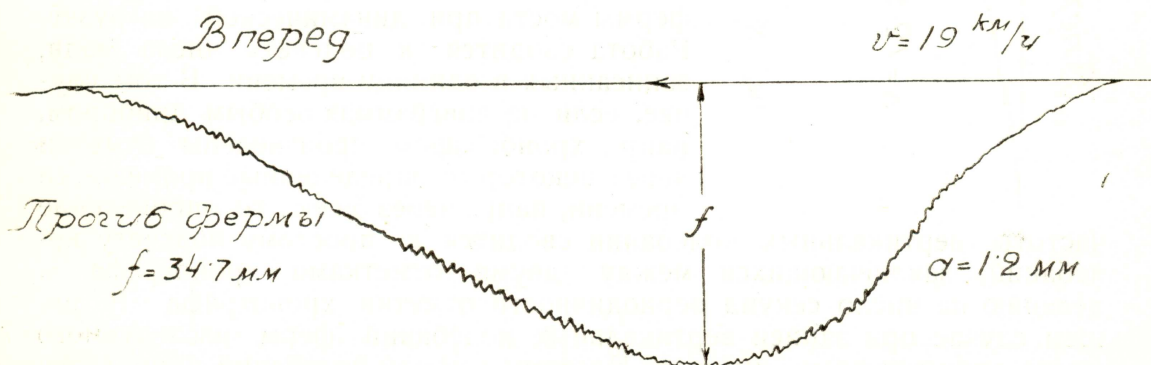
Динамический коэффициент определен по эмпирической формуле НКПС

$$D = 1 + \frac{1500}{5000 + l^2} = 1,07$$

Первый заезд со скоростью 19 килом в час. Диаграммы прогибов верховой (южной) и низовой (северной) ферм представлены на чер. 13 и 14. Прогиб получился 35,5 мм. для верховой и 34,7 мм. для низовой фермы.

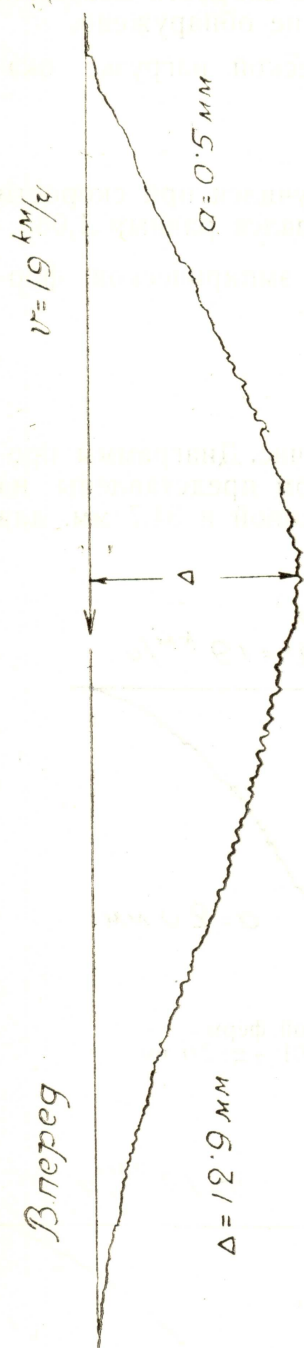


Чер. № 13. Диаграмма прогибов верховой южной фермы. Скорость $v = 19$ км./час. Прогиб $f = 35,5$ мм. $\delta = 1,01$ $\alpha = 2,0$ мм.



Чер. № 14. Диаграмма прогибов низовой северной фермы. Скорость $v = 19$ км./час. Прогиб $f = 34,7$ мм. $\delta = 1,00$ $\alpha = 1,2$ мм.

Продольные перемещения подвижного конце верховой фермы представлены для первого заезда для скорости 19 км. в час на чер. 15. Общий размер отклонения достигал максимально 12,9 мм., амплитуда колебания составляет 0,5 мм.



Чер. № 15. Диаграмма продольного перемещения подвижного конца верховой (правой) фермы. Скорость $v = 19$ км./час. $\Delta = 12,9$ мм. $\sigma = 0,5$ мм.

Динамический коэффициент равняется 1,03.

Пятый заезд со скоростью 26 килом. в час. Диаграммы прогибов ферм представлены для верховой (южной) фермы на чер. 16 и для низовой (северной) фермы на чер. 17. Прогиб получился 35,8 мм. для верховой фермы и 35,0 мм. для низовой фермы.

Диаграмма продольных перемещений подвижного конца верховой фермы для пятого заезда представлена на чер. 18. Максимальный размер отклонения получился равным 12,9 мм., амплитуда колебания равнялась 0,6 мм. Динамический коэффициент 1,03.

Седьмой заезд со скоростью 40 килом. в час. Диаграммы прогибов фермы представлены: для верховой (южной) фермы на чер. № 19 и для низовой (северной) фермы на чер. № 20. Прогиб получился 35,3 мм. для верховой фермы и 35,0 мм. для низовой фермы. Амплитуда колебаний соответственно 2,1 мм. и 1,2 мм. Динамический коэффициент в обоих случаях 1,01.

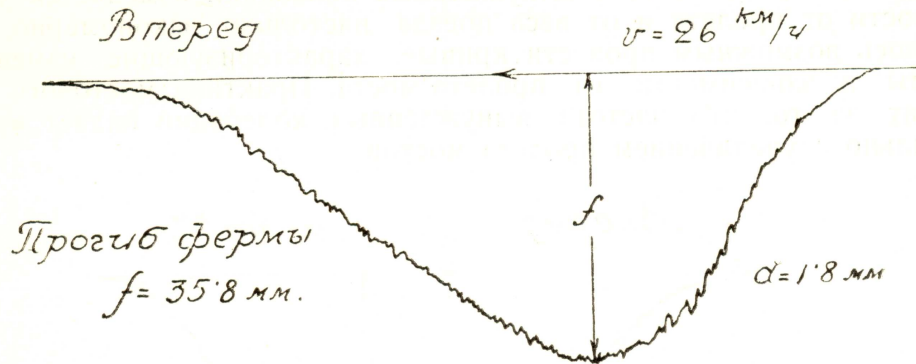
Диаграмма продольных перемещений подвижного конца верховой фермы для седьмого заезда представлена на чер. № 21. Максимальный размер отклонения получился равным $\Delta = 12,6$ мм. Амплитуда колебаний равна 0,8 мм. Динамический коэффициент 1,01.

Частота вертикальных колебаний. Как уже было сказано, вертикальные колебания бывают вынужденные и свободные.

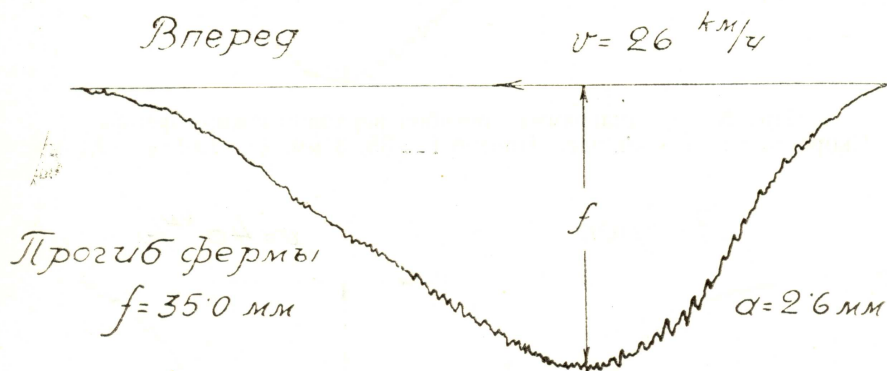
Определение частоты колебаний возможно произвести с достаточной степенью точности на основании диаграммы прогиба фермы моста при динамической нагрузке. Работа сводится к подсчету числа волн, записанных в единицу времени. В том случае, если на диаграммах особым прибором, напр., хронографом произведены отметки через некоторые определенные промежутки времени, напр., через 5 сек., то определение

частоты вертикальных колебаний сводится к простому подсчету колебаний, заключающихся между двумя отметками хронографа и делению на число секунд периодичности отметки хронографа. В нашем случае при записи вертикальных колебаний ферм исследуемого моста хронографа не имелось. Поэтому частоту колебаний приходится определять более грубым путем. Зная скорость движения поезда и длину поезда, мы с достаточной степенью точности можем определить

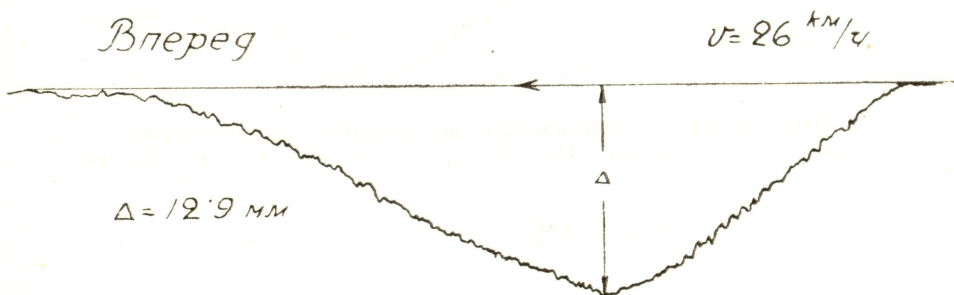
время, начиная с того момента, когда первое колесо паровоза вошло на мост, и кончая тем моментом, когда последнее колесо в поезде сошло с моста. Этот период времени будет соответствовать времени движения бумажной ленты прогибомера.



Чер. № 16. Диаграмма прогибов верхней правой фермы.
Скорость 26 км./час. Прогиб равен 35,8 мм.



Чер. № 17. Диаграмма прогибов нижней северной фермы.
Скорость 26 км./час. Прогиб равен 35,0 мм.



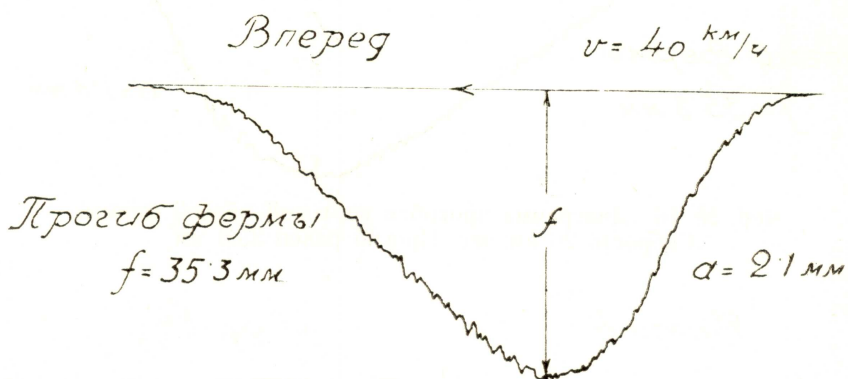
Чер. № 18. Диаграмма продольного перемещения подвижного конца верхней южной фермы. Скорость 26 км./час.

Подсчитаем для верхней фермы по чер. № 16 число колебаний при пятом заезде при скорости движения поезда 26 км. в час. Сказанная скорость соответствует 7,4 мтр/сек.

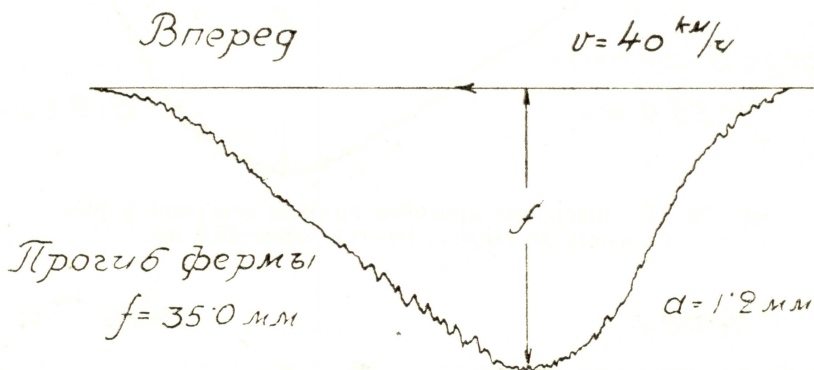
Длина моста приблизительно 127 мтр. длина поезда 160 мтр. таким образом пробег через весь мост, считая время от входа на мост первого колеса паровоза до схода последнего колеса поезда составляет 287 м., на что требуется 41,5 сек.

Подсчет колебаний непосредственно по диаграмме дает 88 колебаний во весь этот период времени. Таким образом получаем, что за 1 сек. делается 2,1 колебания в секунду. Это есть частота вынужденных колебаний.

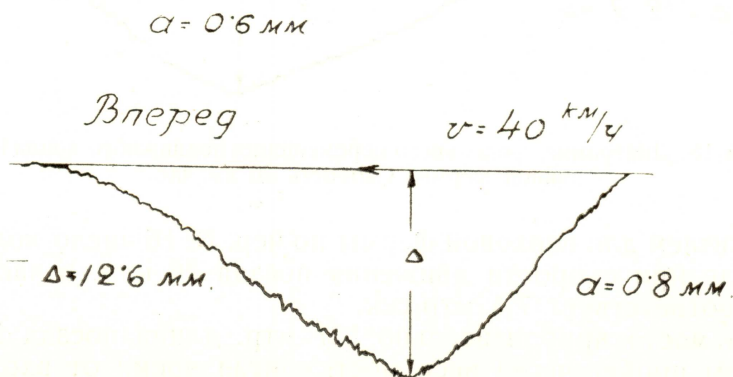
Известно, что частота вынужденных колебаний изменяется в зависимости от пролета и от веса поезда настолько закономерно, что оказалось возможным провести кривые, характеризующие изменение частоты в зависимости от пролета моста. Практика мостового дела говорит за то, что частота вынужденных колебаний падает весьма правильно с увеличением пролета мостов.



Чер. № 19. Диаграмма прогибов верхней южной фермы. Скорость $v = 40$ км./час. Прогиб $f = 35,3$ мм. $\delta = 1,01$ $\alpha = 2,1$ мм.



Чер. № 20. Диаграмма прогиба нижней северной фермы. Скорость $v = 40$ км./час. Прогиб $f = 35,0$ мм. $\delta = 1,01$ $\alpha = 1,2$ мм.



Чер. № 21. Диаграмма продольного перемещения подвижного конца верхней южной фермы. Скорость $v = 40$ км./час.

К статье проф. М. И. Евдокимова-Рокотовского „Загадочный случай
разрушения фермы моста пролетом 123,75 м.“

$v = 7 \text{ км/ч}$; $\alpha = 3.0 \text{ мм}$



$v = 18 \text{ км/ч}$; $\alpha = 3.5 \text{ мм}$

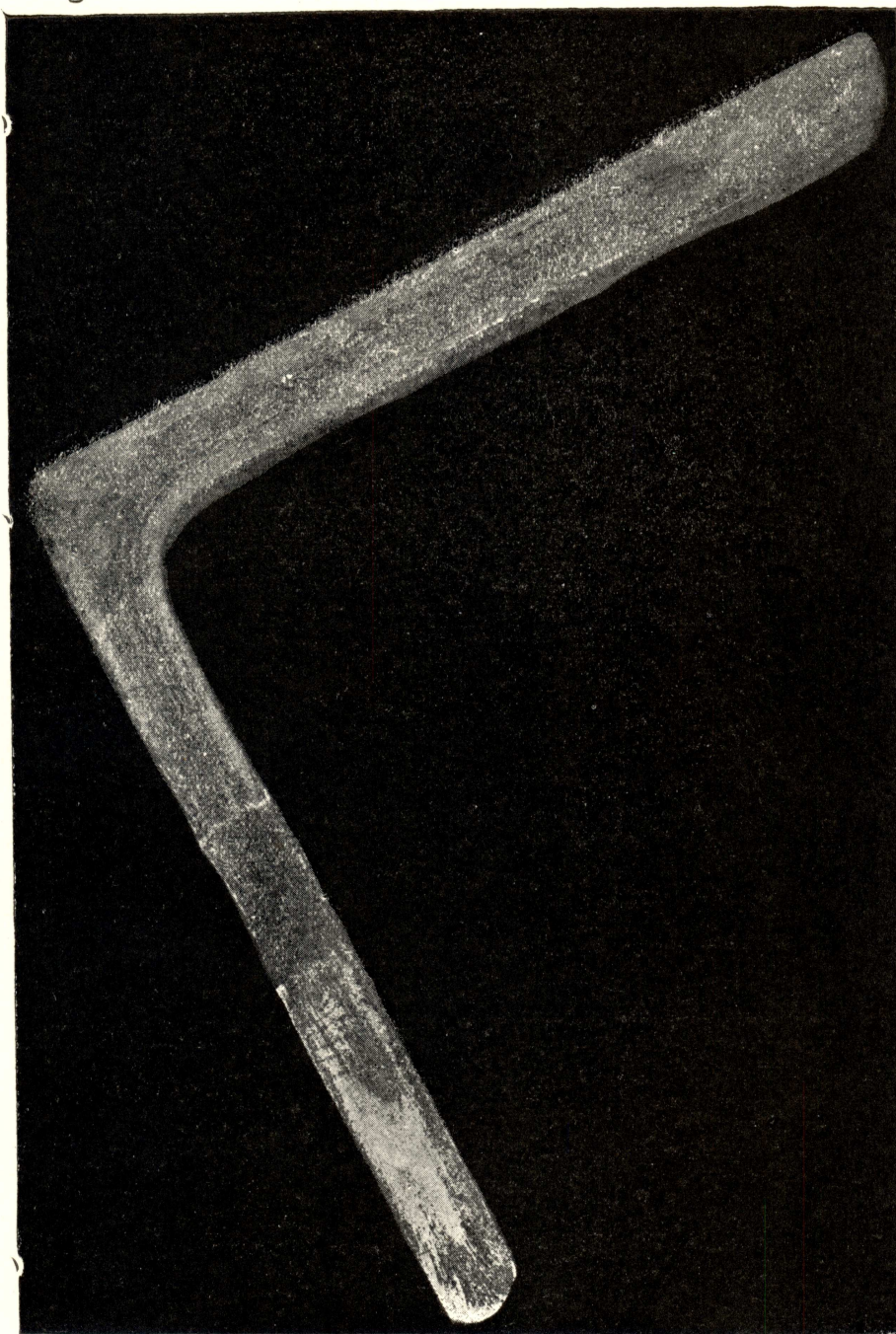


$v = 26 \text{ км/ч}$; $\alpha = 6.3 \text{ мм}$



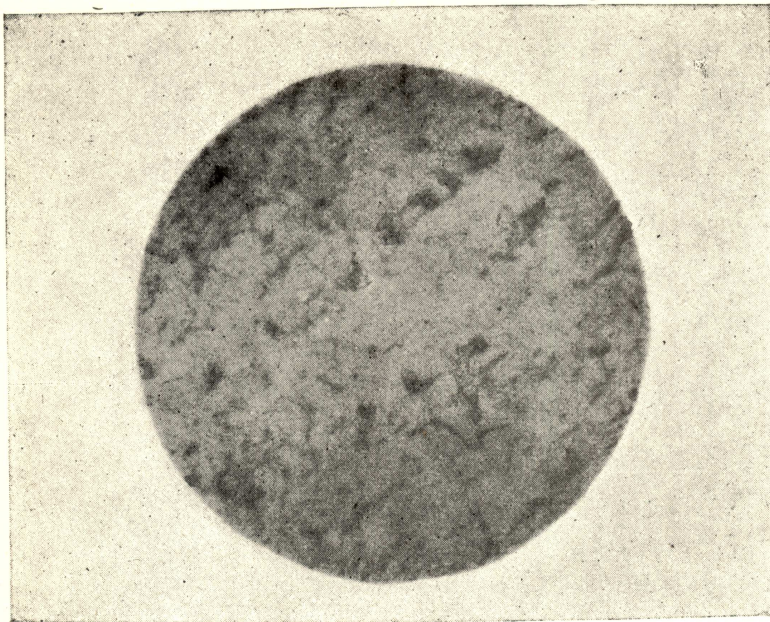
Черт. № 22. Диаграммы горизонтальных колебаний фермы при динамическом испытании при различных скоростях.

К статье проф. М. И. Евдокимова-Рокотовского
„Загадочный случай разрушения фермы моста
пролетом 123,75 м.“.



Снимок № 1. Макроструктура материала уголка фермы при глубоком травлении слабым раствором соляной кислоты. Шлиф взят с торца уголка, Натуральная величина.

К статье проф. М. И. Евдокимова-Рокотовского
„Загадочный случай разрушения фермы моста
пролетом 123,75 м.“.



Снимок № 2. Микроструктура материала уголка фермы. Травление реактивом проф. Ижевского. Увеличение 100 раз.



Снимок № 3. Микроструктура материала уголка фермы. Травление реактивом проф. Ижевского. Увеличение 150 раз.

Частота свободных колебаний. Известно, что при наличии свободных колебаний их максимальная амплитуда всегда наблюдается в момент схода поезда с пролета. Однако, свободные колебания весьма трудно регистрировать при посредстве приборов. Для этого требуется весьма чувствительные приборы, каковых в нашем случае, при испытании фермы моста не имелось. Рассмотрение диаграмм говорит, что эти свободные колебания не нашли себе отражения на вычерченных прибором диаграммах.

Практика мостового дела не так то уж часто имеет возможность оперировать с данными наблюдений свободных колебаний. В тех же случаях, когда эти наблюдения приходилось иметь, оказывается, что частота свободных вертикальных колебаний, так же, как и вынужденных колебаний, зависит от пролета моста. С увеличением пролета частота падает и при пролетах около 127 мср. она приблизительно равна 2,5 колебания в секунду.

Частоту свободных колебаний, т. е, колебаний продолжающихся после схода поезда теоретически можно рассчитать по формуле Блейха.

$$v = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{g \cdot \frac{EJ}{p}}$$

где v — частота свободных колебаний (число колебаний в 1 секунду).

l — пролет фермы = 126,796 мтр.

p — постоянная нагрузка на 1 пог. мтр. одной фермы.

E — модуль упругости металла фермы.

J — момент инерции моста, определяемый из формулы

$$J = \frac{\max(M_p + M_k) h}{2\sigma} \quad \text{где } M_p \text{ и } M_k$$

— максимальные моменты от расчетной постоянной нагрузки и от вертикальной нагрузки подвижным составом, — h — высота фермы, σ — допускаемое напряжение, g — ускорение силы тяжести.

Таблица X.

Ведомость напряжений в элементах фермы при динамическом испытании.

Элементы:		V 8 9			D 15—16			
Скорость поезда:	Волокна:	Наружное волокну восточная сторона	Внутреннее волокну восточная сторона	Динам. коэффициент	Верхнее наружное волокно	Динам. коэффициент	Верхнее внутреннее волокно	Динам. коэффициент
	7 км/час.	—	+215	—	1,00	+341	1,00	+412
+52			—	—73		—62		
11,5 "	—	+200	—	0,93	+342	1,00	+406	0,98
		—58	—		—71		—77	
18,3 "	—	+210	—	0,96	+366	1,04	+434	1,05
		—75	—		—73		—56	
19 "	—97 +28	+207	—	0,96	+356	1,04	+434	1,05
		—74	—		—73		—56	
23 "	—	+222	—	1,03	+351	1,03	+434	1,05
		—71	—		70		—64	
26 "	—	+217	—	1,01	+356	1,04	+452	1,10
		+83	—		—73		—65	
40 "	—	+230	—	1,07	+356	1,04	+422	1,02
		—71	—		—73		—74	

Диаграммы имеют нормальный вид.

Вибрации достигают при скорости 26 клм./ч. 65 кгр./см.² или 14% от наибольшего измеренного фибрового напряжения.

Горизонтальные колебания ферм. Большой период горизонтальных колебаний пролетного строения и медленное затухание характеризует слабую жесткость ферм в горизонтальном направлении. Величину амплитуды обычно относят и расчетному пролету и принимают, что отношение $\frac{1}{11000} l$ до $\frac{1}{13000} l$ дает указание на до-

статочную жесткость пролетных строений в горизонтальной плоскости.

В нашем случае для ферм моста амплитуда горизонтальных боковых колебаний в плоскости нижнего пояса, будучи замерена прогибомером Френкеля (чер. № 22), равняется:

$$\text{при скорости } v = 7 \frac{\text{км}}{\text{час.}} \quad a = 3,0 \text{ мм.}$$

$$v = 18 \frac{\text{км}}{\text{час.}} \quad a = 3,5 \text{ мм.}$$

$$v = 26 \frac{\text{км}}{\text{час.}} \quad a = 6,3 \text{ мм.}$$

$$v = 40 \frac{\text{км}}{\text{час.}} \quad a = 9,4 \text{ мм.}$$

Вычисленная же согласно указанной формулы амплитуда будут в пределах от $\frac{1}{11000} 126,796$ мтр. до $\frac{1}{13000} 126,796$ мтр.
11,53 мм. до 9,75 мм.

Период их как видно из диаграмм, невелик.

Затухание их, как это видно из тех же диаграмм, довольно быстрое.

Все это вместе взятое свидетельствует о достаточной жесткости ферм в горизонтальном (боковом) направлении.

IV. Механическое испытание и металлографическое исследование металла фермы.

Механическое испытание. Образцы, взятые из уголка и планки, были подвергнуты механическому и металлографическому испытанию.

На разрыв было испытано восемь образцов. Из них первые шесть образцов дали: временное сопротивление от 4111 кгр./см.² до 4530 кгр./см.². Относительное удлинение от 25,3% до 30,0%. Последние два образца из планки дали временное сопротивление 3250 кгр./см.² и 3480 кгр./см.² и относительное удлинение в обоих случаях 30,0%.

Испытание железа уголков на маятниковом копре Шарпи дает значения удельной работы изломы на единицу площади от 990 кгр./см.²

до 4250 кг/см.² в среднем 1970 кг/см.², что указывает на малое для литого железа сопротивление ударам и большую степень его хрупкости, объясняемую согласно металлографическим испытаниям с одной стороны наличием вредных примесей и с другой стороны неправильной обработкой при изготовлении этого железа.

Техн. Усл. Н.К.П.С. изд. 1924 г. требуют, кроме испытания на разрыв, также испытания на загиб в горячем состоянии и загиб в отожженном состоянии, на сварку и расклепку для заклепочного железа. При производстве технологической пробы образец из уголка при загибе до параллельности сторон дал трещину. Образец из планки трещины не дал.

Металлографическое исследование. При исследовании макро и микро структуры было сделано три фотографических снимка и просмотрены шлифы во многих других местах.

Снимок № 1, относящийся к макро структуре, сделан с шлифа поперечного сечения уголка, подвергнутого глубокому травлению слабым раствором соляной кислоты. Макро структура указывает на резко выраженную ликвацию со значительным содержанием в железе сернистых и фосфористых соединений. Эти соединения нарушают связь между зернами металла и делают железо хрупким. Важно то, что сернистые соединения дают хрупкость при нагревании, а фосфористые соединения дают хрупкость на холоду. Последнее обстоятельство является для моста более опасным.

Снимок № 2, относящийся к микро структуре, указывает на мало углеродистое литое железо, состоящее в главной своей массе из белых ферритовых зерен с темными прослойками на границах этих зерен, состоящих из перлита. Феррит является главной составной частью и железо таким образом мало углеродисто. Планиметрирование площадей зерен перлита указывает на содержание углерода в железе приблизительно около 0,07%. Преимущественное расположение перлитовых зерен по диагоналям снимка, а также наличие строчечной, переходящей в некоторых местах шлифа в столбчатую структуру феррита указывает на пониженное сопротивление от усилий, перпендикулярных к прослойкам перлита, а также указывает на способность к легкому образованию трещин. Такое строение является следствием прокатки при низких температурах.

Снимок № 3, относящийся к микро структуре, указывает на присутствие сернистого марганца. Сернистый марганец, заключенный в границах ферритовых зерен, является безвредным включением. Однако, этот же сернистый марганец имеет весьма вредные шлаковые включения пепельно серого цвета вытянутой веретенообразной формы. Присутствие шлаков нарушает однородность строения металла, уменьшает вязкость металла и делает металл ломким.

V. Предварительные выводы.

Образование трещин в ферме моста является весьма серьезным указанием на ухудшенное состояние металла моста. Вопрос о трещинах важен тем более потому, что появление трещин часто говорит о происходящих изменениях в структуре металла, об усталости металла, о его старении. К сожалению наблюдение за трещинами, обнаружение трещин, является трудным делом, так как обычно приходится иметь дело с окрашенным пролетным строением моста. Большое количество трещин, обнаруженных в фермах исследуемого моста, дохо-

дящее до 52 штук, не может не вызывать самого серьезного внимательного отношения. Не исключена возможность, что нам известны не все существующие трещины и многие еще скрываются под слоем краски.

В высшей степени любопытно иметь справку о том, где, в каких местах и в каком количестве приходилось наблюдать трещины на фермах других мостов. Опыт мостового дела говорит о том, что трещины наблюдаются, вообще говоря, довольно редко. По численности наблюдаемых случаев на первом месте надо поставить случаи, когда трещины в металле обнаруживались в балках проезжей части, так как именно эта часть пролетных строений работает в самых тяжелых условиях. Обычно трещины наблюдаются в вертикальных уголках, помощью которых продольные балки прикрепляются к поперечным.

Однако, в пролетном строении нашего моста в балках проезжей части никаких трещин не обнаружено. На основании этого возможно считать, что если части моста, напряженно работающие под временной вертикальной нагрузкой в особенно тяжелых условиях, не претерпевают деформаций в виде трещин, то казалось бы деформация в виде трещин тех частей, которые работают в более легких условиях, не может быть отнесена за счет напряженной работы от временной нагрузки. Основываться только на таком соображении было бы быть может не полно и не достаточно доказательно, но во всяком случае сказанное соображение в ряде других доводов должно занять свое место и получить соответствующую оценку.

Рассматривая дальше различные случаи, когда приходится наблюдать трещины в фермах других мостов, на втором месте по числу случаев надо поставить случаи, когда трещины обнаруживались в поясных уголках пролетных балок в середине их пролета. Все такие трещины или проходят через заклепочные дыры, или находятся у изгиба уголков. Вероятной причиной таких трещин, замеченных на многих заграничных и на некоторых наших мостах, является работа металла выше предела упругости вследствие обмятия уголков продольных балок или же выгибов их, что и отмечается непосредственным наблюдением за их состоянием. Иными словами, здесь повидимому сказывается усталость металла. В некоторых случаях усталость металла была зафиксирована в этих местах металлографически, как например для моста через р. Волхов.

Наконец, значительно реже при производстве наружного осмотра моста встречаются трещины в элементах главных ферм. В подавляющем большинстве случаев они обнаруживаются лишь в мостах, прослуживших длительный срок. Приходится предполагать, что усталость металла является причиной подобного разрушения моста. Однако, как редкое исключение, приходится наблюдать трещины в мостах, построенных совсем недавно. Таковы случаи появления трещин на мостах через р. Днепр Моск. Белор. Балт. ж. д. и через р. Устье Северн. ж. д. где трещины обнаружены на сгибах уголков. Здесь сказались недоброкачественность заводской работы. На мосту через р. Шошу Октябрьск. ж. д. и на мосту через р. Нерль обнаружена поперечная трещина в уголке и швеллере раскоса. На этих мостах сказалось небрежное применение для пролетного строения материала, имеющего деформацию.

На основании вышеизложенного следует считать, что допущенные напряжения для металла моста не должны превосходить допускаемых напряжений для сварочного железа и ввиду хрупкости металла по пробе на излом, необходимо уменьшение скорости движения поездов по мосту.

Считая допустимое напряжение для металла моста, как для сварочного железа по приказу 9/vii—1928, № 1427, получим для испытанных элементов моста следующую таблицу:

Название элементов	O ₉₋₁₁	O ₁₅₋₁₇	U ₄₋₆	U ₁₄₋₁₆	D ₅₋₈	U ₁₃₋₁₆	U ₈₋₉
Полное напряжение	—855	—871	+844	+792	+1084	+924	—215
Допускаемое:	—775	—776	+804	+682	+745	+679	—160
Наибольш. допуск. в % от поезда 1925 г. по схеме Н	83	81	84	75	58	67	86

Из этой таблицы видно, что измеренные осевые напряжения, приведенные к расчетному поезду 1925 Н и сложенные с расчетными напряжениями от постоянной нагрузки, достигли наибольшей величины +1084 кг/см.² для D₅₋₈ низовой формы, т. е. оказались больше допускаемого +745 кг/см.²

Наибольшая допустимая нагрузка в % от расчетного поезда 1925 Н, определенная по измеренным напряжениям, приведенным к этому поезду, и сложенным с напряжением от постоянной, оказалась равной для верхнего пояса 81%, для нижнего пояса 73%, для раскосов 78% и для стоек 130%.

Так как металлографическое исследование образцов железа подтвердило хрупкость металла, то необходимо установить непрерывное наблюдение за состоянием моста.

Движение поездов по мосту необходимо производить одиночной тягой паровозами не тяжелее серии „Е“ при ограничении скорости движения до 10 клм. в час.

Таким образом появление трещин на ферме исследуемого моста, если судить на основании данных наружного осмотра фермы моста, статического и динамического испытания моста и металлографического исследования металла, является загадочным и непонятным.

Прежде всего нет пока никакой возможности с абсолютной достоверностью установить, когда же появились эти трещины? Быть может образование трещин происходит даже и теперь!..

При самом тщательном осмотре осенью 1926 г. обнаружили три трещинки как будто зашпаклеванные и таким образом повидимому относящиеся по своему происхождению ко времени ранее июля 1915 г. (Последняя окраска моста была именно в июле 1915 г.). Но тогда опять является загадочным, когда же именно появились все остальные 49 трещин из общего числа 52 трещин, ныне, так сказать, зарегистрированных. Если считать, что они относятся ко времени до 1915 г., то непонятно многое: во-первых то, что их не заметили при освидетельствовании моста в мае 1915 г. Во-вторых то, что их не заметили при окраске моста в июле 1915 г. В третьих то, что все эти 49 трещин остались без шпаклевки,—без следов покраски и носят вид трещин позднейшего происхождения. Приходится указать также и на то, что среди этих 49 трещин мы видим трещины по своему размеру достигающие до 0,1 мм и даже 0,3 мм и они оказываются сейчас незашпаклеванными и не покрашенными, тогда как те 3 трещинки, которые оказались зашпаклеванными, значительно уже по своему размеру, едва заметные, волосяные.

При таких обстоятельствах дела, прежде чем делать окончательное заключение по вопросу о причинах происхождения трещин и о благонадежности ферм моста для эксплуатации приходится обследовать вопрос возможно глубже. Совершенно случайно удалось выяснить историю фермы моста. Оказывается история фермы интересна и возможно, что имеет некоторое отношение к появлению трещин.

VI. История фермы моста.

Ферма на бухте (1904—1914)

На 90 клм. описываемой линии жел. дор. береговая линия большого озера образует бухту. Ширина бухты около 100 мтр. и наибольшая глубина ее по направлению трассы линии ж. д. около 28 мтр. Берег в этом месте, как и вообще по всей западной стороне его, образуется круто ниспадающими в воду скалистыми утесами достигающими иногда огромной высоты (чер. № 23).

При проектировании линии железной дороги в 1904 году здесь были встречены большие трудности. Обогнуть 2 мыса, образующие береговую бухту, даже предельными радиусами 320,04 мтр. (150 саж.) не представлялось возможным. Вследствие этого пришлось подойти к бухте с западной стороны галлереей длиной 47 мтр.

Значительная глубина бухты не позволяла устройства промежуточных опор, вследствие этого было решено перейти бухту однопролетным мостом отверстием 123,75 м. (58 саж.). Устои этого моста были заложены на скале, выравненной слоем бетона в 0,85 мтр. без фундаментов.

Изготовленная в 1902 г. на Коломенском заводе ферма была доставлена с завода в разобранном виде и установлена здесь в 1904 г. на 90 клм. ж. д.

Акта испытания моста в 1904 г. у меня к сожалению не имеется. Однако, на основании словесных сообщений инженеров, участвовавших в постройке ж. д. есть основание предполагать, что никаких дефектов в сборке фермы тогда не обнаружено. За десять лет пребывания фермы на бухте также никаких особенностей в состоянии фермы не наблюдалось.

За этот период времени нагрузка на ферму производилась составами поездов при паровозах Щ, О, Э и Ел.

Скорость движения была максимально до 40 клм./час.

Перевозка фермы.

При проектировании в 1911 г. второго пути ж. д. при трассировке линии были встречены еще более крупные затруднения, нежели при проектировании в 1904 г. первого пути. Особенно серьезные затруднения встретились при переходе вторым путем через бухту и при проведении здесь трассы линии. После длительных и детальных обследований всех обстоятельств дела при наличии целого ряда вариантов было решено в обход бухты построить двупутный туннель (чер. № 23). При таком решении вопроса на протяжении туннельного варианта все находящиеся на этом участке сооружения первого пути забрасывались и открывалась возможность использовать 58 саж. ферму с бухты для сооружения второго пути.

Согласно распоряжения Управления по Сооруж. ж. д. от 14 августа 1914 года № 12559 было решено эту ферму перенести и установить на устоях моста через реку* на 248 клм. ж. д. К постановке 58 саж. фермы на реке* были исключительно только экономические соображения: использовать ферму, избежать устройства промежуточных опор

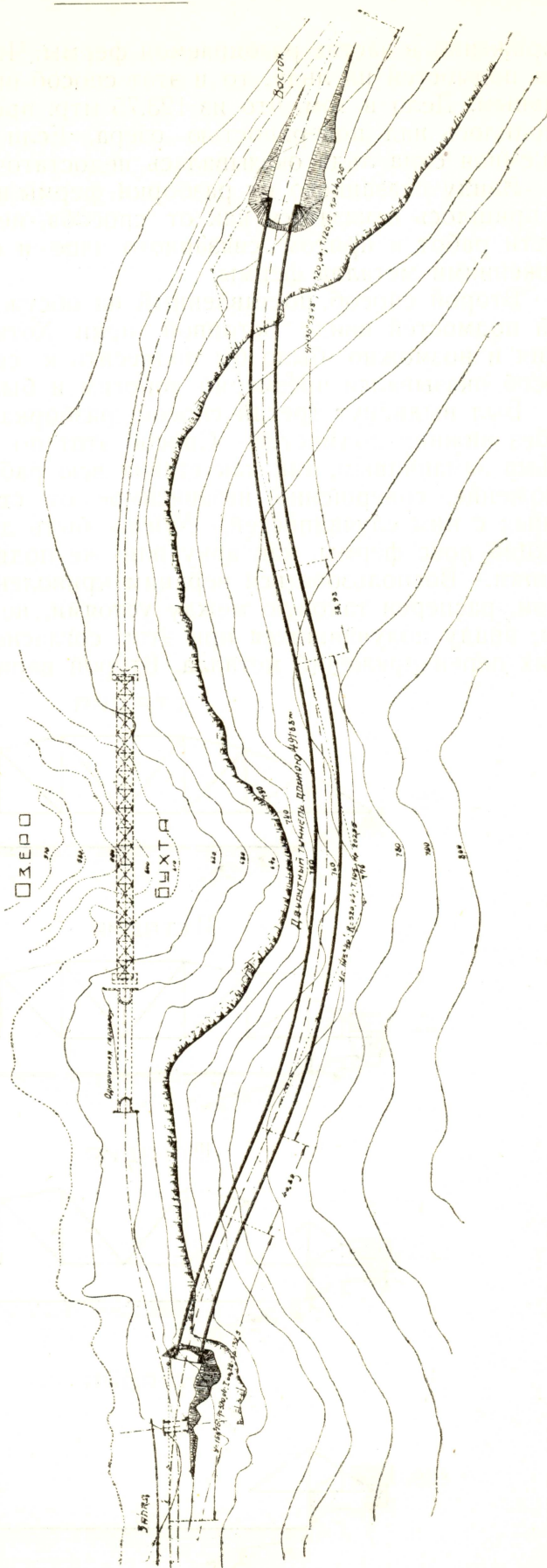
и дорого стоящих глубоких оснований. Для перво-го пути на реке* установлены две 25 саж. фермы.

Ввиду того, что все фермы мостов под второй путь ж. д. рассчитаны по нормам подвижной ж. д. нагрузки 1907 г., то поэтому 58 саж. ферму с бухты пришлось пересчитать и усилить под новую нагрузку, о чем будет сказано подробно.

Ввиду крайней затруднительности перевозки фермы целым пролетом и ввиду возможных при такой перевозке деформаций фермы было первоначально (в июле 1914 г.) решено разобрать ферму и в разобранном виде перевезти ферму поездами, усилить ее, затем собрать и установить на реке 248 клм.

Когда окончательно было решено, что ферма должна быть перевезена на реку*, то на очередь стал вопрос о способе перевозки. Как для перевозки, так и для предстоящего усиления фермы ее надо было разобрать. Разборку было возможно произвести различно. В порядке обсуждения были выдвинуты следующие способы.

Произвести разборку фермы на пролете, одновременно со снятием фермы с пролета по частям. Для этого пришлось бы пользоваться подмостями. Могло быть два варианта: подмости на понтонах или подмости на льду. Что касается применения понтонов, то ввиду волнений на озере работа была сопряжена с риском иметь пере-



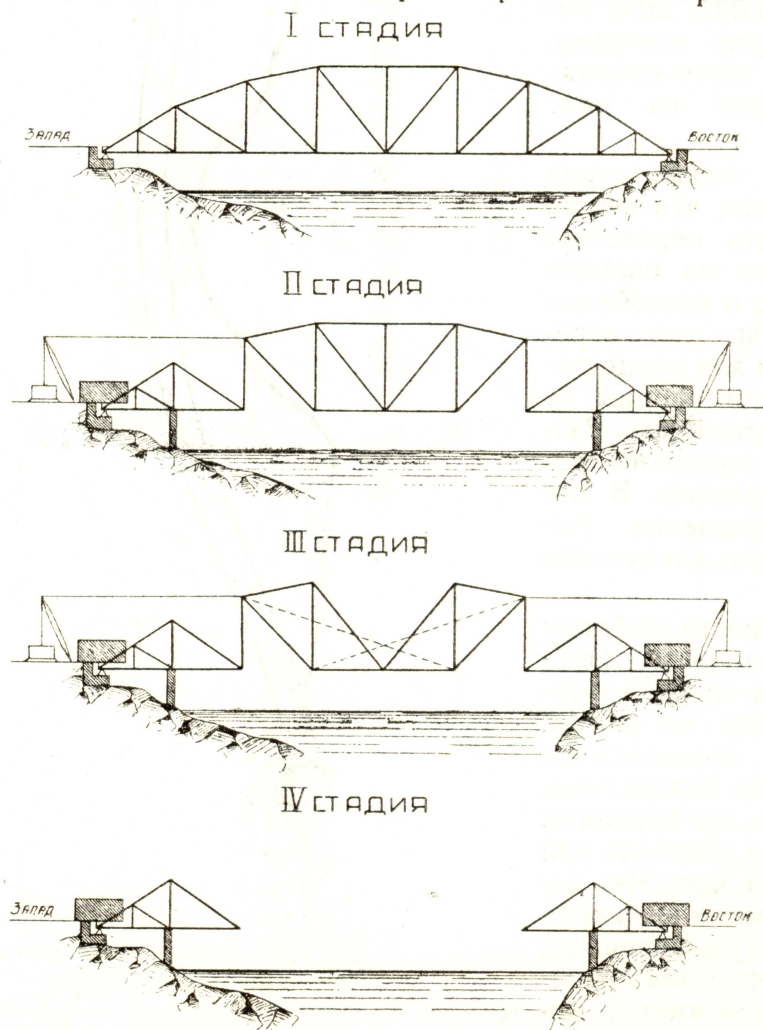
Чер. № 23. План расположения моста через бухту на 90 км. линии жел. дор. (1904—1914 г.).

напряжения в частях разбираемой фермы. Что касается способа устройства подмостей на льду, то и этот способ оказывался далеко не рациональным. Дело в том, что из 123,75 мтр. пролета только около 80 мтр. находилось над поверхностью озера. Если учесть вес подмостей, то под'емная сила льда оказывалась недостаточной.

Ввиду сказанного от разборки фермы на подмостях между опорами пришлось отказаться как от способа, не обеспечивающего безопасности работ и притом связанного еще и со значительными перенапряжениями металла фермы.

Второй способ, поставленный на обсуждение, был способ устройства подмостей в виде бетонной арки. Хотя подмости для бетонирования и возможно было бы подвесить к самой ферме, однако этот способ оказывался чрезмерно дорогим и был поэтому отвергнут.

Был выдвинут третий способ: разборка фермы в пределах пролета без нижних подмостей.—Способ этот по идее своей представляется весьма заманчивым, так как ставит всю работу по разборке фермы в положение, совершенно независимое от особенностей озера и связанных с ним случайностей.—Могло быть два варианта: использовать верхний пояс фермы, как арку или же подвесить ферму к береговым башням.—Воспользоваться верхним криволинейным поясом фермы, как аркой, расперев таковую между устоями, не представлялось возможным, ввиду получавшихся при этом согласно подсчета необычайно высоких перенапряжений металла. Второй вариант был хорош (чер. № 24).



Чер. № 24. Вариант разборки фермы способом подвески фермы к береговым башням.

Однако, когда была объявлена конкуренция, то не нашлось никого, кто пожелал бы взяться за такую работу. Поэтому, назначенные на 7 февраля 1914 г. торги не состоялись, а Начальник Работ не счел для себя приемлемым исполнять работу по этому способу непосредственным распоряжением Управления Работ.

Итак, приходилось отвергнуть все вышеизложенные способы и вместе с тем отказаться от перевозки фермы поездами в разобранном виде.

Пришлось обратиться к способу перевозки фермы водой при посредстве понтонов или барж. Способ сдвижки ферм на понтонах по сравнению с предидущими вариантами оказывался хорошо знакомым местным техническим работникам, а потому этот способ был выбран, как наиболее подходящий, и был фактически осуществлен.

Работы по передвижке фермы были сданы рядчику Копылевичу. Он произвел кой-какие подготовительные работы, оказался неисправным и был устранен.—Подготовительные работы были закончены и самая сдвижка фермы произведена непосредственным распоряжением Управления Работ. На работах неотлучно находились и работами руководили Начальник Технического Отдела инженер В. О. Фрейберг и Начальник дистанции Н. В. Антонов.

Было одно весьма важное обстоятельство, существенно повлиявшее на выбор способа с'емки ферм с пролета: это была конфигурация дна бухты, от чего зависело предельное приближение барж к берегу во время сдвижки. В этом отношении работы по с'емке находились в гораздо худших условиях, чем при надвижке фермы на пролет. Тогда в 1904 г. были устроены специальные понтоны, размером 10×21 мтр., допускавшие большее приближение их к берегу, чем случайные баржи длиной по 34 мтр.

Чтобы парализовать невыгодное влияние длины барж, являлось более целесообразным произвести возможно большую поперечную сдвижку ферм в сторону озера. Однако и этот способ производства работ оказывался трудно выполнимым, т. к. осуществлению его препятствовала значительная глубина озера, при которой являлись большие затруднения в основании береговых подмостей на скале под водой.

Вследствие всех этих соображений окончательно принятый к исполнению способ вылился в комбинацию применения случайно имеющихся в наличии трех барж, с усилением ферм путем устройства железобетонного ядра в четырех стойках фермы S_{8-9} и S_{24-25} в постановке 4 дополнительных раскосов во вторых больших от концов фермы панелях и устройства ряда диафрагм в нижнем поясе фермы.

Основные требования, которым должны были удовлетворять работы по с'емке фермы с пролета, состояли в том

во-первых, чтобы была полная безопасность производства работ, во-вторых, чтобы было отсутствие перенапряжений в частях фермы во время производства работ,

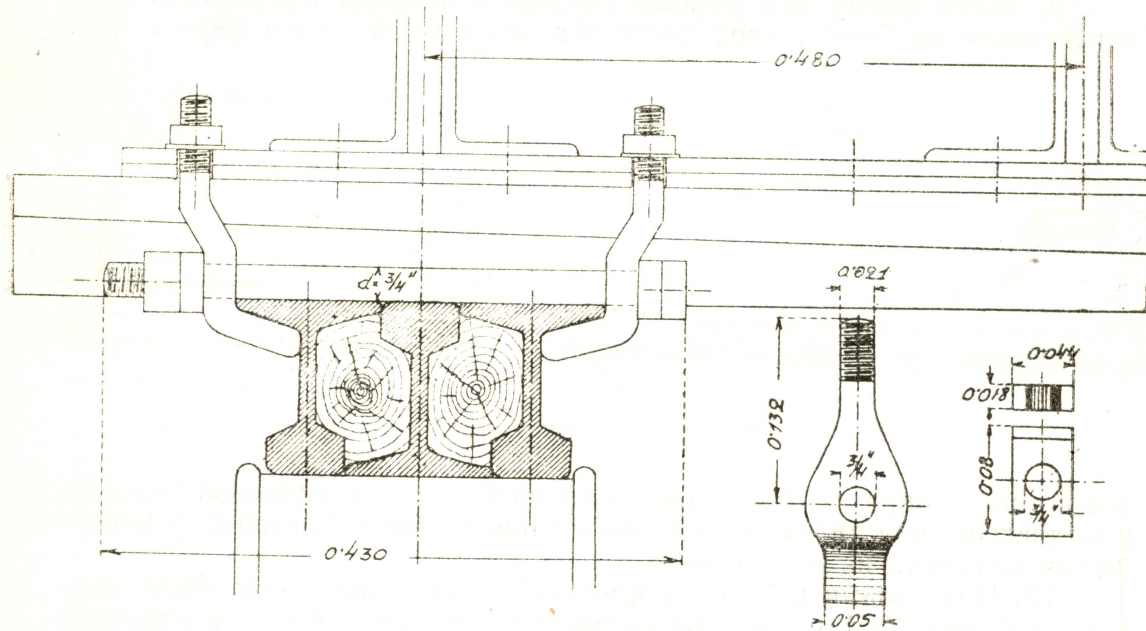
и, в-третьих, чтобы была возможная дешевизна работ.

Для того, чтобы осуществить принятый способ производства работ над глубокой бухтой был намечен и фактически осуществлен следующий план работ:

1) Были устроены леса-подмости на обоих берегах бухты у существующих каменных устоев.

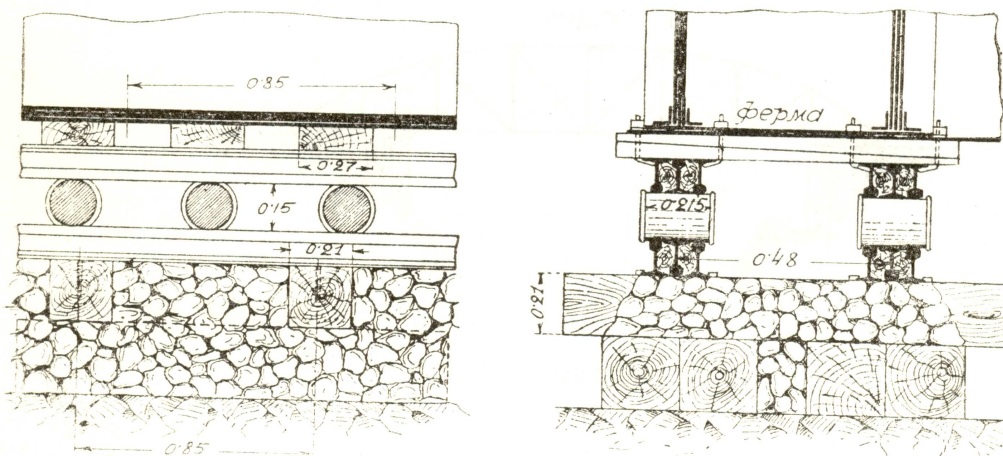
2) Были раскреплены три баржи с укладкой дополнительных лежней по дну и на палубе, с устройством трех продольных и пяти поперечных досчатых водонепроницаемых перегородок с устройством подмостей над палубой высотой 9,5 мтр.

к продольной передвижке ферма была приподнята на домкратах и поставлена концевыми тележками на катки.



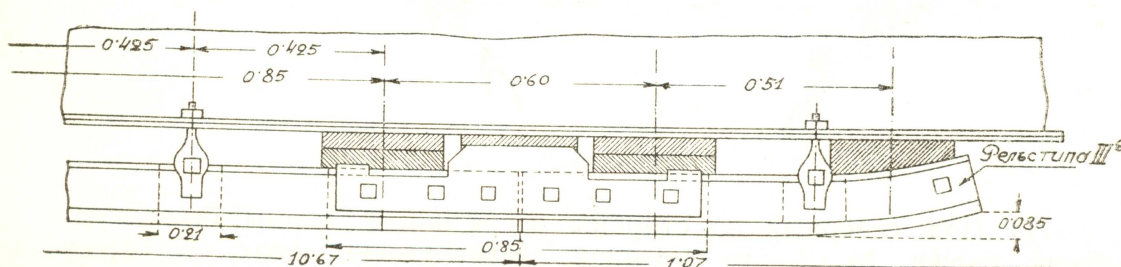
Чер. № 26. Детали тележек для перекатки фермы.

7) На лесах, подмостях и за подмостями с восточной стороны на достаточную длину на поперечинах и лежнях была уложена колея.



Чер. № 26. Детали тележек для перекатки фермы.

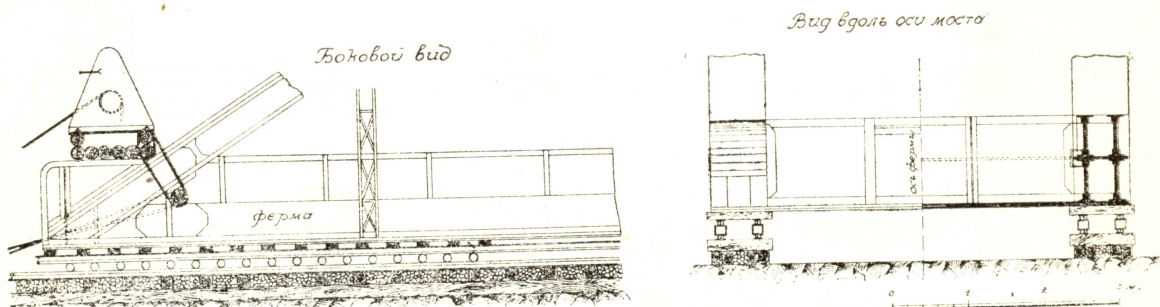
К нижнему поясу фермы по брусам были прикреплены рельсы (чер. № 26).



Чер. № 26. Детали тележек для перекатки фермы.

8) Ферма была установлена по концам на катки при помощи домкратов (чер. № 27).

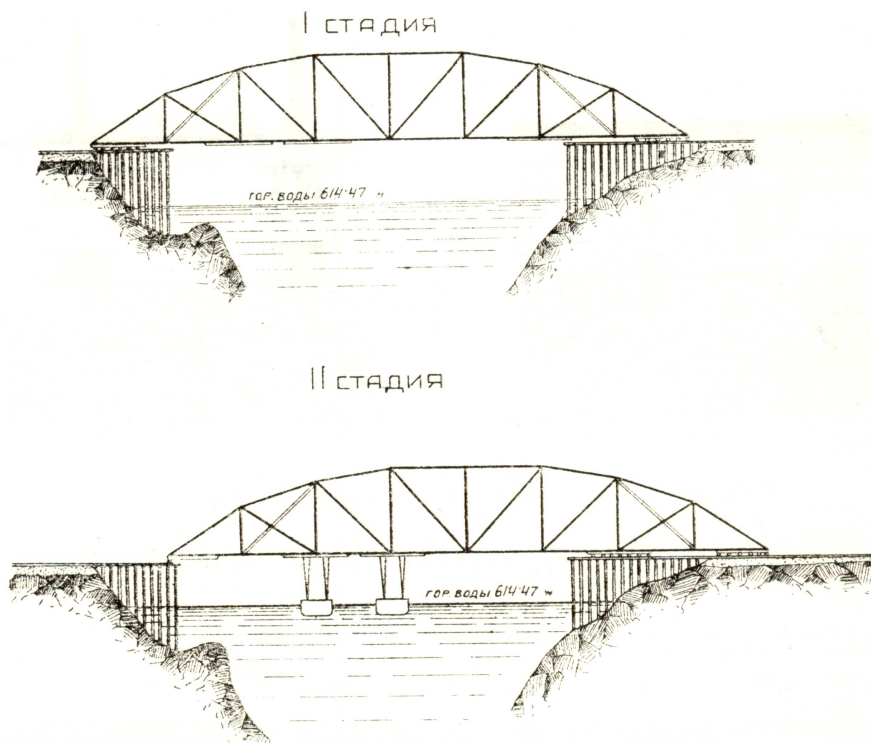
9) Затем ферму при помощи канатов и лебедок передвинули приблизительно на 7—6 $\frac{1}{2}$ мтр., после чего восточный конец фермы был



Чер. № 27. Расположение конца фермы на катках.

поднят на домкратах, были выведены катки из под концевой тележки и подведены под тележку забетонированной стойки восточного конца. Ферму опустили на эти катки.

10) Под узлами в $\frac{3}{8}$ и $\frac{1}{4}$ пролета со стороны озера были подведены баржи № 1 и № 2, из которых после этого было выгружено около 100 куб. мтр. песку из первой и около 180 куб. мтр. из второй, пока Западный конец фермы не висел свободно над катками. Затем, передвинули ферму приблизительно на 20 мтр. на восток (чер. № 28).



Чер. № 28.

11) Под северный со стороны озера конец фермы была подведена баржа № 3, из которой перегружали песок в баржу № 2, нагружая одновременно с тем песком и баржу № 1. Когда таким

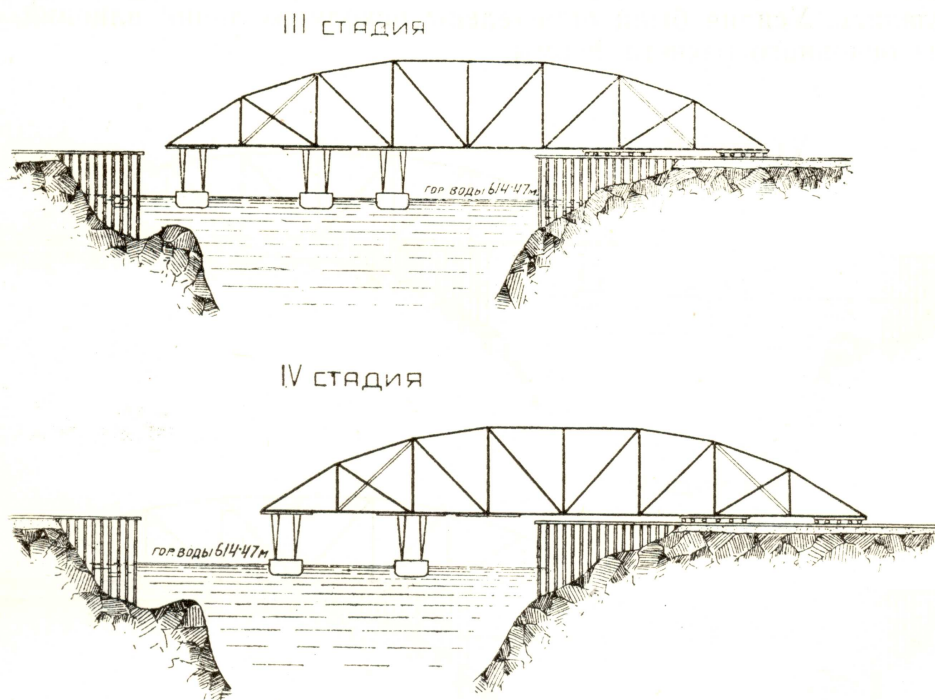
путем было перегружено около 180 куб. мтр. песка, то баржу № 1 представилась возможность вывести из под фермы.

Когда ферма была сдвинута в поперечном направлении в сторону озера, то произвели следующие работы:

Была выколота и очищена от льда необходимая площадь поверхности озера.

К этому времени закончилась загрузка трех барж достаточным количеством песка. На восточном берегу был заготовлен запас песка для догрузки барж № 1 и № 2.

Для подведения барж ледоколом при участии в работе парохода в бухте была выколота и очищена от льда площадь размером около 100×200 мтр. Выколотый лед толщиной до 1,5 мтр. вытаскивался отдельными кусками на поверхность застывшего озера и оттаскивался в сторону.



Чер. № 28.

12) Затем, передвинули ферму далее на восток до тех пор пока между баржей № 2 и лесами подмостями промежутки не сократился приблизительно до 20 мтр.

13) В баржу № 2 перегрузили из баржи № 3 еще 10 куб. мтр. песка, после чего представилась возможность вывести баржу № 3 из под фермы.

14) Затем, передвинули ферму еще приблизительно на 30 мтр. на восток.

15) Под узел в $\frac{1}{4}$ пролета со стороны озера подвели катки так, чтобы ферма могла этим узлом опираться на подмости и на колею.

16) После этого стали нагружать баржу № 3 песком до тех пор, пока не представилось возможным вывести эту баржу из под фермы.

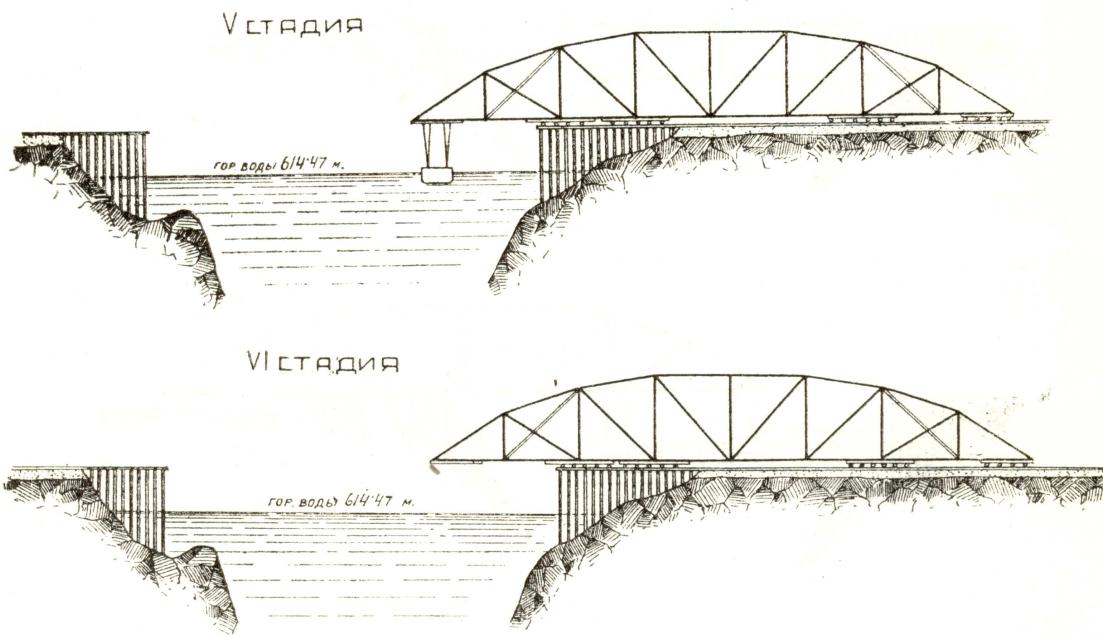
17) Вся дальнейшая передвижка фермы была совершена исключительно на катках (чер. № 27).

18) Наконец, приступили к разборке фермы.

Подсчет напряжений в ферме при перевозке.

Как было уже сказано, одним из основных требований, которым должен был удовлетворять способ сдвижки, являлось требование о недопущении перенапряжений в любой части фермы, в любой момент сдвижки. Для этого были определены все наибольшие напряжения, которые могли испытывать элементы фермы во время сдвижки.

Для определения наибольших вытягивающих и сжимающих усилий от опорных реакций и барж в элементах фермы в различных стадиях были подсчитаны усилия для каждой из этих стадий в отдельности, на основании чего и определены наибольшие и наименьшие вытягивающие и сжимающие напряжения в элементах фермы. Стадии III и IV в отношении распределения сил мало отличаются от таковых в стадиях II и V. Поэтому для этих стадий определения усилий особо не делались. Усилия были определены исходя из линий влияний, взятых из основного расчета фермы.



Чер. № 28.

Верхние и нижние пояса. Подсчет показывает, что напряжения в верхнем и нижнем поясах фермы во время перевозки теоретически не должны были превосходить 282 клгр. на кв. см., а в большинстве случаев должны были быть значительно ниже.

Что касается дополнительных напряжений в нижних поясах, проистекающих от распределения реакций от катков и барж, то таковые приведены в таблице XI (см. стр. 39).

Стойки: Наибольшее напряжение во всех стойках, кроме главных стоек, очень малы, что же касается стоек S_{3-9} , S_{12-13} , S_{20-21} и S_{24-25} , то напряжения их во время перевозки фермы были велики.

Как уже было сказано, стойки S_{8-9} и S_{24-25} были усилены железобетонным ядром и таким образом вопрос о постановке здесь измерительных приборов отпадал сам собой.

Остается вопрос о стойках S_{12-13} и S_{20-21} . В отношении этих стоек техническим отделом Управления Работ был сделан следующий подсчет:

Площадь сечения ω брутто = 93,495 см.².

Площадь сечения ω нетто = 89,411 см.²

Длина $l = 18,897$ мтр.

Момент инерции $J = 76108,13$ см.²

Отсюда φ — коэффициент уменьшения допускаемых напряжений в зависимости от продольного изгиба:

При $l = 18,897$ мтр.

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,00008 \frac{89,411 \cdot 18,897^2}{76108,13}} = 0,7401.$$

При $l = 9,4485$ мтр.

$$\varphi = 0,92$$

При раскреплении стойки посередине высоты путем соединения с соседними узлами промежуточных стоек мы можем принять коэффициент $\varphi = 0,92$, причем стойка предполагается в запас прочности со свободно вращающимися концами, тогда как на самом деле эти концы в некоторой степени закреплены. Таким образом при допущенном напряжении в 500 пуд./дм.² = $1269,56$ кг./см.² основное напряжение будет соответствовать $\frac{500}{0,92} = 544$ пуд./дм.² = 1381 кг./см.².

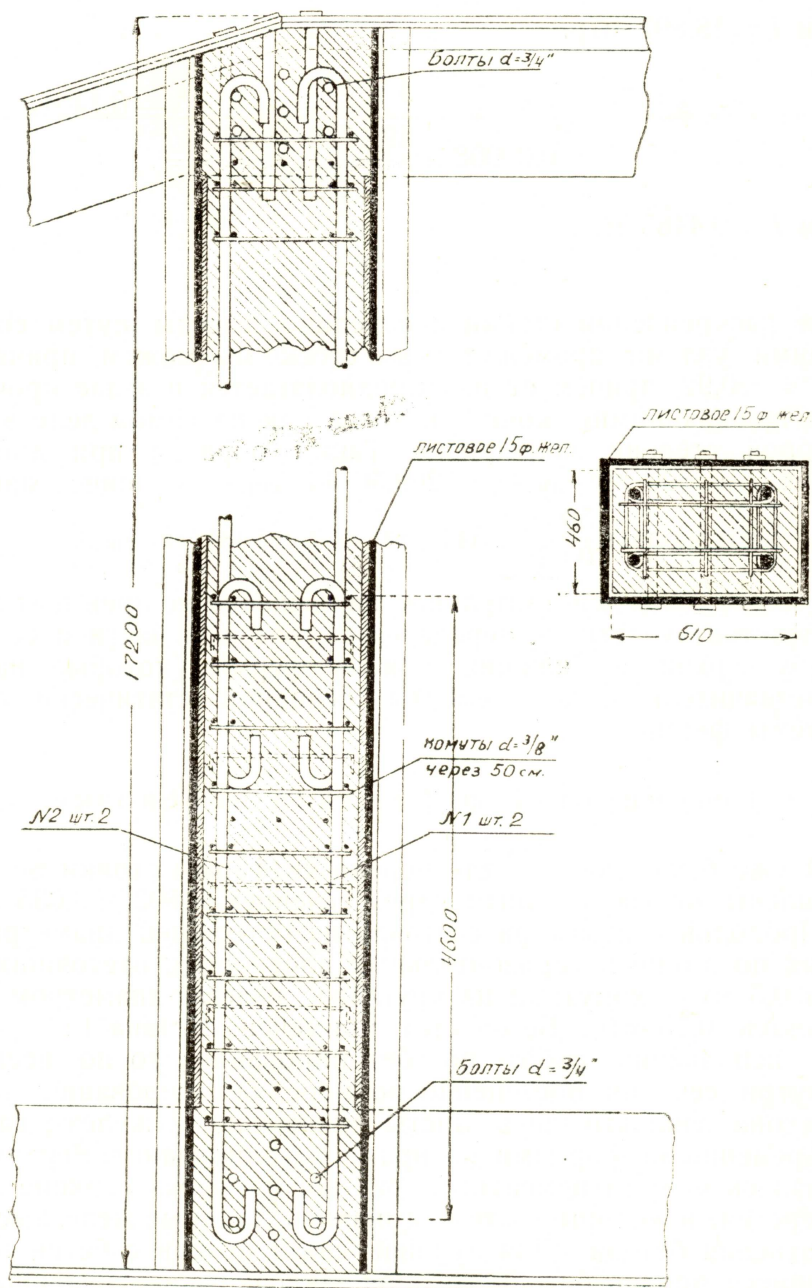
На самом деле действительное напряжение не превысит допускаемого, вследствие участия в передаче сил проезжей части и сопротивления изгибу верхних и нижних поясов фермы, которые напряжены весьма незначительно, как элементы основной статически определенной системы фермы.

Бетонировка фермы для перевозки.

Как уже было сказано, для перевозки фермы стойки S_{8-9} и S_{24-25} были усилены железобетонным ядром сечением $0,502 \times 0,635$ мтр. (чер. № 29). Продольная арматура состояла из 4 стержней диаметром 36 мм. связанных по длине в горизонтальных плоскостях, отстоящих друг от друга на 0,5 мтр. хомутами из круглого железа диаметром 12 мм. и длиной около 0,15 мтр. Бетон был применен состава $1:1\frac{1}{2}:2\frac{1}{2}$. Что касается исполнения работ по бетонированию, то по всей высоте стоек внутри сечения постепенно по мере бетонирования для удержания бетона закладывались листы кровельного железа, служившие только временными формами во время бетонирования. Верхняя коробка заливалась чистым цементным раствором через верхние заклепочные отверстия, в которые затем вгонялись длинные железные стержни для уплотнения бетона. Для лучшей связи поясов с бетонным ядром приходящиеся против бетонного ядра заклепки в вертикальных листах были срезаны и заменены сквозными железными болтами.

Диафрагмы в сжатых панелях нижнего пояса были установлены железобетонные и железные в количестве от 5 до 6 штук на малую панель длиной 7,925 мтр.

Четыре добавочные железобетонные диафрагмы устраивались в расстоянии 0,4 мтр. в сторону середины пролета от наружной грани забетонированных стоек фермы в нижнем поясе. Для этого накрест пропускались два болта, на одном из которых имелась нарезка, а на другом крюк. Оба они ставились возможно ближе друг к другу. По возможности ближе к ним зажималась вплотную между вертикальными листами нижнего пояса газовая трубка, через которую пропускался болт. Заклепки, где надо было располагать накрест стоящие болты, удалялись.



Чер. № 29. Усиление железобетонным ядром стоек S_{8-9} и S_{24-25} для перевозки фермы.

Когда все вышеозначенные работы были закончены, то еще раз произведенный поверочный расчет и сводка дали, что во время пе-

редвижки фермы во всех случаях ее расположения на опорах, катках и баржах можно ожидать в отдельных частях фермы следующие напряжения.

Таблица XI.

	Наибольшие напряжения			Наибольшие напряжения	
	Вытягив. кг/см ²	Сжимающ. кг/см ²		Вытягив. кг/см ²	Сжимающ. кг/см ²
U ₁₋₄ . . .	183,59	39,47	D _{20-23'} . .	1386,08	—
U ₄₋₈ . . .	254,15	76,94	D _{23'-25} . .	1529,56	48,59
U ₈₋₁₂ . .	248,95	172,80	D _{27'-29} . .	301,70	484,30
U ₁₂₋₁₆ . .	208,81	111,58	D _{24-27'} . .	253,97	726,00
U ₁₆₋₂₀ . .	205,26	59,36	D ₂₈₋₃₁ . .	522,02	304,27
U ₂₀₋₂₄ . .	245,87	173,23	S ₂₋₃ . . .	228,96	78,89
U ₂₄₋₂₈ . .	246,23	80,54	S ₄₋₅	198,60	74,75
U ₂₈₋₃₂ . .	176,38	39,62	S _{6-7'}	228,96	—
O ₁₋₃ . . .	31,32	143,61	S _{7'-7}	—	161,57
O ₃₋₅ . . .	78,56	250,24	S ₈₋₉	11,46	1624,10
O ₅₋₉ . . .	157,81	281,61	S _{10-11'} . .	228,96	—
O ₉₋₁₃ . . .	103,58	244,78	S _{11'-11} . .	—	161,57
O ₁₃₋₁₇ . .	36,27	179,81	S ₁₂₋₁₃ . .	216,66	1328,62
O ₁₇₋₂₁ . .	36,27	179,81	S _{14-15'} . .	228,96	—
O ₂₁₋₂₅ . .	46,58	241,02	S _{15'-15} . .	—	161,57
O ₂₅₋₂₉ . .	158,06	278,46	S ₁₆₋₁₇ . .	—	161,57
O ₂₉₋₃₁ . .	78,84	247,88	S _{18-19'} . .	—	161,57
O ₃₁₋₃₂ . .	31,50	142,24	S _{19'-19} . .	228,96	—
D ₃₋₄ . . .	527,41	304,27	S ₂₀₋₂₁ . . .	224,41	1311,55
D _{7'-8} . . .	260,65	725,53	S _{22-23'} . .	—	161,57
D _{5-7'} . . .	306,73	435,43	S _{23'-23} . .	228,96	—
D _{11'-12} . .	903,86	38,07	S ₂₄₋₂₅ . .	15,98	2311,35
D _{9-11'} . .	862,99	—	S _{26-27'} . .	—	161,57
D _{15'-16} . .	954,61	394,00	S _{27'-27} . .	228,96	—
D _{13-15'} . .	913,31	214,07	S ₂₈₋₂₉ . .	317,40	72,21
D _{16-19'} . .	904,44	223,55	S ₃₀₋₃₁ . . .	228,96	78,23
D _{19'-21} . .	944,02	405,51			

Наблюдения приборами.

Для того, чтобы проверить, действительно ли во время сдвижки фермы напряжения не будут превосходить исчисленных теоретически, были произведены измерения напряжений при посредстве измеритель-

ных приборов системы Рабю-Манэ-Мантеля. В распоряжении управления работ в феврале-марте 1915 г. имелось только два прибора. Возник вопрос, куда их поставить.—Если просмотреть таблицу напряжений, ожидаемых в элементах фермы во время ее передвижки, то видим, что верхние пояса будут иметь незначительные напряжения.

Нижние пояса будут иметь также весьма незначительные напряжения.

Четыре стойки будут иметь весьма высокие напряжения, именно: $S_{8-9} — 1624,10 \text{ кг/см.}^2$ $S_{12-13} — 1328,62 \text{ кг/см.}$ $S_{20-21} — 1311,55 \text{ кг/см.}$ $S_{24-25} — 2311,35 \text{ кг}^2\text{см.}^2$

Во время сдвижки на дополнительном раскосе D_{24-29} был установлен измеритель напряжений системы Рабю-Манэ-Мантеля. За время удаления концевой опоры восточного конца фермы и опускания фермы на катки под стойкой в четверти пролета с той же восточной стороны прибор не дал никакого отклонения стрелки. Поэтому надо полагать, что дополнительный раскос во время сдвижки оставался не напряженным.

Такой же измерительный прибор, помещенный на раскосе D_{5-8} с западной стороны, после наступления стадии II, а затем, после наступления стадии V дал отклонения стрелки, соответствующее растягивающему напряжению в 760 клгр./см.^2 . Так как по таблице напряжений здесь должно было быть напряжения в пределах от сжатия в $725,53 \text{ кгр. кв.}^2$ к растяжению в $260,65 \text{ клгр./кв. см.}$ т. е. изменение длины соответствующее растягивающему напряжению в $986,18 \text{ клгр./кв. см.}$, то полученное по измерителю напряжений показание в $760 \text{ клгр./кв. см.}$ является подтверждением того, что дополнительные раскосы работали в очень малой степени или совершенно не работали, так как расхождение в показаниях измерителя с расчетными может быть объяснено влиянием жесткости узловых соединений.

Таким образом, на основании всего вышеизложенного Управление постройки пришло к заключению, что за время сдвижки фермы в элементах ее не возникало никаких перенапряжений.

При этом необходимо отметить, что во время самой сдвижки никаких деформаций в элементах фермы замечено не было за исключением одного полураскоса d_{2-21} в третьей большой панели с восточной стороны, которая в стадии сдвижки V дал стрелу прогиба равную $0,17 \text{ мтр.}$, подобно тому как при надвижке фермы полураскос второй большой панели с западной стороны дал стрелу прогиба до $0,21 \text{ мтр.}$, что впрочем, не имело как будто никаких вредных последствий для работы фермы.

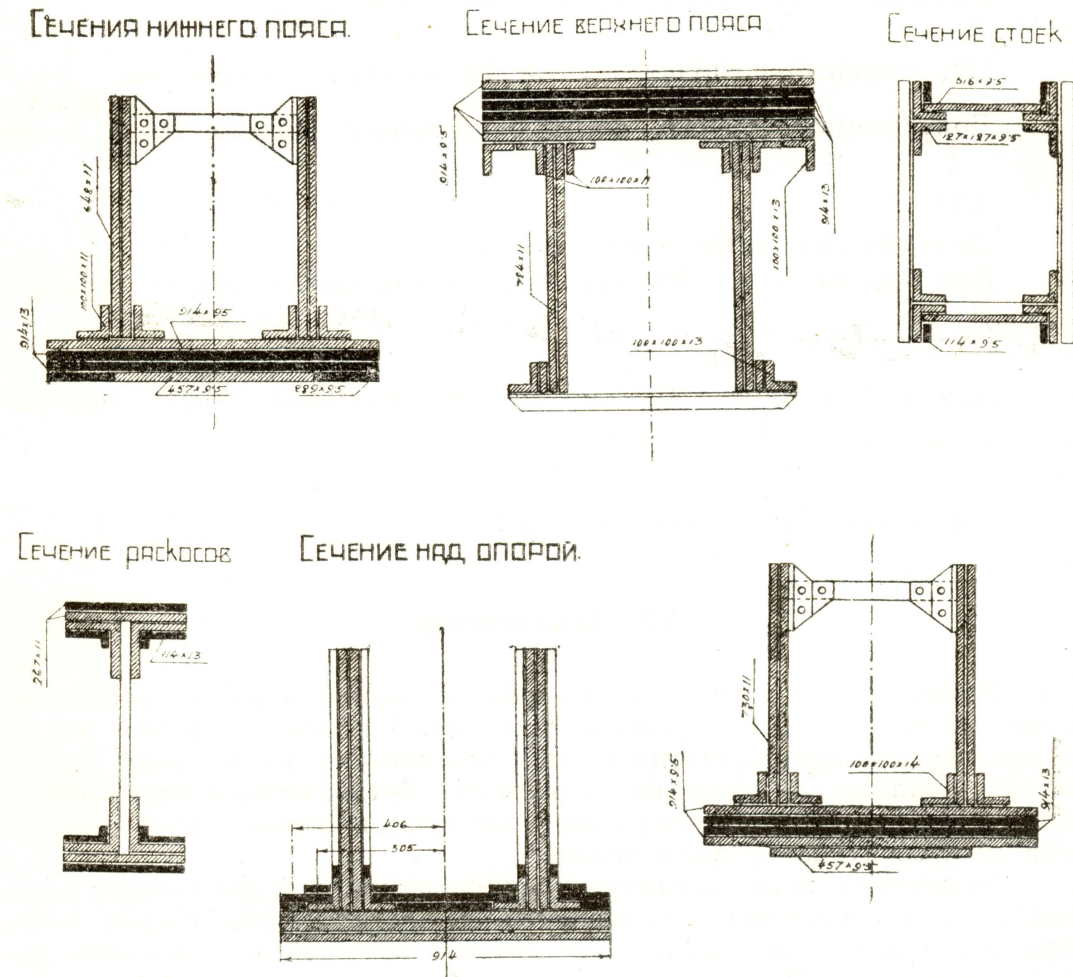
При передвижке фермы было одно обстоятельство, на которое повидимому не было обращено достаточное внимание. Оно заключается в следующем. При передвижке нижний пояс фермы должен быть в строго нормальном положении: не должно быть ни выпираний его, ни перекосов, ни иных искажений. Так обстоит дело теоретически. Рассматривая вопрос практически, видим, что на образование выпираний и перекосов нижнего пояса, и вообще на нарушение его нормального очертания могли влиять следующие факторы:

1) Волнение на озере и проистекающая отсюда динамическая нагрузка от поддерживающих ферму барж.

2) Волнение сзера могло вызвать также и простой перегруз барж и т. обр. явление чисто статического порядка.

3) При поперечной передвижке искажение очертания нижнего пояса могло получаться также и от неправильностей и неровностей пути, перекосов его, перекосов в движении тележек и катков и прочее.

Судить о том, имело ли все это место в действительности, данных нет. Известно только одно, что нивелировка по нижнему поясу фермы во время самой передвижки не производилась.



Чер. № 30. Усиление фермы после перевозки с бухты на 248 км.

Усиление фермы моста.

Как уже было сказано, ферма с бухты перед установкой на реке была пересчитана по нормам временной подвижной нагрузки 1907 года и усилена.

Усиление сечения верхнего пояса свелось к наклепке трех листов шириной 0,9 мтр. и толщиной по 13 мм. каждый лист (чер. № 30).

Нижний пояс был усилен двумя листами тех же размеров и только лишь в полупанелях № 1 и № 2 кроме таких двух листов были даны еще по два узких листа размером по ширине 22,5 см. и толщиной 13 мм.

Усиление стоек № 1, № 3, № 5 и № 7 произведено согласно чертежа № 30,

Испытание фермы моста в 1915 году.

По счастливой случайности мне удалось раздобыть некоторые данные статического и динамического испытания фермы моста после перевозки ее с бухты и установке ее на 248 клм. в 1915 г.

Статическое испытание в 1915 г.

Полный прогиб фермы при статическом испытании $f_c = 36,0$ мм.

Упругий прогиб фермы $f = 32,5$ мм. или $\frac{1}{3902} l$

Остающийся прогиб после удаления поезда $f = 3,5$ мм. или $\frac{1}{36228} l$

Допускаемый прогиб по официальным нормам $f = 85,2$ мм.
или $\frac{1}{1500} l$

Динамическое испытание в 1915 г.

При скорости $v = 20$ клм. час. вертикальная стрела прогиба $f = 32,5$ мм. или $\frac{1}{3902} l$

При скорости $v = 30$ клм. час. вертикальная стрела прогиба $f = 33,0$ мм. или $\frac{1}{3842} l$

Горизонтальная стрела прогиба $\Delta = 3,5$ мм. или $\frac{1}{36228} l$

VI. Заключение.

Ввиду всего вышеизложенного на основании личного знакомства с мостом в 1926 г., сообразуясь с историей перевозки фермы моста, основываясь на данных статического и динамического испытаний фермы моста, принимая во внимание результаты механического испытания и металлографического исследования металла, полагаю, что возможно прийти к следующему заключению.

Установить точно истинную причину происхождения трещин ферм моста не представляется возможным. Остается делать только лишь предположения о причинах разрушения с большей или меньшей долей вероятности. Повидимому среди различных возможных факторов, так или иначе игравших роль в создании условий для образования трещин на первом месте должны быть поставлены:

1. Пониженное качество металла.
2. Нарушение целостности фермы при ее перевозке.

Однако, оба эти фактора требуют детального рассмотрения.

Качество металла. О качестве металла мы можем судить во-первых, на основании механического испытания металла, во-вторых, на основании металлографических исследований металла, и в третьих, на основании результатов динамического испытания моста.

Механическое испытание металла дало вполне удовлетворительные результаты. И в самом деле: если обратиться к результатам механического испытания, то видим, что первые шесть образцов, взятые из уголков, по данным испытания на разрыв согласно технических условий НКПС изд. 1924 г. удовлетворяют марке ст. 3, идущей на мосты и только лишь последние два образца взятые из планок

удовлетворяют марке ст. 2, идущей на заклепки. Таким образом, результаты механического испытания не дают указаний о недоброкачестве металла.

При суждении о качестве металла весьма ценны будут показания динамического испытания моста. Практика мостового дела установила, что динамическое испытание косвенно может указывать на общее состояние моста. В данном случае результаты динамического испытания оказались удовлетворительными. Отсюда можно делать вывод, что фермы моста находятся в неплохом состоянии.

Общие результаты статического и динамического испытаний. Рассмотрение диаграмм при динамических испытаниях, при различных скоростях заездов, при открытых и закрытых регуляторах дает вообще благоприятную картину. Влияние скоростей отразилось довольно слабо. Колебательного эффекта почти не наблюдалось. Очертание диаграмм искажалось незначительно и лишь при больших скоростях. Все это в достаточной степени является благонадежным признаком, говорящим о спокойной работе отдельных элементов фермы моста. Это же свидетельствует и сравнение динамических коэффициентов. Они обнаруживают почти полную независимость от скоростей при испытании и близки к единице.

Вертикальную жесткость ферм по данным статического и динамического испытания следует признать достаточной.

Наибольшая амплитуда боковых колебаний достигла 7,5 мм или $\frac{1}{16920} l$ в плоскости верхнего пояса при скорости движения поезда $V = 40$ км./час. Эта амплитуда оказалось менее обычной $\frac{1}{15000} l$.

Поперечная жесткость строения на основании как статического, так и динамического испытаний может быть признана достаточной.

Весьма важным и интересным вопросом является вопрос об установлении степени старения моста. Для выяснения вопроса, связанного с суждением о пролетном строении в целом приходится обращаться к различным факторам.

Уменьшение монолитности пролетного строения, увеличение взаимной подвижности его элементов, то, что проф. Стрелецкий называет приближением к шарнирной схеме, может быть установлено на основании результатов статического испытания моста. Статическими признаками сказанного явления служит уменьшение строительного под'ема и увеличение конструктивных поправок. В нашем случае при испытании ферм моста, как уже было отмечено, строительный под'ем сохранился и увеличения конструктивных поправок не наблюдается.

Таким образом, ввиду результатов статического исследования казалось бы нет оснований утверждать об уменьшении монолитности пролетного строения обеих ферм моста.

Весьма показательным явилось бы увеличение с течением времени числа мелких зубцов на диаграммах прогибов и напряжений и вообще уменьшение их плавности. К сожалению это обстоятельство трудно проверить на практике, так как мелкие зубцы в значительной доле зависят от состояния пути и колес подвижного состава. Кроме того не всегда бывает практическая возможность сравнить ныне снятые диаграммы с теми, которые получались много лет тому назад.

К числу материалов для суждения о процессе старения моста надо отнести наблюдения над вынужденными и свободными колебаниями.

Амплитуды колебания могут изменяться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Однако, наука мостового дела пока еще не в состоянии дать исчерпывающий ответ на поставленный вопрос, о связи степени старения моста с изменением амплитуды колебаний, так как еще неизвестно соотношение между влиянием старения металла и старением заклепочных соединений. Старение металла должно понижать амплитуду колебаний, старение же заклепочных соединений может вызвать и увеличение таковых. Обычно практически вопрос является неразрешимым потому, что невозможно располагать достоверными данными о первоначальных динамических колебательных свойствах металла и пролетного строения в целом. Не зная начальных свойств, мы, понятно, не можем сделать вывода о том, в которую сторону произошло изменение.

По мере старения моста период собственных колебаний пролетного строения, а вместе с ним и критическая скорость состава должны несколько уменьшаться. Это происходит потому, что силы внутреннего трения, пропорциональные скорости деформаций, вызывают увеличение периода колебаний. Силы же простого трения не влияют на период. В пролетном строении повидимому имеют место оба вида трения. Поэтому их увеличение, неизбежно возникающее с годами, должно вызвать удлинение периода колебаний и уменьшение критической скорости состава. Это неблагоприятное обстоятельство теоритически заслуживает полного внимания, но к сожалению практическое использование его может быть осуществлено только лишь спустя много лет, а потому и является для нас неосуществимым.

Наиболее яркое и глубокое проявление процесса старения моста должно состоять в изменении характера продолжительности и числа свободных колебаний пролетного строения. Надо иметь ввиду, что все факторы старения действуют в одну сторону, поэтому интенсивность результатов будет проявляться особенно отчетливо и ярко. Собственное малое колебание всякой системы не зависит от причины, которая их вызвала, т. е. от природы и характера нагрузки, а зависит лишь от природы самой колеблющейся системы. Рассматривая диаграммы динамического испытания ферм нашего моста, мы не можем считать, что число свободных колебаний и интенсивное убывание амплитуд каждой последовательной волны идет на убыль, что говорило бы о значительных размерах одряхления моста. Свободное колебание, медленно и правильно убывающее, свидетельствуют о достаточной жизнеспособности мостового строения. В нашем случае нет резко выраженных нарушений какой либо закономерности в уменьшении амплитуды из числа колебаний. А это казалось бы должно говорить за то, что ферма моста еще не одряхлела.

Металлографическое исследование. Металлографическое исследование показывает, что железо главным образом состоит из феррита и потому оно должно было бы выдержать эти пробы, если бы в нем не было вредных сернистых и фосфористых включений и обособленных включений сернистого марганца, обнаруженных на макро и микрошлифе, указующих на несколько пониженное качество металла. Однако, результаты металлографического исследования не дают категорических указаний о степени негодности данного металла в мостовом деле. Поэтому делать какие либо окончательные выводы, основываясь исключительно только на металлографическом испытании не будет конечно правильным и не исчерпает всего внутреннего содержания вопроса.

Весьма интересен и важен вопрос о том, повлияло ли и если повлияло, то в какой мере на целость ферм моста то, что во время передвижки и перевозки были перенапряжения.

Казалось-бы, что при наличии невысокого качества металла перенапряжения должны были бы отозваться на целости фермы особенно заметно. Однако, это не только не доказано, но факты, как будто говорят даже и обратное. В акте освидетельствования перевезенной фермы моста после усиления и склепки в мае 1915 г. не только нет указаний на дефекты, но, напротив, говорится о том, что ферма находится в хорошем состоянии. Возможно, конечно, справедливо указать на то, что подобного рода акты не могут служить еще доказательством в таком тонком, деликатном деле как установление наличия волосянных трещин в небольшом сравнительно количестве 52 штук, раскиданных на огромной площади двух ферм моста.

Есть соображения и другого порядка. Рассматривая места, где в настоящее время наблюдаются трещины, видим, что таковые находятся в верхнем поясе, в нижнем поясе, в стойках и в диаганалях. Замечательно то, что количество и размер этих трещин не согласуется или лучше сказать, не увязывается с размером напряжений, которые ожидалось согласно расчета в фермах моста при ее передвижке и перевозке.

Трещина № 2, как было уже сказано, находится в уголке верхнего пояса O_{9-11} правой фермы. Трещина проходит через весь уголок, ширина трещины около 0,1 мм. Таким образом, повидимому эта трещина явилась в результате высоких напряжений в металле. Однако, мы видим, что согласно подсчетов здесь напряжения могли быть растягивающие +103,58 кгр. на кв. см. и сжимающие — 244,78 кгр. на кв. см. Таким образом, подсчет указывает на то, что напряжения здесь были весьма низки и составляли всего только лишь около 30% от допустимых напряжений. Непонятно также и то, что деформировался в виде разрыва один только уголок, а остальные уголки и вертикальные и горизонтальные листы остались недеформированными, целыми.

Трещина № 3 в уголке верхнего пояса O_{13-15} правой фермы. Ширина ее доходит до 0,3 мм. Трещина проходит через весь уголок. Приходится полагать, что и здесь очевидно действовали какие то весьма значительные силы. Если обратиться к подсчетам напряжений в этом элементе фермы во время ее передвижки и перевозки, то видим, что здесь были напряжения растягивающие +36,27 кгр. на кв. см. и сжимающие — 179,81 кгр. на кв. см. По сравнению с предидущим случаем напряжения были меньше, а деформация получилась большая.

Рассматривая трещины № 4, № 5, № 7, № 10, № 11, № 12 и № 12 видим что они относятся к вертикальным стойкам S_{8-9} , S_{20-21} , S_{24-25} где напряжения были на сжатие весьма высокие, именно:

в стойке S_{2-9}	1624,10	кгр. на кв. см.
” S_{12-13}	1328,62	” ” ” ”
” S_{20-21}	1311,55	” ” ” ”
” S_{24-25}	2211,35	” ” ” ”

Рассмотрение деформаций, выразившихся в виде трещин, указывает, что здесь далеко не всегда трещины получались значительного вида. Иногда они едва заметные. В некоторых случаях, при наличии высоких перенапряжениях трещин даже нет. Такова стойка S_{12-13} , где трещины захватывают только лишь часть полки уголка и глубоко не

идут. Напряжения получались превосходящими допустимое напряжение металла. В этих случаях еще как будто есть формальное основание отнести все эти трещины по своему происхождению к результатам перенапряжений металла при передвижке и перевозке ферм.

Но наряду с этими трещинами мы видим много трещин в таких местах, где напряжение металла во время передвижки и перевозки были безусловно незначительными. Происхождение таких трещин является загадочным.

Наряду с вопросом о происхождении трещин важным является вопрос о том, в какой мере наличие этих трещин может отзываться на пользовании мостом. Вопрос об эксплуатации моста по видимому не представляет собой чего либо угрожающего. К такому именно заключению приводят те соображения, что деформации обнаружены исключительно только в уголках и не было ни одного случая наблюдения трещин в вертикальных или горизонтальных листах. Результаты статического и динамического испытания с категоричностью говорят за то, что никакой угрозы эксплуатируемым фермам моста нет, механическое испытание металла также дает положительные результаты.