

ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ОСЖД)

II издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 17 – 20 сентября 2013 г.,
Республика Болгария, г. Враца

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 28 – 31 октября 2013 г.,
Комитет ОСЖД, г. Варшава

Дата вступления в силу: 31 октября 2013 г.

Примечание: Теряет силу I издание от 29.06.1989 г.

**Р
774/3**

**РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННОЙ НАГРУЗКИ
НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ГЛАВНЫХ ФЕРМ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ**

Ввод в обращение вагонов с повышенными осевыми и погонными нагрузками ускоряет процессы накопления усталостных повреждений в элементах металлических пролетных строений. При этом вероятность образования усталостных трещин в элементах увеличивается, а долговечность таких элементов по выносливости снижается.

В связи с планируемым изменением режимов эксплуатации железнодорожных мостов, в частности, вводом повышенных нагрузок, возникает необходимость в оценке усталостной долговечности элементов пролетных строений, дающей возможность наметить способы и очередность усиления по выносливости пролетных строений, расположенных на железных дорогах с разными условиями эксплуатации.

Наиболее распространенным способом оценки влияния ввода повышенных осевых нагрузок на выносливость элементов пролетных строений является сравнительная оценка их усталостных ресурсов при различных режимах нагруженности или определение остаточного усталостного ресурса.

Настоящие рекомендации предназначены для определения усталостного ресурса клепаных к болтовым соединений элементов главных ферм эксплуатируемых железнодорожных мостов. Рекомендации разработаны применительно к условиям эксплуатации, особенностям конструкции и методам оценки выносливости металлических пролетных строений мостов.

Эти рекомендации могут быть использованы дорогами членами ОСЖД в качестве основы для разработки национальных норм определения усталостного ресурса с учетом конкретных условий эксплуатации, особенности конструкции и принятых на дорогах методик оценки выносливости мостовых конструкций.

1. ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ РЕШЕТКИ ГЛАВНЫХ ФЕРМ КЛЕПАНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Под усталостным ресурсом понимается наработка элемента пролетного строения от начала его эксплуатации до повреждения усталостной трещиной с заданной степенью вероятности.

Нарботка - продолжительность или объем работы элемента.

За остаточный усталостный ресурс принимают разность между усталостным ресурсом элемента и его наработкой к рассматриваемому моменту времени.

При оценке усталостного ресурса пролетных строений в качестве измерителя наработки принимают для приближенных оценок пропущенный тоннаж или число условных поездов. Для получения более точных оценок принимают величину усталостного повреждения от блоков нагрузки, прошедшей по мосту.

1.1. Проводимые наблюдения за появлением усталостных трещин в элементах клепаных пролетных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов на линиях с различной грузонапряженностью показали, что частота

появления усталостных трещин зависит от пропущенного по пролетным строениям тоннажа и их конструктивных форм.

Статистическая обработка полученных данных позволила установить значения вероятностей появления усталостных трещин в зависимости от пропущенного тоннажа в элементах главных ферм ряда пролетных строений, спроектированных по старым нормам.

Результаты этих исследований приведены в табл.1.

Усталостный ресурс элементов решетки главных для пролетных строений, длины которых и конструктивные формы соответствуют приведенным в табл.1, могут быть определены с использованием данных указанной таблицы.

Т а б л и ц а 1

Вероятность образования трещин
в элементах клепаных пролетных строений железнодорожных мостов

пропущенный тоннаж млн.т $Q_{табл}$	нормы проекти- рования (год)	Очертания поясов Длина панели для подвесок	расчетные пролеты, (м)	Вероятность $P_{табл}$ % при соотношении $\frac{\alpha}{l}$				
				0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
РАСКОСЫ								
650	1884	полигональные	22,56-66,14	2,9	1,9	0	2,6	12,5
÷	1896	параллельное	22,63-65,88	0,7	2,7	4,7	10,4	8,7
1000	1907	полигональные	27,20-44,66	2,1	0,8	0,6	1,2	0,6
÷		параллельное	22,80-55,10	1,0	0	5,7	0,8	1,8
ПОДВЕСКИ								
				Вероятность %				
500	1884	3,9-4,4		1,7				
700	1896	5,5	22,63-55,06	2,5				
750	1907	5,5	33,6-76,8	1,7				
700		4,2		1,4				

Пр и м е ч а н и е : α - расстояние от вершины положительного участка линии влияния до ее ближайшего конца;

l - полная длина линии влияния.

За усталостный ресурс (Q) принимается пропущенный по пролетному строению тоннаж с начала его эксплуатации до образования усталостной трещины с расчетной вероятностью ($P_p=2\%$).

$$Q = Q_{табл} \frac{P_p}{P_{табл}}$$

где: $Q_{табл}$ - табличное значение тоннажа в млн.т;

$P_p, P_{табл}$ — вероятности образования усталостных трещин, соответственно расчетная и табличная в %.

Остаточный усталостный ресурс элемента $Q_{ост}$ неизменном режиме эксплуатации может быть определен из выражения

$$Q_{ост} = Q - Q_t$$

где: Q - усталостный ресурс элемента в млн.т с вероятностью образования усталостной трещины в 2%.

Q_t - пропущенный по пролетному строению тоннаж к рассматриваемому моменту времени в млн.т.

Исходной информацией для определения пропущенного тоннажа за рассматриваемый период служат статистические данные служб пути о грузонапряженности дорог или участков дорог за определенный год и графики изменения грузонапряженности за достаточно длительный период времени.

1.2. Для определения усталостного ресурса элементов пролетных строений в связи с перспективным изменением режимов их эксплуатации (ввода в обращение повышенных нагрузок) более удобно измерять наработку числом прошедших по пролетному строению поездов. Вместе с тем многообразие обращающихся поездных нагрузок, различие в их усталостном воздействии на элементы пролетных строений, нестационарность режимов нагружения создают определенные трудности в использовании такого измерителя наработки. Однако большую часть трудностей возможно устранить, если усталостные повреждения, создаваемые в элементе расчетным (обращающимся) поездом, выразить через повреждение, создаваемое в этом же элементе условным (эталонным) поездом. Тогда наработка элемента, выраженная числом условных поездов $N_{усл}$ составит:

$$N_{усл} = \sum N_i k_{ni}$$

где: N_i - число расчетных поездов i -го типа;

k_{ni} - коэффициент наработки для, поезда i -го типа.

Коэффициент наработки определяется, как отношение величин накопленных усталостных повреждений от расчетного и условного поезда:

$$k_{ni} = \frac{V_p}{V_{усл}}$$

где: V_p - повреждение, вызванное действием расчетного поезда;

$V_{усл}$ - повреждение, вызванное действием условного поезда.

Величины k_{ni} зависят от типа расчетного поезда (нагрузки), конструктивных форм клепаных и болтовых прикреплений элементов, длины и формы линии влияния. Они рассчитываются заранее и представляются в табличной форме.

Проведенные исследования показали, что коэффициенты наработки практически инвариантны к большинству параметров усталостного расчета

заклепочных соединений в достаточно широком диапазоне нагрузок и длин линий влияния. Однако для отдельных типов расчетных поездов и двухзначных линий влияния длиной 33-35 м ошибки при определении k_n могут достигать 20 %.

В качестве условного может быть принят любой из тяжеловесных поездов как из обращающихся на сети дорог, так и состоящий из перспективных экипажей. Однако, в последнем случае, должна быть известна схема поезда.

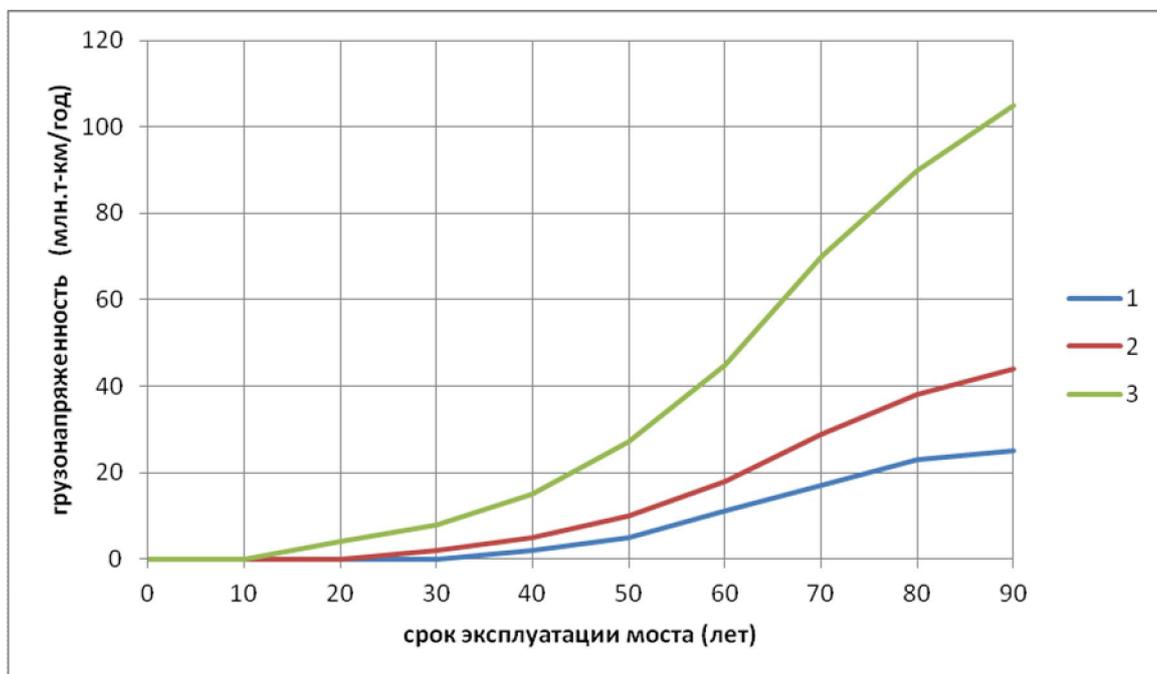


Рис. 1

1. Среднесетевые данные
2. Средние, данные по главным путям
3. Средние данные по путям высокой грузопряженностью

В данном случае за условный поезд принят поезд с локомотивом ВЛ-80 и полногрузными вагонами общей длиной 750 м. Схема поезда приведена на рис. 2.

Схема условного (эталонного) поезда

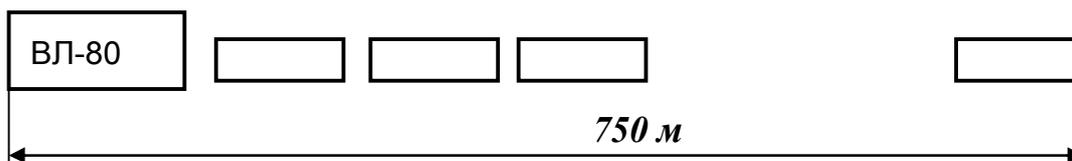


Схема локомотива ВЛ- 80
осевая нагрузка 228,1кН

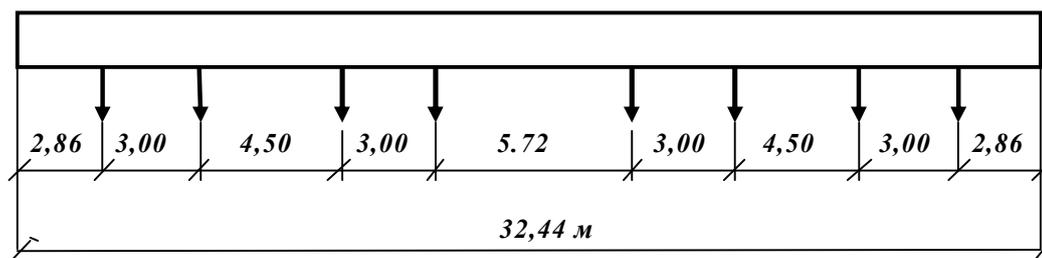


Схема вагона
осевая нагрузка 203,1кН

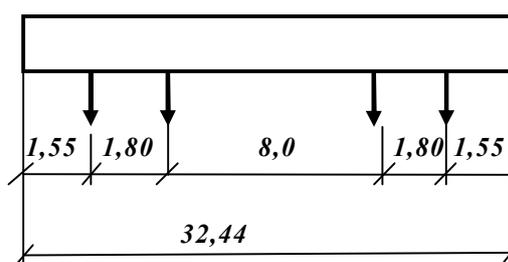


Рис.2

Величина усталостного повреждения элемента от условного поезда определяется по формуле

$$v_{\text{уст}} = \left(\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \right) k$$

где: n_1, n_2 - числа циклов от поезда в целом и от вагонной нагрузки;

N_1 - число циклов до разрушения, по кривой усталости для характеристик циклов напряжений от локомотива;

N_2 - то же для характеристик циклов напряжений от вагонной нагрузки;

k_{ni} - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения усилий между рядами заклепок вдоль соединения.

Для выбранной модели условного поезда число циклов от поезда в целом $n_1 = I$. Число циклов от вагонной нагрузки условного поезда может быть определено из выражения.

$$n_2 = \left(50 - \frac{L}{15} \right) n_{\text{лв}}$$

где: L - длина линии влияния элемента;

$n_{\text{лв}}$ - коэффициент формы линии влияния, равный 1 для двухзначных и 2 для однозначных линий влияния.

Величины N_1, N_2 - определяются с помощью кривых усталости клепаных прикреплений, выраженных формулой, учитывающей в прямом виде различные коэффициенты асимметрии циклов напряжений, образующихся в элементе при проходе поезда, а также прочностные характеристики материала элементов.

$$\lg N = AB^{\frac{1}{1-\rho}} \left(\frac{\sigma'_b}{\sigma_{\max}} - 1 \right)^c$$

где A, B, C - коэффициенты, зависящие от конструкции клепаного соединения. Определяются экспериментально на основании испытаний образцов;

ρ - коэффициент асимметрии напряжений рассматриваемой группы циклов;

σ_{\max} - максимальное напряжение цикла;

σ'_b - условное напряжение, при котором клепаное соединение разрушается при одном цикле нагрузки (условный предел прочности соединений).

Величины коэффициентов A, B, C для клепаных соединений из малоуглеродистых сталей приведены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Тип соединения	A	B	C
C односрезными заклепками	3,468	1,100	0,245
C двухсрезными заклепками	3,598	1,100	0,245

Значения σ'_b для заклепочных соединений из литого железа принимаются по табл.3.

Т а б л и ц а 3

Величины σ'_b для элементов из литого железа в МПа.

Соединения с ослабленными заклепками	с	Соединения с плотными заклепками	
		односрезными	двухсрезными
392,4		$392,4 + 24,53n_3$	$392,4 + 44,15n_3$

Примечание:

- n_3 - число заклепок в первом ряду соединения;
- Для других мостовых сталей σ'_b может быть принято равным пределу их прочности.

Величина K определяется по формуле.

$$K = \frac{K_{\text{пер}} n_3}{m}$$

где: m - общее число заклепок в соединении;

n_3 - число заклепок в первом ряду;

$K_{\text{пер}}$ - коэффициент перегрузки заклепок первого ряда принимается по табл.4.

Т а б л и ц а 4

Коэффициенты перегрузки первого ряда заклепок

Число поперечных рядов заклепок	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K_{\text{пер}}$	1,05	1,10	1,15	1,21	1,27	1,32	1,38	1,43	1,47	1,5

Характеристики нагруженности элемента (σ_{max} , σ_{min} , ρ) от локомотива и от вагонной нагрузки определяются графоаналитическим методом - "прокатыванием" поезда справа налево по линии влияния исследуемого элемента. При определении напряжений должен быть учтен собственный вес пролетного строения.

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_m + \sigma_a + \sigma_{\text{св}};$$

$$\sigma_{\text{min}} = \sigma_m - \sigma_a + \sigma_{\text{св}};$$

$$\rho = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$$

σ_m - средние напряжения цикла;

σ_a - амплитуда напряжений;

$\sigma_{\text{св}}$ - напряжения от собственного веса пролетного строения.

По известным характеристикам нагруженности элемента определяются $\lg N_1$, $\lg N_2$, а затем величина усталостного повреждения от условного поезда.

$$v_{\text{усл}} = \left(\frac{1}{10^{\lg N_1}} - \frac{n_3}{10^{\lg N_2}} \right) K$$

Аналогичным образом определяется величина усталостного повреждения элемента от расчетных поездов разного типа.

Усталостный ресурс элемента, выраженный в количестве условных поездов, определяется по известному усталостному воздействию на элемент условного поезда $v_{\text{усл}}$ параметрам функции распределения долговечности.

$$y = f(x), \quad \text{где } x = \lg N_{\text{усл}}.$$

Для заклепочных соединений функция вероятностного распределения долговечности может быть представлена выражением:

$$y = ax + b$$

$$\text{где } a = \quad ; \quad b = 2,5xa.$$

Величины x_1 и x_2 функционально связаны с накопленными усталостными повреждениями от условного поезда соответственно в ослабленных $V_{\text{осл}}$ и плотных $V_{\text{пл}}$ заклепочных соединениях и определяются по формулам

$$x_1 = \lg \frac{1}{v_{\text{осл}}} ; \quad x_2 = \lg \frac{1}{v_{\text{пл}}}$$

Усталостный ресурс, при принятой вероятности отказа элемента по выносливости 0,2 определяется из выражения

$$N_{\text{усл}} = 10^x$$

$$\text{где: } x = \frac{2,95 - b}{a}$$

Для сокращения трудоемкой вспомогательной работы и для выполнения массовых расчетов величины усталостного ресурса в условных поездах и значения коэффициентов наработки расчетных поездов целесообразно пользоваться соответствующим программным комплексом.

Остаточный ресурс в условных поездах $N_{\text{ост}}$ определится по формуле ,

$$N_{\text{ост}} = N_{\text{усл}} - N_{\text{усл.t}}$$

где $N_{\text{усл}}$ - усталостный ресурс элемента в условных поездах;

$N_{\text{усл.t}}$ - наработка элемента в условных поездах к рассматриваемому моменту времени.

Для оценки влияния повышенных нагрузок на усталостную долговечность элемента следует полученный для этого элемента остаточный ресурс в условных поездах выразить через грузовые потоки из расчетных поездов с помощью их коэффициентов наработки. Причем грузовые потоки из расчетных поездов могут быть различными как по структуре формирования, так и по весу. В этом случае величина наработки элемента, выраженная мерой его повреждения, составит:

$$v = \int_0^{N_x} \frac{dn}{N} ; \quad v = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

n, n_i – число пройденных в элементе циклов с максимальным напряжением цикла σ и σ_i ;

N, N_i - число циклов до разрушения с максимальным напряжением цикла σ и σ_i ; по кривой усталости.

Поскольку максимальные напряжения цикла от поездных нагрузок являются случайной величиной, то

$$dn = n_0 f(\sigma) d\sigma,$$

где n_0 - общее число циклов-напряжений;

$f(\sigma)$ - функция плотности распределения вероятностей величин напряжений.

Проведенные исследования показали, что в большинстве элементов главных ферм статистическое распределение напряжений σ от всей рассматриваемой поездной нагрузки или блоков нагрузки хорошо согласуется с нормальным законом. Кроме того, кривые усталости клепаных соединений из малоуглеродистых сталей с концентраторами напряжений α_σ , изменяющихся от 1,1 до 6,0 при коэффициенте асимметрии, циклов $\rho = 0$ (пульсирующие циклы нагрузки) пересекаются в точке с координатами ($\sigma = 876$ МПа и $N_{on} = 215$).

С учетом вышесказанного, для определения величины наработки элемента от накопленных усталостных повреждений, получено следующее выражение

$$v = \frac{n'_0}{N_{on} \sigma_\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{\sigma'}^{\infty} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{on}} \right)^m e^{-\frac{\sigma_0 - m_\sigma}{2\sigma_\sigma}} d\sigma,$$

где N_{on}, σ_{on} - координаты точки пересечения кривых усталости заклепочных соединений с различными концентраторами напряжений при $\rho = 0$;

σ_0 - максимальные напряжения пульсирующих циклов;

m_σ, σ_σ - математическое ожидание и стандартное отклонение случайной величины;

σ' - максимальное напряжение цикла, ниже которого элемент не повреждается;

n'_0 - число циклов переменных напряжений в элементе за рассматриваемый период времени работы элемента.

При выводе вышеприведенной зависимости принят линейный закон суммирования усталостных повреждений $\left(\sum_1^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \right)$ и степенная зависимость для левых наклонных участков кривой усталости

$$\sigma_i^m N_i = const.$$

Максимальная величина неповреждаемых напряжений σ' для клепаных соединений из малоуглеродистых сталей может быть принята равной $0,5 \sigma'_0$; где σ'_0 - ограниченный предел выносливости при $\rho = 0$ при базе 2×10^6 циклов нагрузки при вероятности разрушения $\rho = 0,5$.

Математические ожидания и стандартные отклонения функции распределения максимальных напряжений циклов определяются на основе статистической обработки параметров режимов нагруженности элемента от всего транспортного потока или от блока поездной нагрузки. При обработке все разнообразие циклов нагрузки приводится к однопараметрическим пульсирующим циклам ($\rho = 0$) с помощью использования зависимостей известной диаграммы предельных напряжений Гудмана-Смита.

$$\sigma_0 = \sigma_{max} - A_1 \sigma_{min} ;$$

$$A_1 = \frac{\sigma'_0 - \sigma'_{-1}}{\sigma'_{-1}}$$

где: $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ - максимальные и минимальные напряжения приводимого цикла;

σ'_0, σ'_{-1} - пределы выносливости при ($\rho = 0$) и ($\rho = -1$) для элементов клепаного соединения с заданными материалом и величиной коэффициента концентрации напряжений.

Расчетная мера повреждения $v_{расч}$ определялась на основе статистической обработки данных по усталостным разрушениям приблизительно 100 раскосов главных ферм пролетных строений железнодорожных мостов. Эти пролетные строения были изготовлены из различных марок малоуглеродистых сталей по расчетным нормам 1896, 1907 и 1931 годов. Срок эксплуатации пролетных строений составлял от 55 по 25 лет. При определении суммы накопленных усталостных повреждений элемента, соответствующих его отказу по выносливости (образование усталостной трещины) использовались характеристики соответствующей кривой усталости при вероятности 0,5.

Статистическая обработка полученных данных показала, что распределение величин v удовлетворительно аппроксимируется кривой нормального распределения с параметрами: математическое ожидание $m_v = 0,75$ и стандартное отклонение $\sigma_v = 0,21$.

За расчетный уровень накопленных усталостных повреждений была принята величина $V = 0,3$, обеспечивающая вероятность безотказной работы элементов пролетных строений по выносливости $\rho = 0,9845$.

Таким образом, за усталостный ресурс клепаных пролетных строений принята величина наработки, выраженная суммой накопленных в них относительных усталостных повреждений, равной $v_{расч} = 0,3$.

Величина остаточного усталостного ресурса определится в данном случае из выражения:

$$v_{ост} = v_{расч} - v_{\xi} = 0,3 - v_{\xi}$$

где: $v_{ост}$ - остаточный усталостный ресурс, выраженный допускаемым уровнем относительных усталостных повреждений;

v_{ξ} - сумма накопленных усталостных повреждений к рассматриваемому моменту времени.

Поскольку сумма усталостных повреждений непосредственно связана с режимом нагруженности пролетного строения, а, следовательно, с транспортными потоками, то она может быть выражена в количестве поездов разного типа, или во времени, если известна интенсивность движения поездов в процессе эксплуатации.

2. ОЦЕНКА РЕЖИМОВ НАГРУЖЕННОСТИ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ

Для оценки режимов нагруженности рекомендуется разрабатывать математическую модель потока экипажей. Модель должна соответствовать реальному потоку формирования поездов по сети дорог или на рассматриваемом участке железной дороги. Кроме того, она должна учитывать динамику ввода в эксплуатацию новых и перспективных нагрузок.

Исходной информацией для разработки математической модели могут служить статистические отчетности дорог об интенсивности и структуре грузопотоков, данные о параметрах парка подвижного состава, включая перспективные локомотивы, вагоны и транспортеры с повышенным давлением от оси на рельсы.

Математическая модель потока должна отражать количество поездов, проходящих по мосту за выбранный для расчета наработки отрезок времени, долю соответствующих типов поездов в общем объеме транспортного потока грузовых (загруженных; порожних, случайно сформированных) и пассажирских поездов, геометрические и весовые параметры локомотивов и вагонов, включая перспективные.

Структуру грузопотоков для первоначального периода эксплуатации мостов и в перспективе допускается моделировать на основе общих закономерностей роста интенсивности движения и веса поездных нагрузок по всей сети, отдельных железных дорог или их участков.

Смоделированный транспортный поток используется для определения режимов нагруженности элементов пролетных строений.

Под режимом нагруженности понимается двухпараметрическое распределение общего числа возникающих в элементе циклов напряжений/усилий/по амплитудам и уровням средних напряжений.

Для определения режимов нагруженности применяют экспериментальный или расчетный методы, а также оба метода в совокупности.

Экспериментальный метод применяется, как правило, для определения режимов нагруженности элементов пролетных строений от обращающихся на данный период поездной нагрузки. Метод основан на обработке осциллограмм напряжений, записанных от проходящих поездов в сочетании с анализом сведений о составе этих поездов.

По данным исследований достаточно точно полную характеристику режимов нагруженности элементов пролетных строений от обращающегося на данный период транспортного потока обеспечивает обработка осциллограмм, записанных от проходящих по пролетному строению поездов в течение одних суток или более продолжительный отрезок времени.

Обработка осциллограмм основана на систематизации циклов по размаху напряжений. При этом при обработке используется так называемый метод "полных циклов".

Результаты обработки записываются в матричной форме. Матрица представляет собой таблицу, в которой записаны числа циклов с одинаковыми значениями максимальных и минимальных напряжений отдельно для каждого типа нагрузки и вида линии влияния.

Матрицы в совокупности с заданным транспортным потоком используются для определения суммарного числа циклов в элементе от всех прошедших поездов.

Для определения параметров режимов нагружения элементов от транспортного потока, включающего ранее обращающиеся и перспективные поезда, наиболее удобен расчетный метод. С этой целью все типы поездов потока в виде сосредоточенных грузов, расположенных, а соответствии со схемой поезда, "прокатываются" по линии влияния рассматриваемого элемента. Результатом является график изменения напряжений в этом элементе. Обработка полученных графиков систематизация циклов напряжений по размаху производится с помощью соответствующего программного комплекса.

Значения максимальных и минимальных напряжений цикла определяют в данном случае обычным способом с учетом собственного веса пролетных строений, динамических коэффициентов и других требований, определяемых нормами расчета грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов.