

# Определение режимов нагружения для ресурсных испытаний железобетонных шпал на основе экспериментального измерения их напряженного состояния в условиях Экспериментального кольца, Щербинка

О. А. СУСЛОВ, Н. В. РЕССИНА, А. В. ПОРТНОВ, А. А. НОВИКОВ, В. А. МАРИЙЧУК

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос изменения напряженно-деформированного состояния железобетонных шпал в зависимости от величины нагрузок на ось и требований к режимам их стендовых ресурсных испытаний. Данный вопрос весьма актуален, поскольку в настоящее время на отдельных участках сети (направления Восточного полигона) из-за высокой грузонапряженности увеличиваются воздействия на путь и возрастают нагрузки на ось. Такое изменение влечет за собой необходимость в пересмотре требований к методикам определения и подтверждения ресурса всех элементов пути, в том числе режимов нагружения железобетонных шпал при их стендовых испытаниях. Для определения влияния нагрузки на ось были проведены измерения фактического напряженно-деформированного состояния железобетонных шпал, уложенных на прямом участке Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ». Нагружение было реализовано обращающимся составом из 72 вагонов и специально сформированным опытным сцепом из локомотива и трех вагонов с нагрузкой на ось 23,5; 25 и 27 тс соответственно. Проведенные измерения позволили получить зависимости изменения напряжений и деформаций от изменения нагрузки на ось, а также выявить реологические особенности взаимодействия железобетонных шпал и балластного слоя. Полученные результаты измерений были использованы в качестве базовых напряжений и деформаций для расчета режимов нагружения в стендовых ресурсных испытаниях. Цель расчета — достижение максимальной идентичности напряженного состояния при нагружении шпал на стенде их напряженному состоянию при реальной эксплуатации. Дополнительно были проведены опытные стендовые нагружения железобетонной шпалы, в ходе которых реализованы полученные расчетом режимы и измерено ее напряженно-деформированное состояние. Результаты сравнения напряженного состояния железобетонной шпалы, полученные при натурных измерениях в пути и в процессе нагружения на стенде, показали их идентичность, что подтвердило адекватность расчетных режимов нагружения. Итогом работы стали режимы нагружения для стендовых испытаний железобетонных шпал, учитывающие влияние величины нагрузки на ось.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь; железобетонные шпалы; методика измерения; тензометрия; напряженно-деформированное состояние; циклические испытания

**Введение.** В современных экономических условиях на особо нагруженных направлениях сети происходит интенсификация грузооборота в виде увеличения грузонапряженности (в период 2010–2019 гг. прирост грузонапряженности на отдельных направлениях составил более 30%), а также увеличение средней нагрузки на ось (доля парка вагонов с нагрузкой на ось 25 тс составляет более 20% [1, 2], а в отдаленной перспективе на выделенных участках возможен ввод в обращение вагонов с нагрузкой на ось 27 тс), что в результате вызывает увеличение уровня интенсивности истощения ресурса элементов верхнего строения пути [3, 4]. Такой режим эксплуатации прежде всего сокращает межремонтный период, а с учетом бюджетных и технологических ограничений в конечном итоге приводит к невозможности соблюдения нормативных ремонтных схем, и ряд участков пути эксплуатируется с выработанным нормативным ресурсом (участки с просроченными ремонтами) [5]. Для таких участков пути вопрос определения возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации напрямую связан с вопросом определения остаточного ресурса как пути в целом, так и отдельных его элементов, и прежде всего элементов верхнего строения пути как наиболее изнашиваемой части путевой инфраструктуры [6].

Типовая конструкция верхнего пути — это, как правило, бесстыковой путь, рельсы типа Р65, упругие промежуточные скрепления, железобетонные шпалы и щебеночный балласт. Современные технологии мониторинга и диагностики состояния верхнего строения пути (ультразвуковая и магнитная дефектоскопия, видеоконтроль, путеизмерение) позволяют очень качественно отслеживать и предупреждать отказы, связанные с состоянием рельсов, промежуточных скреплений и балластного слоя [7]. В свою очередь, диагностирование состояния железобетонных шпал с учетом специфики их эксплуатации (большая

часть шпалы скрыта от контроля в балластном слое, а также рельсами и промежуточными скреплениями) затруднено, негодная шпала нередко выявляется уже после наступления ее отказа (явный излом, видимые трещины больших размеров, выкрашивание бетона). При массовом отказе шпал по причине истощения их ресурса возможно наступление состояния полного отказа пути (шпалы, наряду с промежуточными скреплениями, обеспечивают стабильность ширины колеи), а одиночная замена железобетонных шпал — одна из наиболее трудоемких и маломеханизированных операций текущего содержания пути. Кроме того, в процессе эксплуатации обновление шпал происходит крайне редко в ходе проведения промежуточных ремонтов и текущего содержания, что в конечном итоге предъявляет дополнительное требование: железобетонная шпала для участков с высокой грузонапряженностью и повышенными нагрузками на ось должна проектироваться со значительным эксплуатационным ресурсом, величина которого подтверждается в процессе постановки изделия на производство (стендовые и натурные эксплуатационные испытания) [8].

Наиболее эффективным методом подтверждения ресурса изделия с точки зрения затрат и времени, необходимых для получения результата, является метод стендовых испытаний, главное требование к которым — максимальное приближение режимов нагружения к реальным условиям эксплуатации. Для разработки таких режимов в реальных условиях эксплуатации исследуется напряженно-деформированное состояние объекта испытаний и на основе обработки результатов формируются режимы нагружения изделия на лабораторном стенде.

В соответствии с требованиями нормативных документов [9] в лабораторных условиях шпалы испытывают в подрельсовом и среднем сечениях. В подрельсовом сечении шпалу испытывают при действии изгибающего момента положительного направления (растянута нижняя зона поперечного сечения), рис. 1, а. В среднем сечении шпалу испытывают при действии изгибающего момента отрицательного направления (растянута верхняя зона поперечного сечения), рис. 1, б.

Шпалы испытывают как простые статически определимые балки на двух опорах с нагрузкой  $P$  посередине пролета, соответствующей фактическим эксплуатационным моментам. Нагрузка  $P$  при заданных схемах испытаний определяется следующим выражением:

$$P = 4 \frac{M_{\text{изг}}}{l} k_3,$$

где  $l$  — расстояние между опорами, мм;  $M_{\text{изг}}$  — значение эксплуатационных изгибающих моментов в испытываемом сечении шпалы, кН·мм;  $k_3$  — коэффициент запаса, учитывающий дополнительные воздействия на шпалы от колес подвижного состава с де-

фектами и боковые силы, передающиеся от колеса на рельс ( $k_3 = 1,1-1,2$ ).

Фактические значения эксплуатационных изгибающих моментов  $M_{\text{изг}}$  определяются на основе данных о фактическом напряженном состоянии шпалы с учетом ее геометрических характеристик по формуле

$$M_{\text{изг}} = \sigma W \left( \frac{y_c}{y_T} \right),$$

где  $\sigma$  — напряжение, измеренное в точке сечения шпалы, МПа;  $W$  — момент сопротивления сечения шпалы в точке измерения напряжений, мм<sup>3</sup>;  $y_c$  — расстояние от центра тяжести шпалы до крайних волокон сечения в точке измерения, мм;  $y_T$  — расстояние от центра тяжести шпалы до продольной оси тензорезистора, установленного в точке измерения, мм.

Таким образом, для определения испытательной нагрузки  $P$ , которую необходимо реализовать на лабораторном стенде, необходимо прежде всего выполнить натурные замеры величин напряжений в испытываемых сечениях железобетонной шпалы, что было реализовано на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» в Щербинке.

Натурные замеры проводились в два этапа:

- замеры при проезде состава из локомотива и 72 вагонов;
- замеры при проезде сцепы из локомотива и одиночных вагонов с нагрузкой на ось 23,5; 25; 27 тс (три вагона).

Для выполнения замеров тензорезисторами было оборудовано пять шпал (шпалы № 12, 17, 24, 29, 36) в месте укладки опытных шпал (3 путь, 6 км, ПК 1). Схема наклейки тензорезисторов представлена на рис. 2.

Тензорезисторы с помощью соединительных проводов подключались к аналого-цифровому преобразователю (АЦП), сигналы от которого фиксировались для дальнейшей обработки. Для перехода от показаний преобразователя к фактическим значениям напряжений была выполнена калибровка измерительных схем. Калибровка выполнялась в лабораторных условиях на эталонных образцах — бетонных кубиках.

При дальнейшей обработке сигналов выполнялось преобразование значений АЦП в фактические напряжения по следующей формуле [10]:

$$\sigma = U_m k_\sigma,$$

где  $U_m$  — значение АЦП, мВ;  $k_\sigma$  — калибровочный коэффициент, МПа/мВ.

При обработке результатов испытаний все полученные записи процессов нагружения в поверхностном слое бетона шпал были обработаны по следующему алгоритму:

- анализ общей формы сигналов;
- выбор из сигналов значимых величин;

- формирование из выбранных величин рядов данных;

- статистическая обработка рядов данных;
- анализ полученных результатов.

На рис. 3 приведена характерная запись процесса изменения напряжений в шпале при проходе опытного сцепа из локомотива и трех вагонов. На рис. 4 представлена аналогичная запись при проходе опытного состава из 72 вагонов с нагрузкой на ось 23,5 тс.

Как видно из рис. 3 и 4, процесс изменения напряженного состояния бетона шпалы можно разделить на две составляющих:

- переменная составляющая от одиночного воздействия динамических сил колесо—рельс ( $\tilde{\sigma}_д$ );
- постоянная составляющая от многократного воздействия колес подвижных единиц, входящих в состав поезда ( $\tilde{\sigma}_п$ ).

Сумма этих случайных процессов и будет характеризовать итоговое напряжение бетона шпалы ( $\tilde{\sigma}$ ).

$$\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}_д + \tilde{\sigma}_п.$$

Анализ рис. 4 позволяет выделить три основные зоны в процессе изменения напряженного состояния бетона шпалы.

Первая зона — образование постоянной составляющей напряжений. Длительность делений зоны — 100–150 пропущенных осей с полной нагрузкой на ось.

Вторая зона — зона действия максимальной величины постоянной составляющей (от момента пропуска 100–150 осей в груженом состоянии до конца поезда).

Третья зона — релаксация постоянной составляющей (длительность процесса — 100–120 с).

Полное описание формирования напряжения в бетоне  $\tilde{\sigma}$  может быть получено на основе статистического анализа случайных значений параметров  $\tilde{\sigma}_д$  и  $\tilde{\sigma}_п$  по следующей формуле [11]:

$$\tilde{\sigma} = \bar{\sigma} + \lambda \hat{\sigma},$$

где  $\bar{\sigma}$  — математическое ожидание процесса  $\tilde{\sigma}$ ;  $\hat{\sigma}$  — среднеквадратическое отклонение (СКО) процесса  $\tilde{\sigma}$ .

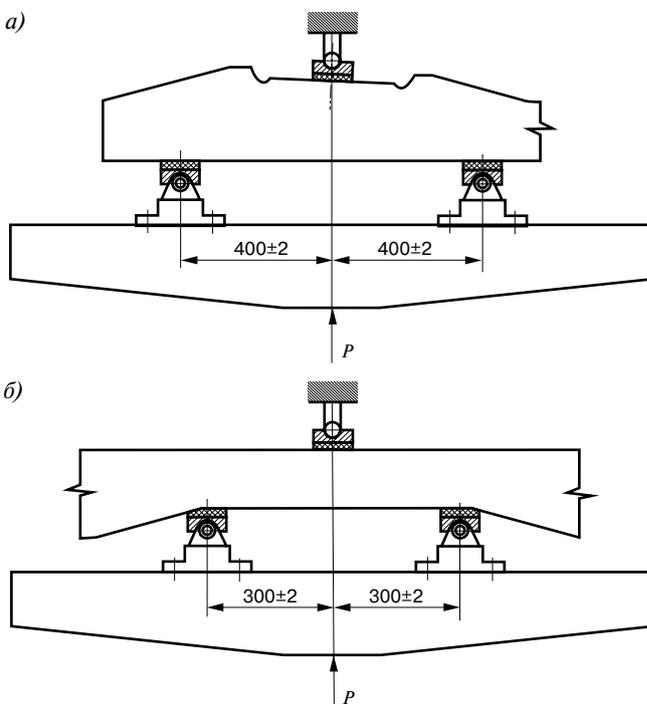


Рис. 1. Схема стендовых испытаний образцов шпал: а — в подрельсовом сечении; б — в среднем сечении

Fig. 1. Scheme of bench tests of sleeper samples: а — in the under-rail section; б — in the middle section

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_д + \bar{\sigma}_п;$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{(\hat{\sigma}_д)^2 + (\hat{\sigma}_п)^2}{2}};$$

$\lambda$  — нормирующий множитель, соответствующий заданному уровню надежности ( $\lambda = 1,96$ );  $\bar{\sigma}_д, \bar{\sigma}_п$  — математическое ожидание процессов  $\tilde{\sigma}_д$  и  $\tilde{\sigma}_п$ ;  $\hat{\sigma}_д, \hat{\sigma}_п$  — СКО процессов  $\tilde{\sigma}_д$  и  $\tilde{\sigma}_п$ .

Значения  $\bar{\sigma}_д, \bar{\sigma}_п, \hat{\sigma}_д, \hat{\sigma}_п$  определялись на основе анализа записей изменения напряжения бетона при проходе через опытные шпалы одиночной оси и состава.

Итоговые величины статистических параметров, характеризующих процессы  $\tilde{\sigma}_д, \tilde{\sigma}_п, \tilde{\sigma}$ , представлены в табл. 1–3.

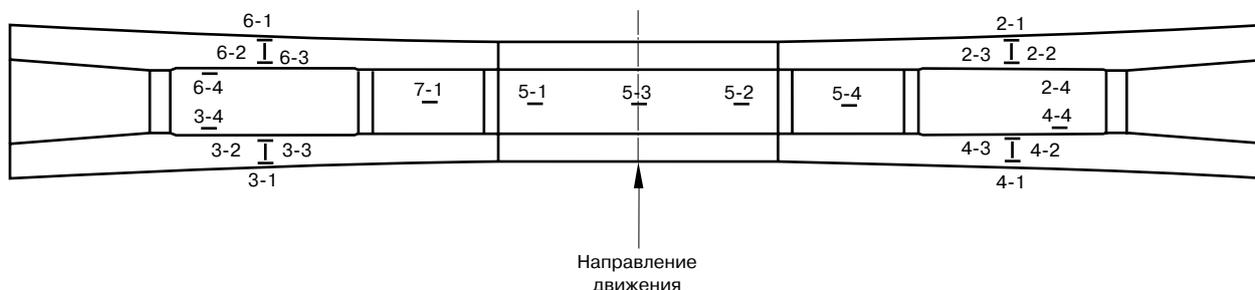


Рис. 2. Схема наклейки тензорезисторов на опытные шпалы  
Fig. 2. Scheme of fixing strain gauges on experimental sleepers

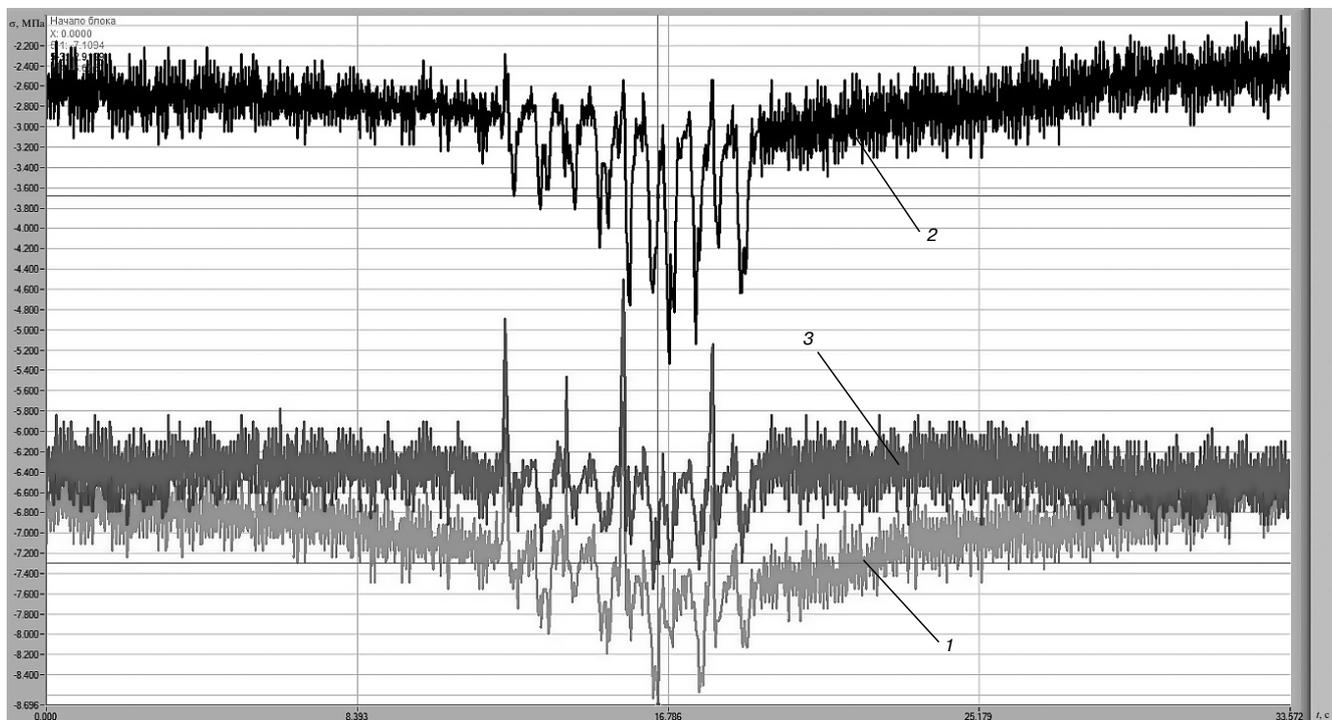


Рис. 3. Процесс изменения напряжений в шпале при проходе через сигналы опытного сцепа из локомотива и трех вагонов:

1 — сечение 5-1; 2 — сечение 5-3; 3 — сечение 5-4 (схема на рис. 2)

Fig. 3. Process of changing the stresses in the sleeper when passing through the signals of experimental coupling from a locomotive and three cars:

1 — section 5-1; 2 — section 5-3; 3 — section 5-4 (scheme in fig. 2)

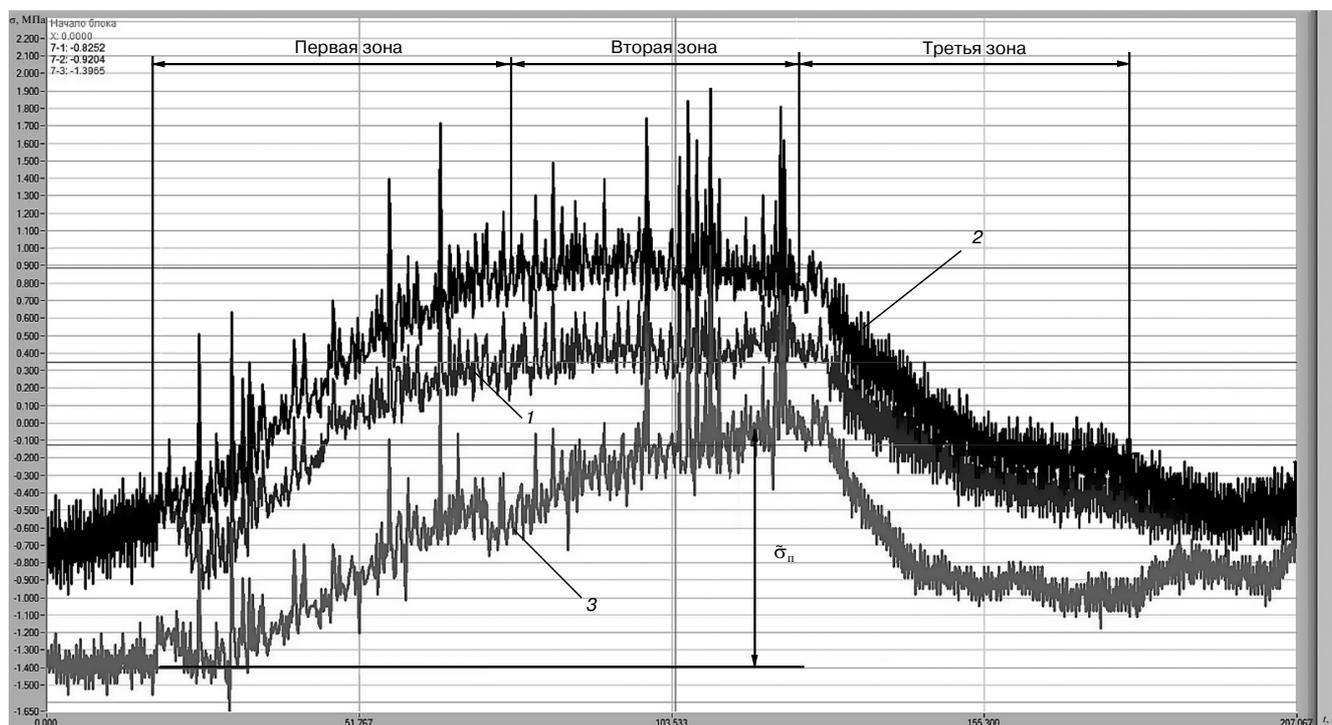


Рис. 4. Процесс изменения напряжений в шпале при проходе опытного состава из 72 вагонов с нагрузкой на ось 23,5 тс:

1 — сечение 5-1; 2 — сечение 5-3; 3 — сечение 5-4 (схема на рис. 2)

Fig. 4. Process of changing the stresses in the sleeper during the passage of an experimental train of 72 cars with an axle load of 23.5 tf:

1 — section 5-1; 2 — section 5-3; 3 — section 5-4 (scheme in fig. 2)

Таблица 1

Статистические параметры изменения напряженного состояния бетона в измерительных сечениях на поверхности шпал при проходе одиночной оси (процесс  $\bar{\sigma}_d$ )

Table 1

Statistical parameters of changes in the stress state of concrete in measuring sections on the surface of sleepers during the passage of a single axle (process  $\bar{\sigma}_d$ )

Нагрузка на ось, тс	Номер сечения																				
	1			2			3			4			5			6			7		
	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} - 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} - 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} - 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа
Скорость движения 40 км/ч																					
27	1,5	1,1	3,7	1,5	1,2	3,9	1,2	1,2	3,5	-2,5	0,5	-3,8	-2,9	0,8	-5,0	-0,7	0,2	-1,1	2,5	0,5	3,8
25	1,4	1,0	3,4	1,4	1,1	3,7	1,1	1,1	3,2	-2,3	0,5	-3,6	-2,8	0,6	-4,4	-0,7	0,1	-1,0	2,3	0,5	3,6
23,5	1,3	1,0	3,3	1,3	1,0	3,3	1,0	1,0	3,1	-2,0	0,4	-3,0	-2,3	0,6	-3,8	-0,6	0,1	-0,9	1,9	0,5	3,1
Скорость движения 60 км/ч																					
27	2,0	1,2	4,4	2,0	1,2	4,3	1,4	1,3	4,0	-2,2	0,6	-3,7	-2,7	0,9	-4,9	-0,6	0,2	-1,0	2,5	0,6	4,0
25	1,9	1,1	4,0	1,7	1,1	3,9	1,3	1,1	3,5	-2,0	0,4	-2,9	-2,3	0,5	-3,4	-0,5	0,1	-0,8	2,0	0,4	3,0
23,5	1,7	1,0	3,7	1,7	1,0	3,7	1,2	1,1	3,4	-1,7	0,3	-2,4	-2,0	0,5	-3,3	-0,5	0,1	-0,8	1,7	0,4	2,6
Скорость движения 70 км/ч																					
27	2,3	1,4	4,9	2,1	1,4	4,8	1,6	1,4	4,5	-2,1	0,6	-3,7	-2,6	0,8	-4,7	-0,6	0,2	-1,0	2,3	0,5	3,6
25	2,2	1,3	4,8	2,0	1,3	4,6	1,6	1,4	4,3	-1,9	0,4	-2,9	-2,2	0,5	-3,5	-0,5	0,1	-0,8	2,0	0,5	3,1
23,5	1,9	1,2	4,3	1,8	1,2	4,1	1,4	1,3	3,9	-1,6	0,4	-2,5	-1,9	0,5	-3,2	-0,4	0,1	-0,8	1,7	0,4	2,7

Таблица 2

Статистические параметры дополнительных постоянных напряжений в измерительных сечениях на поверхности шпал при многократном воздействии осей подвижного состава (процесс  $\bar{\sigma}_n$ )

Table 2

Statistical parameters of additional constant stresses in measuring sections on the surface of sleepers under repeated action of the axles of the rolling stock (process  $\bar{\sigma}_n$ )

Нагрузка на ось, тс	Номер сечения																				
	1			2			3			4			5			6			7		
	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} - 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\delta$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \delta$ , МПа
27	1,6	1,0	3,6	1,4	1,0	3,5	1,2	1,2	3,7	1,7	1,0	3,7	-0,7	0,6	-1,8	0,9	0,6	2,1	0,6	0,4	1,4
25	1,4	1,0	3,4	1,3	1,0	3,3	1,2	1,1	3,3	1,6	1,0	3,6	-0,6	0,5	-1,7	0,8	0,6	2,0	0,5	0,4	1,3
23,5	1,4	1,0	3,3	1,2	1,0	3,2	1,1	1,1	3,3	1,5	1,0	3,5	-0,6	0,5	-1,6	0,8	0,6	2,0	0,5	0,4	1,3

На рис. 5 представлена схема расположения сечений, соответствующих нумерации, приведенной в табл. 1–3.

Таким образом, по результатам, приведенным в табл. 1–3, можно сделать вывод, что наиболее неблагоприятными сечениями шпалы с точки зрения расчета бетона на растяжение является сечение 1 (растянутая верхняя зона середины шпалы) и сечение 7 (растянутая нижняя зона подрельсового сечения

гоприятными сечениями шпалы с точки зрения расчета бетона на растяжение является сечение 1 (растянутая верхняя зона середины шпалы) и сечение 7 (растянутая нижняя зона подрельсового сечения

Таблица 3

Статистические параметры изменения напряженного состояния бетона в измерительных сечениях на поверхности шпал при многократном воздействии осей подвижного состава (процесс  $\sigma$ )

Table 3

Statistical parameters of changes in the stress state of concrete in measuring sections on the surface of sleepers under repeated action of the axles of the rolling stock (process  $\sigma$ )

Нагрузка на ось, тс	Номер сечения																				
	1			2			3			4			5			6			7		
	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} - 1,96 \cdot \hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} - 1,96 \cdot \hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma}$ , МПа	$\hat{\sigma}$ , МПа	$\bar{\sigma} + 1,96 \cdot \hat{\sigma}$ , МПа
Скорость движения 40 км/ч																					
27	3,1	1,1	5,2	3,1	1,1	5,3	2,8	1,1	5,0	-0,9	0,8	-2,4	-1,3	0,9	-3,1	0,9	0,7	2,3	4,2	0,8	5,7
25	2,9	1,0	4,8	2,9	1,1	5,0	2,5	1,0	4,6	-0,9	0,8	-2,4	-1,3	0,8	-3,0	0,8	0,7	2,2	3,7	0,8	5,3
23,5	2,7	1,0	4,7	2,7	1,0	4,7	2,4	1,0	4,4	-0,6	0,7	-2,1	-0,9	0,8	-2,5	0,8	0,7	2,2	3,3	0,8	4,8
Скорость движения 60 км/ч																					
27	3,6	1,1	5,8	3,6	1,1	5,8	3,1	1,2	5,4	-0,6	0,8	-2,2	-1,1	0,9	-2,9	1,0	0,7	2,4	4,1	0,8	5,7
25	3,3	1,0	5,3	3,2	1,0	5,2	2,7	1,1	4,8	-0,5	0,7	-2,0	-0,8	0,8	-2,3	0,9	0,7	2,3	3,4	0,8	4,9
23,5	3,1	1,0	5,1	3,1	1,0	5,0	2,6	1,0	4,7	-0,3	0,7	-1,7	-0,6	0,8	-2,1	0,9	0,7	2,3	3,1	0,7	4,6
Скорость движения 70 км/ч																					
27	3,9	1,2	6,3	3,7	1,2	6,1	3,3	1,2	5,7	-0,5	0,8	-2,1	-0,9	0,9	-2,7	1,1	0,7	2,5	3,9	0,8	5,5
25	3,6	1,2	5,9	3,4	1,2	5,7	3,0	1,2	5,4	-0,4	0,8	-1,9	-0,7	0,8	-2,3	0,9	0,7	2,3	3,4	0,8	4,9
23,5	3,3	1,1	5,5	3,2	1,1	5,3	2,8	1,1	5,1	-0,2	0,7	-1,6	-0,5	0,8	-2,0	1,0	0,7	2,3	3,1	0,7	4,5

шпалы). Максимально вероятные значения растягивающих напряжений в этих опытных шпалах составляют 5,9 и 5,3 МПа соответственно при нагрузке на ось 25 тс.

С учетом данных о напряженном состоянии исследованных шпал, приведенных в табл. 1–3, были определены максимальные, минимальные и средние значения  $M_{изг}$  в следующих сечениях, соответствующих точкам измерения напряжений:

- сечение 1 (растянута верхняя зона середины шпалы),  $W=9,1 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$ ,  $y_c=83,8 \text{ мм}$ ,  $y_t=83,8 \text{ мм}$ ;
- сечение 5 (сжата верхняя зона подрельсовой части шпалы),  $W=12,88 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$ ,  $y_c=104 \text{ мм}$ ,  $y_t=90,4 \text{ мм}$ ;
- сечение 7 (растянута нижняя зона подрельсовой части шпалы),  $W=15,07 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$ ,  $y_c=88,9 \text{ мм}$ ,  $y_t=77,3 \text{ мм}$ .

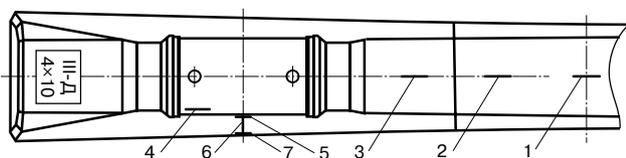


Рис. 5. Расположение расчетных сечений на шпале: 1–7 — номера сечений  
Fig. 5. Location of the design sections on the sleeper: 1–7 — section numbers

Нагрузка  $P$  при схемах испытаний (рис. 1, а и б) определяется следующим выражением [12]:

$$P = 4 \frac{M_{изг}}{l - 0,1} k_3.$$

Результаты расчетов испытательных нагрузок приведены в табл. 4.

Анализ данных таблицы показывает, что для циклических испытаний шпал с целью определения их ресурса в условиях обращения подвижного состава с нагрузками на ось 25 тс должны быть назначены следующие величины  $P$ :

- при испытании подрельсового сечения максимальное значение силы в цикле нагружения 63 кН, минимальное значение силы в цикле нагружения 26 кН, итоговое среднее значение силы в цикле — 44 кН;
- при испытании среднего сечения максимальное значение силы в цикле нагружения 52 кН, минимальное значение силы в цикле нагружения 12 кН, итоговое среднее значение силы в цикле — 32 кН.

Для проверки и уточнения полученных испытательных нагрузок в лабораторных условиях были выполнены замеры напряжений в подрельсовом сечении шпалы при ее нагружении на стенде в соответствии с требованиями [9] и режиме воздействия вагона с нагрузкой на ось 25 тс. Напряжения изме-

Таблица 4

Максимальные, минимальные и средние значения испытательных нагрузок, необходимых для реализации в различных сечениях шпал

Table 4

Maximum, minimum and average values of test loads required for implementation in various sections of sleepers

Нагрузка на ось, тс	Значение $P$ (сечение 1, схема б на рис. 1, среднее сечение поверху)			Значение $P$ (сечение 5, схема а на рис. 1, подрельсовое сечение поверху)			Значение $P$ (сечение 7, схема а на рис. 1, подрельсовое сечение понизу)		
	Среднее, кН	Максимально вероятное ( $P=95\%$ ), кН	Минимально вероятное ( $P=95\%$ ), кН	Среднее, кН	Максимально вероятное ( $P=95\%$ ), кН	Минимально вероятное ( $P=95\%$ ), кН	Среднее, кН	Максимально вероятное ( $P=95\%$ ), кН	Минимально вероятное ( $P=95\%$ ), кН
Скорость движения 40 км/ч									
27	27,2	45,4	9,1	-29,9	-51,2	-8,5	49,6	68,3	30,9
25	24,9	42,2	7,6	-28,3	-44,3	-12,3	44,3	62,9	25,7
23,5	23,7	40,7	6,7	-23,4	-38,8	-8,1	39,5	57,2	21,8
Скорость движения 60 км/ч									
27	31,7	50,9	12,5	-27,7	-49,8	-5,6	48,8	68,2	29,4
25	28,8	46,5	11,1	-23,1	-34,6	-11,5	40,7	58,3	23,0
23,5	27,3	44,3	10,3	-20,3	-33,3	-7,3	37,3	54,3	20,3
Скорость движения 70 км/ч									
27	34,1	54,5	13,7	-26,0	-47,5	-4,5	46,6	65,3	27,8
25	31,5	51,5	11,5	-21,9	-35,6	-8,3	40,5	58,5	22,4
23,5	29,2	48,0	10,4	-19,4	-32,3	-6,5	36,6	54,0	19,2

Таблица 5

Максимальные, минимальные и средние значения напряжений в различных сечениях шпал, полученные при стендовых испытаниях и натурных измерениях в режиме воздействия вагона с нагрузкой на ось 25 тс

Table 5

Maximum, minimum and average values of stresses in various sections of sleepers obtained during bench tests and field measurements in the mode of car impact with an axle load of 25 tf

Номер сечения	Максимальная сила, кН	Минимальная сила, кН	Среднее значение, кН	Коэффициент аппроксимации, МПа/кН	Максимальные напряжения (стенд), МПа	Максимальные напряжения (натурные испытания, $P=95\%$ ), МПа	Разность максимальных напряжений, МПа	Средние напряжения (стенд), МПа	Средние напряжения (натурные испытания), МПа	Разность средних напряжений, МПа
5	63	26	44	-0,1357	-6,8	-5,8	1,0	-4,7	-4,4	0,3
6	63	26	44	-0,0150	-0,8	-1,0	-0,3	-0,5	-0,7	-0,2
7	63	26	44	0,1097	5,5	5,7	-0,2	3,8	3,7	0,1

рались в сечениях 5–7 (см. рис. 5). На рис. 6 показан общий вид установки для проведения нагружений и фиксаций напряжений. В табл. 5 представлены значения напряжений в этих сечениях, полученные в процессе стендовых испытаний, и напряжений в тех же сечениях, которые были получены в ходе натурных измерений на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

Значения, приведенные в табл. 5, показывают, что при нагружении на опорах шпалы (при расстоянии между опорами 800 мм) в соответствии с указанным режимом (максимальная сила цикла — 63 кН, минимальная — 26 кН, среднее значение цикла — 44 кН)

будут реализованы следующие усредненные разности между напряжениями, полученными в ходе натурных испытаний, и напряжениями, полученными при нагружении образца на стенде:

- разности максимальных напряжений в 0,2 МПа;
- разности средних напряжений в 0,1 МПа.

Таким образом, предложенный режим циклических испытаний реализует фактическое напряженное состояние шпалы, соответствующее реальным условиям ее работы, и может быть рекомендован для проведения испытаний по подтверждению ресурса железобетонных шпал, в том числе при обращении подвижного состава с нагрузкой на ось 25 тс.

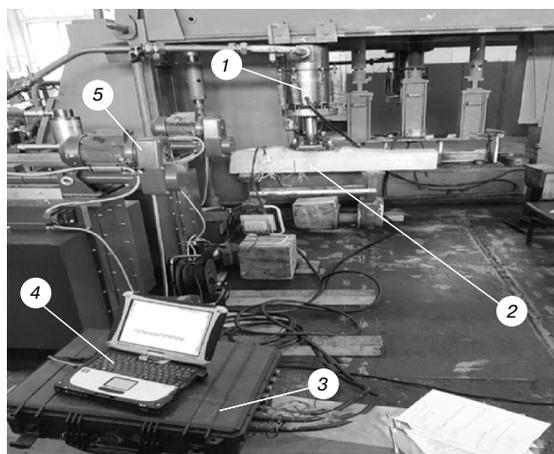


Рис. 6. Опытная установка для нагружения и фиксации напряжений в подрельсовом сечении шпалы: 1 — нагрузочный стенд; 2 — опытная шпала; 3 — измеритель напряжений (АЦП); 4 — ЭВМ; 5 — пульсатор  
Fig. 6. Experimental bench for loading and fixing stresses in the under-rail section of the sleeper: 1 — load bench; 2 — experimental sleeper; 3 — voltage meter (analog-to-digital converter); 4 — computer; 5 — pulsator

**Заключение.** 1. Проведены измерения фактического напряженно-деформированного состояния железобетонных шпал, уложенных на прямом участке Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ».

2. В результате обработки данных тензометрических измерений определены наиболее нагруженные сечения шпалы — сечение с верхними волокнами в середине шпалы и сечение с нижними волокнами в подрельсовой части шпалы, а также выявлены особенности формирования напряжений в этих сечениях в зависимости от количества одновременно пропущенных осей поезда.

3. На основе полученных значений фактических напряжений в шпалах были определены величины нагрузок для циклических испытаний в стендовых условиях, позволяющие реализовать напряженное состояние шпал, эквивалентное воздействию вагонов с нагрузкой на ось 23,5; 25; 27 тс.

4. Проведенные лабораторные испытания подтвердили соответствие напряженного состояния железобетонных шпал, полученного с помощью циклического нагружения на стенде, напряженному состоянию, возникающему в «работающих» под поездной нагрузкой железобетонных шпалах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инфраструктура в условиях интенсификации перевозок / В. А. Гапанович [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2016. № 3. С. 16–20.

**Для цитирования:** Определение режимов нагружения для ресурсных испытаний железобетонных шпал на основе экспериментального измерения их напряженного состояния в условиях Экспериментального кольца, Щербинка / О. А. Суслов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 3. С. 127–135. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-127-135>.

2. Пехтерев Ф. С. О перспективных полигонах обращения составов поездов из вагонов с повышенной осевой нагрузкой // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 31–33.

3. Воздействие на путь грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками / В. С. Коссов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 4. С. 37–39.

4. Шапетько К. В. Исследования накопления деформаций железнодорожного пути на участке испытаний вагонов с осевой нагрузкой 27 тс // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2017. Т. 76. № 4. С. 238–242. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-238-242>.

5. Методические подходы к экономической оценке затрат при эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 т на участке Качканар—Смычка / Г. А. Грановская [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77. № 6. С. 347–356. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-347-356>.

6. Михайлов С. В., Гоник М. М. Оценка ресурса железнодорожного пути при тяжеловесном движении путем расчета его динамических характеристик // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всерос. науч.-практ. конф. к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричани. М.: РАС, 2019. Т. 1. С. 212–216. (Труды АО «ВНИИЖТ»).

7. Бельтюков В. П., Третьяков А. А. Комплексная оценка потребности в промежуточных ремонтах пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016. Т. 13. № 3 (48). С. 321–327.

8. Расчет ресурса железобетонных шпал и балласта железнодорожного пути на основе моделирования / В. П. Сычев [и др.] // Наука и техника транспорта. 2020. № 4. С. 37–44.

9. ГОСТ 33320–2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия: межгос. стандарт: введен в действие в качестве нац. стандарта Российской Федерации приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 сентября 2015 г. № 1316-ст: дата введения 2016-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. 32 с.

10. Серьезнов А. Н., Шашурин А. К. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте. М.: Изд-во МАИ, 1990. 200 с.

11. Баврин И. И. Теория вероятности и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2005. 160 с.

12. Железобетонные шпалы для рельсового пути / А. Ф. Золотарский [и др.] / под ред. А. Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1980. 270 с.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**СУСЛОВ Олег Александрович,**

д-р техн. наук, технический эксперт, НИАЦ, АО «ВНИИЖТ»

**РЕССИНА Наталья Владимировна,**

канд. техн. наук, руководитель группы, НЦ «ЦПРК», АО «ВНИИЖТ»

**ПОРТНОВ Алексей Владимирович,**

канд. техн. наук, заведующий лабораторией, заместитель директора НЦ «ЦПРК», АО «ВНИИЖТ»

**НОВИКОВ Александр Анатольевич,**

заместитель заведующего лабораторией, НЦ «ЦПРК», АО «ВНИИЖТ»

**МАРИЙЧУК Владислав Александрович,**

мастер стантового оборудования, НЦ «ЦПРК», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 20.03.2020 г., принята к публикации 29.04.2021 г.

## Determination of loading modes for endurance tests of reinforced concrete sleepers on the basis of experimental measurement of their stress state under the conditions of the Test Loop at Shcherbinka

O. A. SUSLOV, N. V. RESSINA, A. V. PORTNOV, A. A. NOVIKOV, V. A. MARIYCHUK

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZHT"), Moscow, 129626, Russia

**Abstract.** The article considers the issue of changing the stress-strain state of reinforced concrete sleepers depending on the value of the axle loads and the requirements for the modes of its bench endurance tests. This issue is very relevant, since at present, in certain sections of the network (directions of the Eastern operational area), due to the high traffic density, the impact on the track increases and the axle load increases. Such a change entails the need to revise the requirements for the methods for determining and confirming the resource of all track elements, including the loading modes of reinforced concrete sleepers during its bench tests. To determine the influence of the axle load, measurements were made of the actual stress-strain state of reinforced concrete sleepers laid on the tangent section of the Test Loop of the JSC "VNIIZHT". The loading was realized by a running train of 72 cars and a specially formed experimental coupler of a locomotive and three cars with an axle load of 23.5, 25 and 27 tf, respectively. Measurements made it possible to obtain the dependence of the change in stresses and deformations on the change in the axle load, as well as to reveal the rheological features of the interaction of reinforced concrete sleepers and the ballast layer. Obtained measurement results were used as basic stresses and strains for calculating loading modes in bench endurance tests. Purpose of the calculation is to achieve the maximum identity of the stress state when the sleepers are loaded on the bench with its stress state during real operation. In addition, experimental bench loading of a reinforced concrete sleeper was carried out, during which the modes obtained by the calculation were implemented and its stress-strain state was measured. Results of comparing the stress state of a reinforced concrete sleeper obtained during full-scale measurements on the way and during loading on the stand showed their identity, which confirmed the adequacy of the calculated loading modes. The final result of the work was the loading modes for bench tests of reinforced concrete sleepers, taking into account the influence of the axle load value.

**Keywords:** railway track; reinforced concrete sleepers; measurement technique; strain measurement; stress-strain state; cyclic tests

**DOI:** <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-127-135>

### REFERENCES

1. Gapanovich V. A., Pevzner V. O., Suslov O. A., Tret'yakov V. V. *Infrastructure in the conditions of traffic intensification*. Zheleznodorozhny transport, 2016, no. 3, pp. 16–20.
2. Pekhterev F. S. *On promising areas for circulation of trains from cars with increased axle load*. Zheleznodorozhny transport, 2016, no. 10, pp. 31–33.
3. Kossov V. S., Lunin A. A., Krasnov O. G., Spirov A. V. *Impact on the track of freight cars with increased axle loads*. Railway Track and Facilities, 2018, no. 4, pp. 37–39.
4. Shapet'ko K. V. *Research of the accumulation of railway track deformations in the section of testing of cars with an axle load of 27 tons*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2017, Vol. 76,

no. 4, pp. 238–242. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-238-242>.

5. Granovskaya G. A., Safonova A. I., Suslov O. A., Okhotnikov N. S. *Methodical approaches to the economic assessment of costs in the operation of cars with axle load of 27 tons at the section Kachkanar—Smychka*. Vestnik of the Railway Research Institute, 2018, Vol. 77, no. 6, pp. 347–356. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-347-356>.

6. Mikhaylov S. V., Gonik M. M., Kosarev A. B., Gogrichiani G. V. *Estimation of the resource of a railway track in heavy traffic by calculating its dynamic characteristics*. Actual problems of the development of railway transport. Materials of the All-Russian scientific and practical conference for the 75<sup>th</sup> anniversary of the postgraduate study of the Railway Research Institute. Moscow, RAS Publ., 2019, pp. 212–216.

7. Bel'tyukov V. P., Tret'yakov A. A. *Comprehensive assessment of the need for intermediate track repairs*. Proceedings of Petersburg Transport University, 2016, Vol. 13, no. 3 (48), pp. 321–327.

8. Sychev V. P., Abdurashitov A. Yu., Sycheva A. V., Yurkova Yu. N. *Calculation of the resource of reinforced concrete sleepers and ballast of a railway track based on modeling*. Science and Technology in Transport, 2020, no. 4, pp. 37–44.

9. GOST 33320–2015. *Ferroconcrete cross ties for railways. General specifications*. Interstate standard, put into effect as national standard of the Russian Federation by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated September 10, 2015 No. 1316-st. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 32 p. (in Russ.).

10. Ser'eznov A. N., Shashurin A. K. *Methods and means of measurement in the strength experiment*. Moscow, MAI Publ., 1990, 200 p.

11. Bavrin I. I. *Probability theory and mathematical statistics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005, 160 p.

12. Zolotarevskiy A. F., Evdokimov B. A., Isaev N. M., Krysanov L. G., Serebrennikov V. V., Fedulov V. F. *Reinforced concrete sleepers for a rail track*. Moscow, Transport Publ., 1980, 270 p.

### ABOUT THE AUTHORS

#### Oleg A. SUSLOV,

Dr. Sci. (Eng.), Technical Expert, NIATs, JSC "VNIIZHT"

#### Natal'ya V. RESSINA,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the group, SC "TsPRK", JSC "VNIIZHT"

#### Aleksey V. PORTNOV,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Deputy Director of the SC "TsPRK", JSC "VNIIZHT"

#### Aleksander A. NOVIKOV,

Deputy Head of the Laboratory, SC "TsPRK", JSC "VNIIZHT"

#### Vladislav A. MARIYCHUK,

Bench equipment specialist, SC "TsPRK", JSC "VNIIZHT"

Received 20.03.2020

Accepted 29.04.2021

■ E-mail: [suslov.oleg@vniizht.ru](mailto:suslov.oleg@vniizht.ru) (O. A. Suslov)

**For citation:** Suslov O. A., Ressina N. V., Portnov A. V., Novikov A. A., Mariychuk V. A. Determination of loading modes for endurance tests of reinforced concrete sleepers on the basis of experimental measurement of their stress state under the conditions of the Test Loop at Shcherbinka // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (3): 127–135 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-127-135>.