

УДК 628:614.82

## Факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов

Е. В. Постнова, Е. В. Рунев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Постнова Е. В., Рунев Е. В. Факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 91–100. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-91-100

### Аннотация

**Цель:** Построить факторную модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов по результатам лабораторных испытаний, проведенных с учетом амплитудно-частотных характеристик колебательного процесса действующего трубопровода, полученных при проведении натурных испытаний на железнодорожной станции. На основании факторной модели определить наиболее значимые факторы, влияющие на надежность трубопроводов в условиях действия вибродинамической нагрузки и предложить способы повышения их безотказности. **Методы:** Для проведения лабораторных испытаний трубопровода на надежность при воздействии на него напряжений знакопостоянного цикла применялся план дробного факторного эксперимента типа  $2^{5-2}$ . Эксперименты проводились на испытательном стенде с пульсирующим цилиндром типа ПЦ с максимальной нагрузкой 200 кН. Напряжения на испытываемый трубопровод подавались с пультов управления статической (от грунта) и динамической (от подвижного состава) нагрузками. Форма импульса — синусоидальная, наиболее близкая к натурной, частота цикла — 300 ц/мин. Коэффициенты уравнения регрессии вычислялись на ЭВМ по программе множественной линейной корреляции. Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась с помощью критерия Стьюдента. Для проверки адекватности модели экспериментальным данным применялся критерий Фишера. Адекватность уравнения регрессии физике явления проверялась при помощи критерия Стьюдента. **Результаты:** Проведенные испытания трубопровода с применением дробного факторного эксперимента типа  $2^{5-2}$  позволили построить факторную модель исследуемого процесса в виде полинома первой степени. Установлено, что основными факторами, влияющими на надежность трубопровода в условиях действия вибродинамической нагрузки, являются поездная нагрузка, амплитуда колебаний трубопровода и глубина его заложения. Частота колебаний трубопровода не оказывает существенного влияния на надежность трубопровода. Однако из уравнения регрессии следует, что частота колебаний трубопровода зависит от его диаметра. **Практическая значимость:** Получено уравнение линейной регрессии, преобразованное путем перехода от кодированных значений факторов к натуральным значениям, которое можно использовать в практических целях для определения интенсивности отказов и продолжительности эксплуатации железнодорожных трубопроводов между отказами.

**Ключевые слова:** Факторная модель влияния, планирование эксперимента, матрица факторов, амплитудно-частотные характеристики колебательного процесса трубопровода, полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент.

### Введение

Проблема надежности трубопроводов в условиях воздействия на них вибродинамической нагрузки имеет большое значение в современных

условиях эксплуатации. Повреждения на таких трубопроводах могут вызвать размыв железнодорожного полотна и, как следствие, нарушить безопасность движения поездов.

Проведенные испытания на действующем железнодорожном трубопроводе подтвердили влияние вибродинамической нагрузки подвижного состава на его надежность [1]. Обработка и анализ записей колебательного процесса испытательного участка трубопровода при движении подвижного состава [2] позволили выявить основные характеристики случайных процессов: корреляционную функцию и спектральную плотность. Эти характеристики совместно определяют внутренние свойства и структуру колебательного процесса: корреляционная функция — во временной области, спектральная плотность — в частотной области [3].

После проведения натурных испытаний на железнодорожной станции были получены амплитудно-частотные характеристики колебаний трубопровода, давление от поездной нагрузки, давление от грунта, это позволило в лабораторных условиях смоделировать процесс вибродинамического воздействия подвижного состава на состояние железнодорожных трубопроводов.

По результатам лабораторных испытаний была построена факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов, связывающая величину отклика  $Y$  и факторы  $\{X_i\}_{i=1}^n$ .

Следует отметить, что в литературных источниках в настоящее время отсутствуют данные по моделированию данного процесса с использованием факторов, характерных для железнодорожного транспорта: поездной нагрузки, частоты и амплитуды колебаний трубопроводов при движении подвижного состава.

Уравнение линейной регрессии с оценками его коэффициентов имеет практическую значимость. Преобразованное уравнение позволяет определить интенсивность отказов и продолжительность эксплуатации трубопроводов между отказами, это предотвратит аварии на железнодорожном транспорте, связанные с повреждениями труб.

## Планирование эксперимента и матрица факторов

Получение факторной модели (идентификации) процесса испытаний трубопровода в условиях влияния вибродинамической нагрузки требует выполнения следующих действий:

- планирование эксперимента;
- проведение эксперимента (испытаний трубопровода на надежность);
- построение факторной модели эксперимента;
- проверка статистической значимости коэффициентов регрессии;
- проверка адекватности факторной модели эксперименту;
- проверка адекватности факторной модели физике явления.

Планирование эксперимента позволяет: минимизировать число испытаний; одновременно варьировать все переменные, определяющие процесс по специальному плану — матрице эксперимента, а также применить аппарат множественной линейной регрессии, отражающей сущность исследуемого процесса [4].

При планировании эксперимента прежде всего следует выбрать факторы, влияющие на надежность трубопроводов в условиях действия вибродинамической нагрузки. Эти факторы должны отвечать требованиям управляемости, независимости, однозначности и совместимости.

Выбор факторов влияния основывался на результатах, полученных после проведения испытаний на действующем железнодорожном трубопроводе. Выбраны следующие факторы, влияющие на надежность трубопроводов в условиях действия вибродинамической нагрузки: поездная нагрузка/давление от поездной нагрузки; частота колебаний трубопровода; амплитуда колебаний трубопровода; диаметр трубопровода; глубина заложения трубопровода/давление от грунта.

Для проведения лабораторных испытаний трубопровода предлагается применить полный

факторный эксперимент (ПФЭ), обладающий ортогональной матрицей факторов  $X$ . ПФЭ реализует все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых и управляемых факторов. План ПФЭ на уровнях  $(-1$  и  $+1)$  при числе факторов  $n$  обозначается  $2^n$ . Количество испытаний в ПФЭ значительно превосходит число определяемых коэффициентов линейной модели, т. е. ПФЭ обладает избыточностью испытаний. Это проявляется при увеличении числа факторов  $n$ , так как количество вариантов варьирования для ПФЭ растет по показательному закону. В рассматриваемом эксперименте при числе факторов  $n = 5$  необходимо провести 32 испытания [5].

При этом каждый фактор имеет три уровня, на которых он будет варьироваться в эксперименте: нижний  $-1$ ; верхний  $+1$ ; основной в центре области варьирования  $0$ .

Выбор основного уровня и интервала варьирования перечисленных факторов проводился с использованием результатов натурных испытаний, проведенных на действующем железнодорожном трубопроводе [6–8].

Поездная нагрузка, действующая на трубопровод в условиях железнодорожной станции, вычисляется по формуле:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^3 q_i}{l_{\text{ш}} \cdot \sum_{i=1}^3 l_i}, \text{ кН/м}^2, \quad (1)$$

где  $q_i$  — нагрузка на ось колесной пары локомотива: 200 кН (ТЭМ-2), 220 кН (ЗТЭ10М), 210 кН (ТЭП-70), 125 кН (ЭР-2);

$l_{\text{ш}}$  = 2700 мм длина шпалы;

$l_i$  — расстояние между колесными парами тележки локомотива: 2100 мм (ТЭМ-2), 1850 мм (ЗТЭ10М), 2200 мм (ТЭП-70), 2600 мм (ЭР-2) [9].

Под влиянием собственного веса грунта и поездной нагрузки в теле трубопровода возникают напряжения:

$$\sigma = \sigma_{\gamma} + \sigma_{\text{п}}, \text{ кПа} \quad (2)$$

Напряжения в теле трубопровода, вызванные собственным весом грунта, определяются:

$$\sigma_{\gamma} = \gamma \cdot H, \text{ кПа}, \quad (3)$$

где  $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$  объемная масса грунта (суглинки);

$H$  — глубина заложения трубопровода, м.

Напряжения в теле трубопровода, вызванные поездной нагрузкой, определяются [6]:

$$\sigma_{\text{п}} = -\frac{P}{\pi} \cdot \left[ \beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\beta_1 - \beta_2 - \frac{1}{2} \sin 2\beta_2 \right], \quad (4)$$

где  $\sigma_{\text{п}}$  — напряжение в теле трубы от поездной нагрузки, кПа;

$P$  — поездная нагрузка, кН/м<sup>2</sup>;

$\beta_1$  и  $\beta_2$  — углы, отсчитываемые от вертикалей, ограничивающих нагрузку, в градусах.

В табл. 1 приведены значения частот и амплитуд колебательного процесса, полученные в результате натурных испытаний, проведенных на действующем железнодорожном трубопроводе при движении различных серий локомотивов [1].

Полученные уровни факторов и их интервалы варьирования приведены в табл. 2.

Для практических задач построения факторной модели, при  $n \geq 5$  целесообразнее использовать дробный факторный эксперимент (ДФЭ) [10]. При ДФЭ реализуется часть (дробная реплика) ПФЭ, т. е. уменьшение числа испытаний за счет введения дробных реплик, что не ведет к изменению свойств плана ПФЭ, т. е. матрица планирования  $X$  остается ортогональной.

В начале строится ПФЭ для меньшего числа факторов  $n = 3$ . Затем оставшиеся факторы  $X_4$

ТАБЛИЦА 1. Амплитудно-частотные характеристики колебательного процесса трубопровода при движении различных серий локомотивов

Серия локомотивов	Частотный диапазон колебаний, $\omega$ , Гц			Значения амплитуд колебаний, $A$ , мк	
	вертикальных	горизонтальных	осевых	трубы	стыкового соединения
Маневровый ТЭМ-2	80–100	40–70	5–10	100	270
Поездной грузовой 2ТЭ10М	80–90	30–60	5–10	42	125
Поездной пассажирский ТЭП-70	70–80	30–50	4–6	33	106
Электропоезд ЭР-2	60–70	20–40	3–5	12	30

ТАБЛИЦА 2. Уровни факторов и их интервалы варьирования

Кодированное обозначение факторов	Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
		-1	0	1	
$X_1$	Поездная нагрузка, $P$ , кН/м <sup>2</sup>	$\frac{30}{20}$	$\frac{50}{40}$	$\frac{70}{60}$	$\frac{20}{20}$
	Напряжение от поездной нагрузки, $\sigma$ , кПа				
$X_2$	Частота колебаний трубопровода, $\omega$ , Гц	30	50	70	20
$X_3$	Амплитуда колебаний трубопровода, $A$ , мк	100	200	300	100
$X_4$	Диаметр трубопровода, $D$ , мм	100	200	300	100
$X_5$	Глубина заложения трубы, $H$ , м	$\frac{1,5}{30}$	$\frac{2,0}{40}$	$\frac{2,5}{50}$	$\frac{0,5}{10}$
	Напряжение от грунта, $\sigma$ , кПа				

ТАБЛИЦА 3. Матрица планирования ДФЭ типа  $2^{5-2}$ 

№ испытаний	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_1 \cdot X_4$	$X_2 \cdot X_4$	$X_3 \cdot X_4$	Отклики $Y_i$ , млн циклов
1	+	-	-	-	+	+	-	-	-	13,3
2	+	+	-	-	-	-	-	+	+	7,9
3	+	-	+	-	-	+	+	-	+	8,8
4	+	-	-	+	+	-	-	-	+	14,2
5	+	+	+	-	+	-	+	+	-	12,7
6	+	+	-	+	-	+	-	+	-	18,4
7	+	-	+	+	-	-	+	-	-	9,8
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	20,1

и  $X_5$  заменяются генерирующими соотношениями:  $X_4 = X_1 \cdot X_2$ ;  $X_5 = X_1 \cdot X_3$ , которые служат для построения дробной реплики. Полученный план ДФЭ обозначается  $2^{5-2}$ , для его реализации необходимо провести 8 испытаний.

В ортогональном планировании допускаются следующие сочетания факторов:  $X_1 \cdot X_4$  — поездной нагрузки и диаметра трубопровода;

$X_2 \cdot X_4$  — частоты колебаний и диаметра трубопровода;  $X_3 \cdot X_4$  — амплитуды колебаний и диаметра трубопровода. Матрица планирования ДФЭ типа  $2^{5-2}$  представлена в табл. 3. Под откликом  $Y$  принималось число циклов, наработанных до резкого падения давления воды в испытываемом трубопроводе, которое фиксировалось манометром.

### Построение факторной модели

Информация, полученная при реализации матрицы планирования ДФЭ по испытанию трубопровода на надежность в условиях действия вибродинамической нагрузки, позволяет построить факторную модель исследуемого процесса. Модель эксперимента описывается уравнением регрессии, связывающим отклик  $Y$  с факторами  $X_j$ :

$$Y = \beta \cdot \mathbf{X} + \varepsilon, \quad (5)$$

где  $\mathbf{X} = (\mathbf{1}, X_1, \dots, X_5)$  матрица факторов;

$\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_5)$  — вектор параметров линейной регрессионной модели;

$\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$  — ошибки измерений (случайная помеха или белый шум). Согласно теореме Гаусса — Маркова белый шум удовлетворяет условиям:  $\mathbf{E}\varepsilon = 0$ ;  $\mathbf{E}(\varepsilon_i \cdot \varepsilon_k) = 0$ .

Представление функции регрессии  $\mathbf{E}(Y|\mathbf{X}) = \beta \cdot \mathbf{X}$  в развернутом виде [11] следующее:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{ji} + \varepsilon_i, \quad (6)$$

здесь  $\beta_j$  — коэффициент (параметр)  $j$ -го фактора  $X_j$  в уравнении регрессии, определяемый методом наименьших квадратов;

$j$  — номер фактора;

$i$  — номер компоненты  $j$ -го фактора;

$n$  — количество факторов.

Для  $n = 5$  уравнение (6) имеет вид:

$$Y_i = \beta_0 \cdot \mathbf{1}_i + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{4i} + \beta_5 X_{5i} + \varepsilon_i. \quad (7)$$

Коэффициенты  $\beta_j$  в уравнении регрессии находились по методу наименьших квадратов [12]:

$$\beta_j = \text{cov}(Y, X_j) = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} \cdot Y_i}{N}, \quad (8)$$

где  $X_{ji}$  — значения кодированных факторов в матрице планирования  $\mathbf{X}$ ;

$Y_i$  — значение отклика, полученного в результате эксперимента;

$N$  — число испытаний по плану.

Уравнение регрессии в случае ПФЭ имеет вид:

$$Y = 13,05 + 1,6X_1 - 0,225X_2 + 2,45X_3 + 1,93X_4 + 1,8X_5 + \varepsilon. \quad (9)$$

А функция регрессии в случае ДФЭ имеет вид:

$$\hat{Y} = 13,05 + 1,6X_1 - 0,225X_2 + 2,45X_3 + 1,93X_4 + 1,8X_5 - 0,225X_1X_4 + 1,6X_2X_4 - 0,325X_3X_4. \quad (10)$$

### Проверка значимости коэффициентов регрессии факторной модели

1. Проверка статистической значимости коэффициентов регрессии

Для этого необходимо определить остаточную дисперсию модели  $DY$  и дисперсию коэффициентов регрессии  $D\beta_i$ :

$$DY = \frac{\sum_{k=1}^m (Y_k - \bar{Y})^2}{m-1}, \quad (11)$$

$$D\beta_i = \frac{DY}{N}, \quad (12)$$

где  $m = 3$  — число испытаний, проведенных в центральной области матрицы планирования.

В данном случае  $D\beta_i = \frac{1,085}{8} = 0,135$ .

Оценка значимости коэффициентов регрессии проводилась по критерию Стьюдента. При этом для каждого коэффициента вычислялось значение критерия:

$$t_i = \frac{|\beta_i|}{D\beta_i}, \quad (13)$$

где  $t_i$  — случайные величины, распределенные по закону Стьюдента;

$\beta_i$  — рассчитанные коэффициенты регрессии;  
 $D\beta_i$  — среднее квадратичное отклонение дисперсии коэффициента регрессии.

Полученные значения случайных величин  $t_i$  сравнивались с табличным значением критерия Стьюдента при числе степеней свободы  $l = m - 1$  на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ ,  $t_{0,95}(2) = 4,302$  [13]. Вклады в уравнение регрессии с коэффициентами, значения которых не попадают в доверительный интервал на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , были отброшены. В результате уравнение регрессии принимает вид:

$$\hat{Y} = 13,05 + 1,6X_1 + 2,45X_3 + 1,93X_4 + 1,8X_5 + 1,6X_2X_4. \quad (14)$$

Как видно из зависимости (14), влияние второго фактора — частоты колебаний трубопровода, а также сочетание факторов  $X_1 \cdot X_4$  поездной нагрузки и диаметра трубопровода и  $X_3 \cdot X_4$  — амплитуды колебаний и диаметра трубопровода в изучаемых пределах незначительно.

### 2. Проверка адекватности факторной модели

Для этого вычислялась остаточная дисперсия уравнения регрессии относительно экспериментальных данных:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i^2)}{N - k}, \quad (15)$$

где  $y_i$  — экспериментальные данные (отклики);

$\hat{y}_i$  — данные, полученные из эмпирического уравнения (14) при значениях аргументов, приведенных в матрице планирования;

$N - k$  — число степеней свободы;

$k$  — число коэффициентов в уравнении регрессии.

Проверка гипотезы об адекватности факторной модели (уравнения регрессии) эксперимен-

тальным данным проводилась с использованием  $F$  — статистики Фишера:

$$F = \frac{S^2}{DY}. \quad (16)$$

Для данного случая:

$$S^2 = \frac{22,84}{2} = 11,42; \quad F = \frac{11,42}{1,085} = 10,53.$$

Сравнение полученного значения  $F$  — статистики с табличным значением  $F_{0,05}(2, 2) = 19,0$  [13] подтверждает принятую гипотезу. Следовательно, факторная модель адекватна экспериментальным данным на уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

### 3. Проверка адекватности факторной модели (уравнения регрессии) физике явления

При этом использовалось неравенство:

$$y = |\hat{y} - \bar{y}| \leq S \cdot t_{1-\alpha} \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}, \quad (17)$$

где  $S$  — среднее квадратичное отклонение дисперсии испытания.

Для  $t_{0,98}(3) = 4,54$  [13] на уровне значимости  $\alpha = 0,02$  с числом степеней свободы  $r = m_1 + m_2 - 2$ :

$$|12,67 - 13,05| < 1,04 \cdot 4,54 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{2}}.$$

Таким образом, уравнение регрессии с принятым уровнем значимости достаточно точно описывает процесс (эксперимент) в исследуемой области.

### Определение виброндежности трубопроводов

Для практических целей представляет интерес связь классического аппарата теории надежности с реальными физическими процессами, следствием которых являются повреждения трубопроводов.

Для установления зависимости показателей надежности трубопроводов от физики процессов использовались полученная факторная модель (14) или уравнение регрессии, преобразованное путем перехода от кодированных значений факторов к натуральным данным по формуле:

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i^*}{\Delta_i}, \quad (18)$$

где  $Z_i$  — значение фактора в натуральных измерениях;

$\bar{X}_i^*$  — значение фактора в центре изучаемой области;

$\Delta_i$  — интервал варьирования.

Тогда на основании данных табл. 2 получим:

$$Z_1 = \frac{P - 50}{20}; Z_2 = \frac{\omega - 50}{20}; Z_3 = \frac{A - 200}{100};$$

$$Z_4 = \frac{D - 200}{100}; Z_5 = \frac{H - 2}{0,5}. \quad (19)$$

В результате натурных испытаний, проведенных на действующем железнодорожном трубопроводе при движении различных серий локомотивов, было установлено, что максимальные значения виброускорений зафиксированы при прохождении маневрового локомотива [1]. Данный факт объясняется тем, что тележка маневрового локомотива имеет наибольший вес необрессоренной части и максимальную жесткость рессорного подвешивания по сравнению с тележками других серий локомотивов [9].

Проведенные натурные испытания также показали, что при прохождении маневрового локомотива получен максимальный диапазон амплитуд смещения исследуемого трубопровода в пределах от 100 до 270 мк (табл. 2). Амплитуды смещения трубопровода выявленного диапазона, являются причиной большинства случаев повреждений железнодорожных трубопроводов.

Исходя из вышеизложенного, количество вибродинамических циклов в год, которым подвергаются железнодорожные трубопроводы ( $N$ ), определялось при движении маневрового локомотива по станции как вида транспорта, оказывающего наиболее разрушительные действия на трубы. Данные о маневровой работе локомотива на железнодорожной станции получены из источников [14–16].

Для примера принята внеклассная станция Санкт-Петербург-Главный, на которой выполняются все виды технологических операций. Используя суточный план-график работы станции, были получены данные о маневровых передвижениях локомотива по станционным путям. По технологическим картам маневровой работы локомотива на станции (перестановка составов, подача состава из Ранжирного парка) было определено время на основные технологические операции  $\Delta t = 219$  ч/год. Тогда число вибродинамических циклов в год, которым подвергаются железнодорожные трубопроводы при движении маневрового локомотива по станции, определялось:

$$N = \frac{L}{4 \cdot l_k} \cdot \frac{T}{\Delta t} \cdot 365 = 1,6 \text{ млн ц/год}, \quad (20)$$

где  $L = 2500$  м — расчетное расстояние передвижения локомотива (длина полурейса) при скорости 25 км/ч, м;

$T = 2920$  ч/год — среднее время работы локомотива в год;

$l_k = 1850$  мм — расстояние между колесными парами тележки маневрового локомотива;

$\Delta t$  — время на основные технологические операции маневрового локомотива на станции, ч/год.

Тогда интенсивность отказов трубопроводов при воздействии на них вибродинамической нагрузки от железнодорожного транспорта определяется следующим образом:

$$\lambda = \frac{1,6}{13,05 + 1,6 \cdot \left(\frac{P-50}{20}\right) + 2,45 \cdot \left(\frac{A-200}{100}\right) + 1,93 \cdot \left(\frac{D-200}{100}\right) + 1,8 \cdot \left(\frac{H-2}{0,5}\right) + 1,6 \cdot \left[\left(\frac{\omega-50}{20}\right) \cdot \left(\frac{D-200}{100}\right)\right]} \quad (20)$$

Используя значение интенсивности отказов  $\lambda$  (20), можно определить продолжительность эксплуатации трубопроводов (среднее время между отказами) —  $\bar{T}$ . Для этого в практических вычислениях используется формула [17]:

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}, \text{ год.} \quad (21)$$

### Заключение

На основе ДФЭ типа  $2^{5-2}$  построена факторная модель влияния вибродинамической нагрузки на надежность трубопроводов. Выявлены основные факторы, влияющие на надежность железнодорожных трубопроводов: поездная нагрузка, амплитуда колебаний трубопровода и глубина его заложения. Частота колебаний не оказывает существенного влияния на процесс разрушения трубопроводов, однако из уравнения регрессии (14) следует, что частота колебаний трубопровода зависит от его диаметра.

Преобразованное уравнение регрессии (факторная модель) может использоваться в практических целях для определения интенсивности отказов и продолжительности эксплуатации трубопроводов между отказами с учетом реальных физических процессов влияния вибродинамической нагрузки от подвижного состава на территории железнодорожных станций.

На практике эксплуатации трубопроводов по величине  $\bar{T}$  устанавливается время проведения планово-предупредительных работ, выполнение

которых способствует повышению надежности рабочего состояния труб и, следовательно, обеспечению безопасности движения железнодорожного транспорта.

### Библиографический список

1. Постнова Е. В. Модель вибродинамических воздействий подвижного состава на железнодорожные трубопроводы / Е. В. Постнова, Е. В. Рунев // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов. — 2021. — С. 105–108.
2. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний / Р. Мэнли. — М.: Машиностроение, 1982. — 367 с.
3. Postnova E. Mathematical model for assessing the reliability of water supply networks / E. Postnova, E. Runev // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402. — Pp. 343–351.
4. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М.: Наука, 1976. — 254 с.
5. Белов И. В. Математические методы в планировании на железнодорожном транспорте / И. В. Белов, А. Б. Каплан. — М.: Транспорт, 1972. — 248 с.
6. Яковлева Т. Г. Моделирование прочности и устойчивости земляного полотна / Т. Г. Яковлева, Д. И. Иванов. — М.: Транспорт, 1980. — 255 с.
7. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. МИИЖТ / И. В. Прокудин. — М., 1983. — 41 с.
8. Фришман М. А. Земляное полотно железных дорог / М. А. Фришман, И. Н. Хохлов, В. П. Титов. — М.: Транспорт, 1972. — 287 с.
9. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / Под общ. ред. А. И. Тищенко. — М.: Транспорт, 1976. — Т. 1. — 429 с.
10. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. — М.: Мир, 1980. — 610 с.
11. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. — М.: Высшая школа, 2001. — 207 с.
12. Яснопольский С. А. Построение эмпирических формул и подбор их параметров методом наименьших квадратов и методом средних / С. А. Яснопольский. — М.: Изд-во МИСиС, 1972. — 23 с.

13. Шор Я. Б., Таблицы для анализа и контроля надежности / Я. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин. — М.: Советское радио, 1968. — 284 с.

14. Петров А. Ю. Технология работы пассажирской станции: учебное пособие / А. Ю. Петров, П. К. Рыбин, И. Н. Шутов. — СПб.: ПГУПС, 2008. — 41.

15. Дубинский В. А. Технологический процесс работы пассажирской технической станции / В.А. Дубинский и др. — СПб.: ПГУПС, 1997. — Ч. 1 — 26 с., Ч. 2 — 40 с.

16. Нормативы для составления графика движения поездов ОАО «Российские железные дороги». — М.: Техноинформ, 2006.

17. Ильин Ю. А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования / Ю. А. Ильин. — М.: Стройиздат, 1985. — 240 с.

Дата поступления: 09.01.2023

Решение о публикации: 28.02.2023

#### Контактная информация:

ПОСТНОВА Елена Владимировна — канд. техн. наук, доц.; elenapost@bk.ru

РУНЕВ Евгений Валентинович — ст. преподаватель; jr\_2010@mail.ru

## Factor Model of Vibrodynamic Load Effect on Pipeline Reliability

E. V. Postnova, E. V. Runev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Postnova. E. V., Runev E. V. Factor Model of Vibrodynamic Load Effect on Pipeline Reliability // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 1, pp. 91–100. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-91-100

### Summary

**Purpose:** To build a factor model of vibrodynamic loading influence on pipeline reliability based on the results of laboratory tests carried out taking into account the amplitude-frequency characteristics of the vibration process of the operating pipeline, obtained during full-scale tests at the railway station. On the basis of the factor model to determine the most significant factors affecting the reliability of pipelines under the action of vibrodynamic loading and to propose ways to improve their reliability. **Methods:** The plan of fractional factor experiment of  $2^{5-2}$  type was used to carry out laboratory tests of pipeline reliability under the influence of stresses of familiar constant cycle. The experiments were carried out on a test bench with a pulsating cylinder of type PC with a maximum load of 200 kN. Voltages were applied to the pipeline under test from control panels of static (from soil) and dynamic (from rolling stock) loads. Impulse shape was sinusoidal, the closest to natural one, cycle frequency — 300 c/min. The regression equation coefficients were calculated on a computer using the multiple linear correlation program. The significance of the regression coefficients was assessed by Student's *t*-test. Fisher's test was used to check the adequacy of the model to the experimental data. Adequacy of the regression equation to the physics of the phenomenon was tested using Student's *t*-test. **Results:** Tests of the pipeline with application of fractional factor experiment of  $2^{5-2}$  type allowed to build a factor model of the process under study in the form of polynomial of the first degree. It has been established that the main factors influencing pipeline reliability under vibrodynamic loading are train load, vibration amplitude of the pipeline and the depth of its embedding. The vibration frequency of the pipeline has no significant influence on the pipeline reliability. However, from the regression equation it follows that the pipeline vibration frequency depends on its diameter. **Practical significance:** The equation of linear regression is obtained, which is transformed by switching from coded values of factors to natural values, which can be used for practical purposes to determine the intensity of failures and the duration of operation of pipelines between failures.

**Keywords:** Factor influence model, experiment planning, factor matrix, amplitude-frequency characteristics of the oscillatory process of the pipeline, full factor experiment, fractional factor experiment.

## References

1. Postnova E. V., Runev E. V. Model' vibrodinamicheskikh vozdeystviy podvizhnogo sostava na zhelezнодороzhnye truboprovody [Model of vibrodynamic effects of rolling stock on railway pipelines]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov* [III Betancourt International Engineering Forum: Proceedings]. 2021, pp. 105–108. (In Russian)
2. Manley R. *Analiz i obrabotka zapisey kolebaniy* [Analysis and Processing of Vibration Records]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1982, p. 367. (In Russian)
3. Postnova E., Runev E. Mathematical model for assessing the reliability of water supply networks. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 402, pp. 343–351.
4. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experimental Planning in Finding Optimal Conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976, p. 254. (In Russian)
5. Belov I. V., Kaplan A. B. *Matematicheskie metody v planirovanii na zhelezнодорожном транспорте* [Mathematical methods in planning on railway transport]. Moscow: Transport Publ., 1972, p. 248. (In Russian)
6. Yakovleva T. G., Ivanov D. I. *Modelirovanie prochnosti i ustoychivosti zemlyanogo polotna* [Modeling of Strength and Stability of Earthbed]. Moscow: Transport Publ., 1980, p. 255. (In Russian)
7. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zhelezнодорожного zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku: avtoref. disc. ... d-ra tekhn. nauk. MIIZhT* [Strength and deformability of a railway subgrade made of clay soils that perceive a vibrodynamic load: Ph.D. dIss. ... Dr. tech. Sciences. MIIZhT]. Moscow, 1983, 41 p. (In Russian)
8. Frishman M. A., Khokhlov I. N., Titov V. P. *Zemlyanoe polotno zheleznykh dorog* [Ground bed of railways]. Moscow: Transport Publ., 1972, p. 287. (In Russian)
9. *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizel'-poezdam. Pod obshch. red. A. I. Tishchenko* [Handbook of electric rolling stock, diesel locomotives and diesel trains. Ed. ed. A. I. Tishchenko]. Moscow: Transport Publ., 1976, vol 1, 429 p. (In Russian)
10. Johnson N., Lyon F. *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke* [Statistics and experiment planning in engineering and science]. Moscow: Mir Publ., 1980, p. 610. (In Russian)
11. Wentzel E. S. *Issledovanie operatsiy* [Operations Research]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001, p. 207. (In Russian)
12. Yasnopolsky S. A. *Postroenie empiricheskikh formul i podbor ikh parametrov metodom naimen'shikh kvadratov i metodom srednikh* [Construction of empirical formulas and selection of their parameters by the method of least squares and the method of averages]. Moscow: MISIS Publ., 1972, p. 23. (In Russian)
13. Shor Y. B., Kuzmin F. I. *Tablitsy dlya analiza i kontrolya nadezhnosti* [Tables for reliability analysis and control]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1968, p. 284. (In Russian)
14. Petrov A. Y., Rybin P. K., Shutov I. N. *Tekhnologiya raboty passazhirskoy stantsii: uchebnoe posobie* [Technology of the passenger station: a training manual]. St. Petersburg: PSUPS Publ., 2008, 41 p. (In Russian)
15. Dubinsky V. A. et al. *Tekhnologicheskii protsess raboty passazhirskoy tekhnicheskoy stantsii* [Technological process of passenger technical station operation]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1997, part 1 — 26 p., part 2 — 40 p. (In Russian)
16. *Normativy dlya sostavleniya grafika dvizheniya poezdov OAO "Rossiyskie zheleznye dorogi"* [Norms for making up train schedules of Russian Railways OJSC]. Moscow: Tekhnoinform Publ., 2006. (In Russian)
17. Ilyin Y. A. *Nadezhnost' vodoprovodnykh sooruzheniy i oborudovaniya* [Reliability of waterworks structures and equipment]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1985, p. 240. (In Russian)

Received: January 09, 2023

Accepted: February 28, 2023

### Author's information:

Elena V. POSTNOVA — PhD in Engineering, Associate Professor; elenapost@bk.ru

Evgeniy V. RONEV — Senior Lecturer; jr\_2010@mail.ru