

Научная статья

УДК 620.179.12 : 624.071.322

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28203>



*Я.С. Ватулин<sup>1</sup>, А.С. Ватаев<sup>1</sup>, В.М. Великанов<sup>2</sup>,  
К.К. Ким<sup>1</sup>, М.В. Сочава<sup>3</sup> ✉, М.Н. Козлов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> ФГУП Петербургский метрополитен,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [mvsochava@gmail.com](mailto:mvsochava@gmail.com)

## **АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАКЛАДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА СРЕДСТВАМИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Аннотация.* Представлена конечно-элементная математическая модель, описывающая штатное и дефектные состояния металлоконструкции узла подвеса на базе Т-образных закладных конструкций обделки тоннеля, располагающегося в помещениях метрополитена, в динамических режимах нагружения. Рассмотрены случаи: бездефектного состояния конструкции, разрушение закрепления Т-образной закладной; полная коррозия шпилек; частичная коррозия правой части верхней шпильки. Выполнена апробация математической модели на основе результатов эксперимента. Показано, что математическое моделирование с помощью метода конечных элементов позволяет установить расположение характерных точек металлоконструкции, в которых следует измерять виброускорения для получения объективных данных о ее состоянии. С помощью разработанной математической модели показано, что для однозначного определения дефектного состояния металлоконструкции и определения типа дефекта необходимо и достаточно применение в комплексе спектрального анализа, вейвлет-преобразования анализа и анализа годографа вектора ускорения. Представлены результаты экспериментального и численного исследований.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, метод конечных элементов, закладные металлоконструкции, вейвлет-преобразование, вибродиагностика.

*Для цитирования:*

Ватулин Я.С., Ватаев А.С., Великанов В.М. и др. Анализ технического состояния закладных металлических конструкций сооружений метрополитена средствами конечно-элементного моделирования // *Материаловедение. Энергетика.* 2022. Т. 28, № 2. С. 29–42.  
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28203>



Ya.S. Vatulin<sup>1</sup>, A.S. Vataev<sup>1</sup>, V.M. Velikanov<sup>2</sup>,  
K.K. Kim<sup>1</sup>, M.V. Sochava<sup>3</sup> ✉, M.N. Kozlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> St. Petersburg State Unitary Enterprise "St.Petersburg Metro",  
St. Petersburg, Russia;

<sup>3</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia

✉ [mvsochava@gmail.com](mailto:mvsochava@gmail.com)

## ANALYSIS OF THE TECHNICAL CONDITION OF EMBEDDED METAL CONSTRUCTIONS OF METRO STRUCTURES WITH THE HELP OF FINITE ELEMENT MODELING

*Abstract.* The paper presents a finite element mathematical model (FEM). This model describes operating and faulty states of the metal suspension on the basis of T-shaped embedded details of the tunnel lining located in the subway premises at the dynamic loading conditions. We considered the defect-free state of the metal details, the case of the destruction of the fixing T-shaped mortgage, the case of the complete corrosion of studs, the case of the partial corrosion of the right part of the upper stud. The mathematical model was verified using the experimental results. It is shown that FEM modeling makes it possible to establish the location of the characteristic points of a metal suspension, in which vibration accelerations should be measured to obtain objective data on its state. Using the developed mathematical model, we showed that to unambiguously determine the defective state of the metal details and determine the type of defect, it is necessary and sufficient to use a combination of spectral analysis, wavelet transform analysis and analysis of the acceleration vector hodograph. The results of experimental and numerical researches are presented.

*Keywords:* mathematical modeling, finite element method, embedded metal details, wavelet transform, vibration diagnostics.

### *Citation:*

Ya.S. Vatulin, A.S. Vataev, V.M. Velikanov and etc., Analysis of the technical condition of embedded metal constructions of metro structures with the help of finite element modeling, *Materials Science. Power Engineering*, 28 (02) (2022) 29–42, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28203>

**Введение.** Подвесные опорные элементы на базе Т-образных закладных конструкций обделки тоннеля, расположенные в помещениях метрополитена различного назначения, являются наиболее ответственными и высоконагруженными узлами, от которых в существенной степени зависит безопасность погрузочно-разгрузочных работ. Основным несущим элементом конструкции является радиусный фрагмент Т-образной накладке центрального закладного элемента, расположенный с внешней стороны тоннеля (рис. 1) Часть нагрузки также несут вертикальная стенка подвеса РТ01.03.001, замоноличенная в зазоре между тубингами, а также болтовые соединения, установленные в отверстия тубингов. Видимая часть конструкции представлена на рис. 1б.

Наличие сварного соединения между накладкой и вертикальным листом, а также расположение значительной части конструкции в области с повышенной коррозионной активностью, наличие нештатных и нерасчетных сочетаний нагрузок [1–5] делает актуальным применение методов неразрушающего контроля с целью оценки текущего состояния, остаточного ресурса, скорости и особенностей деградации прочностных свойств материала указанных конструкций в зонах, недоступных для визуального осмотра и обслуживания.

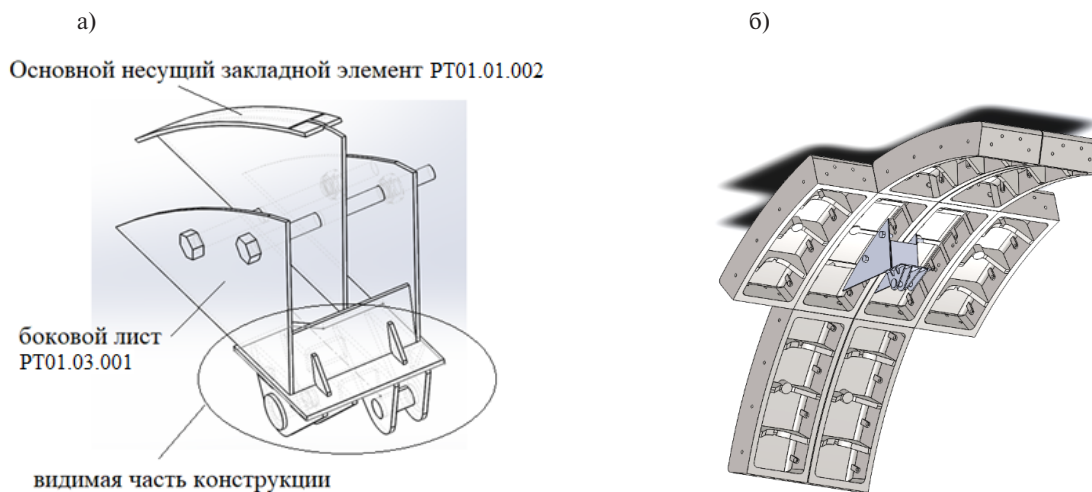


Рис. 1. а) Устройство подвесного опорного элемента;  
 б) 3D модель фрагмента обделки тоннеля с установленным подвесом

Fig. 1. а) The device of the suspended support element;  
 б) 3D model of a fragment of the tunnel lining with an installed suspension

Задача определения технического состояния с помощью способов неразрушающего контроля не является новой. В настоящее время накоплен достаточный опыт оценки состояния монолитных частей металлоконструкций [1, 3–5, 7–9], в том числе с помощью акустико-эмиссионных методов [2, 6, 1–6], поскольку они обладают высокой степенью проникновения в элементы конструкции, и имеют высокую информативность условий прохождения акустических волн [4–6]. Указанные методы основаны на регистрации упругих механических колебаний (акустических волн) при тестовом воздействии.

Следует отметить, что наиболее важными с точки зрения прочности, характеристиками процесса распространения акустических волн в конструкции, учитывающей свойства материала, являются фазовые параметры распространения волн, а именно временные зависимости проекций вектора виброускорения на три ортогональные оси, полученные в характерных точках исследуемой металлоконструкции [3, 7]. Фазочувствительность применяемых в настоящее время векторных 3D-преобразователей и инвариантность пространственного расположения измерительных осей относительно конкретной измерительной точки [7] позволяет исследовать анизотропию прочности конструкции путем построения «вибропортрета» объекта как совокупности параметров образа волнового поля механических колебаний измеряемой точки объекта: частоты, амплитуды и фазы распространяющихся колебаний.

Ввиду сложной многоступенчатой связи рабочей площадки с основным несущим элементом посредством нескольких промежуточных элементов, а также по причине высокой чувствительности метода к расположению точки измерения, целесообразно сочетать экспериментальные методы определения технического состояния с расчетными методами, в том числе на основе метода конечных элементов<sup>1</sup> [10–12].

Имитационное моделирование позволяет найти характерные точки металлоконструкции, в которых полученные экспериментально значения виброускорений однозначно определяют состояние металлоконструкции; оптимизировать процедуру эксперимента путем рационального выбора зон введения импульса в конструкцию и сканирования данных с учетом возможности их доступности, выполнить расчет состояния металлоконструкции и моделировать дефекты в зонах,

<sup>1</sup> Алямовский, А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 783 с. Режим доступа <http://e/lanbook.com/book/1318>

недоступных для непосредственного измерения. Определение временных зависимостей проекций вектора виброускорений и деформаций в конструкции требует постановки и решения задачи моделирования металлоконструкции в нестационарной постановке [10–12]. Решение задачи в подобной постановке применительно к сооружениям метрополитена в настоящее время отсутствует.

**Методы решения задачи численного моделирования процесса распространения прямоугольного импульса по металлоконструкции узла подвеса**

Моделирование процесса распространения прямоугольного импульса по исследуемой металлоконструкции выполнено в трехмерной постановке с помощью программного комплекса Comsol Multyphysisc 5.5 [10].

При моделировании приняты следующие допущения и упрощения:

1. Материалы бойка и подвеса (конструкционная сталь) является однородными и изотропными, остаточные деформации отсутствуют.
2. Движение бойка ударника реализует упругий центральный удар, при этом локальные пластические деформации материала металлоконструкции и бойка пренебрежимо малы [8, 10–12].
3. Влияние сил гравитации на процесс соударения и распространения энергии по конструкции пренебрежимо мало.
4. При рассмотрении граничных условий заземления с возможностью перемещения в направлении, перпендикулярном нормали к поверхности, силы вязкого трения считаются пренебрежимо малыми.
5. Влияние обделки тоннеля в части диссипации энергии соударения пренебрежимо мало.

На Т-образной закладной применено граничное условие Fixed Constraint [10], что соответствует жесткому заземлению элемента. Ребра жесткости, непосредственно контактирующие с тубингами, могут перемещаться только в направлении перпендикулярном нормали к поверхности торца тубинга (т.е. в вертикальной плоскости), что описывается с помощью граничного условия Roller [10]. Болты, удерживающие кронштейн в проектном положении, могут перемещаться только вдоль продольной оси. В начальный момент времени кронштейн неподвижен и не деформирован.

В процессе исследования выполнена серия расчетов и рассмотрены следующие состояния конструкции: бездефектное состояние, разрушение закрепления Т-образной закладной; полная коррозия шпилек; частичная коррозия правой части верхней шпильки. Для моделирования разрушения Т-образной закладной не используется граничное условие Fixed Constraint [10], что позволяет центральному листу металлоконструкции перемещаться в вертикальной плоскости. При моделировании же коррозии шпилек и их участков не используются граничные условия Roller на дефектных поверхностях, что позволяет шпилькам совершать сложное трехмерные колебания. Остальные граничные и начальные условия остаются неизменными.

Разбиение расчетной области во всех расчетных случаях выполнено тетраэдрическими элементами. Расчеты выполнены в нестационарной постановке. Диапазон значений времени от 0 до 0,12 секунд с шагом сохранения решения 0,5 миллисекунд.

**Результаты и обсуждение**

Расчет виброускорений и деформаций для случая отсутствия дефектов был выполнен с целью верификации модели, а также определения характерных точек, однозначно определяющих текущее состояние металлоконструкции. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты расчета проекций вектора виброускорения на оси X, Y и Z при  $t = 0.005$  с.

Результаты расчета деформаций представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов позволил выявить характерные точки металлоконструкции, в которых определяются значения виброускорений для дальнейшей оценки ее состояния. Уста-

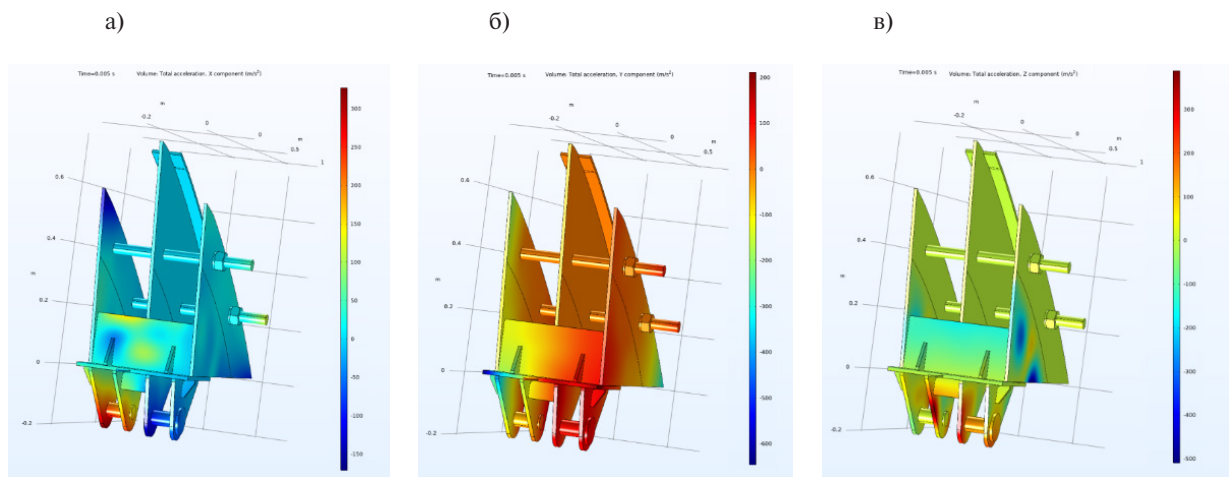


Рис. 2. Результаты расчета составляющих вектора виброускорения при  $t = 0.005$  с:  
а – проекция на ось X; б – проекция на ось Y; в – проекция на ось Z

Fig. 2. The results of calculating the components of the vibration acceleration vector at  $t = 0.005$  s:  
a – projection on the X axis; b – projection on the Y axis; c – projection on the Z axis

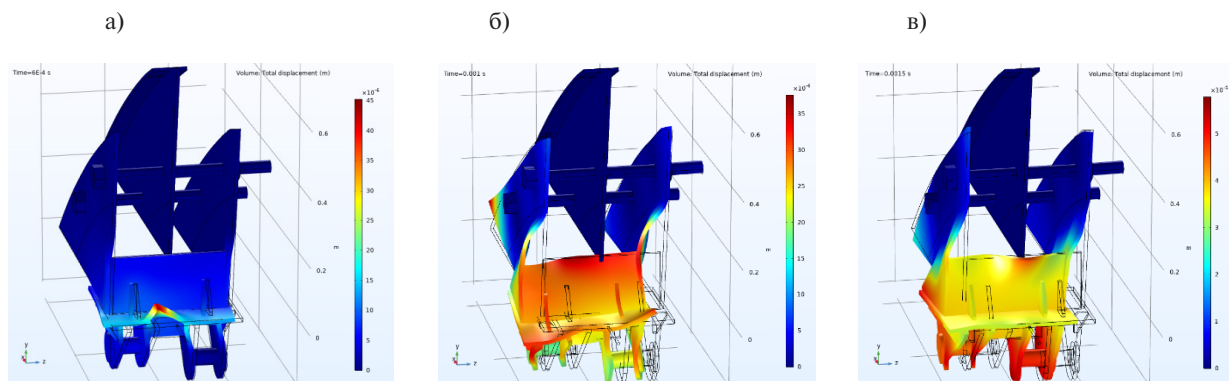


Рис. 3. Результаты расчета деформированных состояний металлоконструкции при отсутствии дефекта: а – при  $t = 0,6$  мс; б – при  $t = 1$  мс; в – при  $t = 1,5$  мс

Fig. 3. Results of calculations of deformed states of metal structures in the absence of a defect:  
a – at  $t = 0.6$  ms; b – at  $t = 1$  ms; c – at  $t = 1.5$  ms

новлено, что для получения объективных данных о состоянии металлоконструкции достаточно получить значения виброускорений в трех точках, а именно: вертикальный торец левого листа, вертикальный торец центрального листа и вертикальный торец правого листа.

Разработанная конечно-элементная модель подвеса, была верифицирована с использованием результатов натурного эксперимента с применением трехкомпонентного пьезоэлектрического виброакселерометра. Внешний вид примененного измерительного комплекса показан на рис. 4.

Критериями адекватности моделирования является когерентность значений проекций вектора ускорения на оси X, Y и Z, полученных экспериментально с помощью трехкомпонентных датчиков ускорения [10, 13–14] и расчетным путем для случая отсутствия дефектов.

Анализ результатов натурного эксперимента показал, что после удара металлоконструкция начинает совершать сложные затухающие колебания в трех плоскостях, причем наибольшим деформациям подвержены боковые листы, а также вертикальный торцевой лист. В процессе же *численного моделирования штатного состояния* металлоконструкции, установлено, что узел подвеса



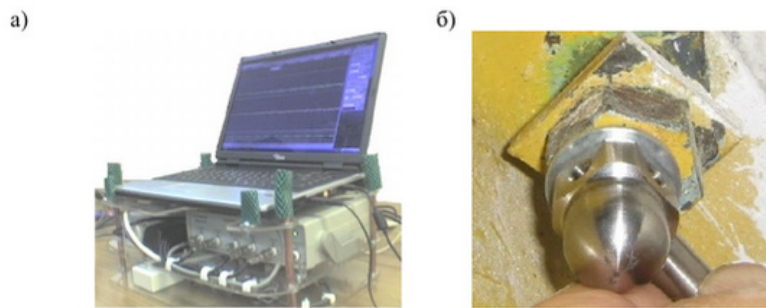


Рис. 4. Мобильный виброизмерительный комплекс (а) и трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр (б)

Fig. 4. Mobile vibration measuring complex (a) and three-component piezoelectric vibration accelerometer (b)

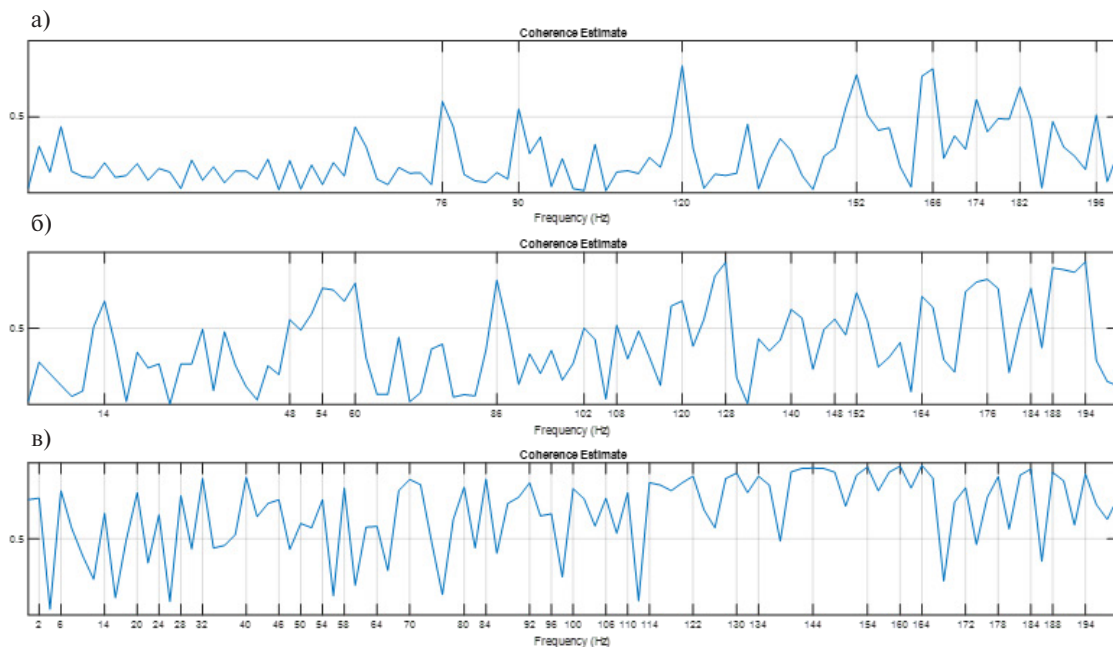


Рис. 5. Результаты теста на когерентность значений проекций вектора виброускорения на оси X (а), Y (б), Z (в), полученных при штатном закреплении металлоконструкции экспериментальным и расчетным путем

Fig. 5. The results of the test for the coherence of the values of the projections of the vibration acceleration vector on the X (a), Y (b), Z (c) axes obtained during the standard fixing of the metal structure by experimental and calculated methods

(совместно со шпильками) совершает колебания преимущественно вдоль оси Z. При этом боковые листы конструкции совершают дополнительные колебания и в горизонтальном направлении оси X, что связано с различной пространственной податливостью объекта вследствие несимметричной формы конструкции в целом.

Адекватность разработанной расчетной модели подтверждена высоким процентом когерентности экспериментальных и расчетных значений проекций вектора виброускорения (рис. 5).

Результаты расчета деформаций при наличии дефектов представлены на рис. 6–8.

Выполненный анализ спектральной плотности мощности сигнала в характерных точках по времени, позволил выявить особенности диссипации энергии в элементах конструкции при воздействии кратковременного высокоинтенсивного импульса. При этом изображения сонограмм

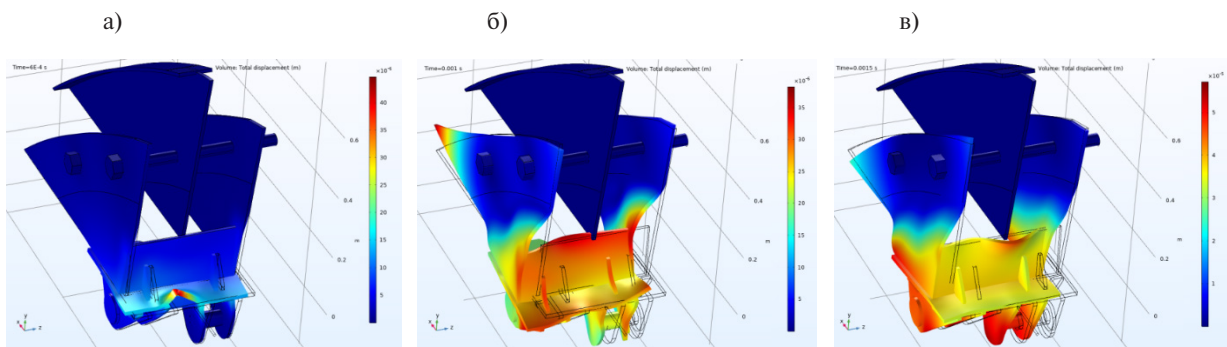


Рис. 6. Результаты расчета деформированных состояний металлоконструкции при разрушении закрепления Т-образной закладной (а –  $t = 0,6$  мс; б –  $t = 1$  мс; в –  $t = 1,5$  мс)

Fig. 6. Results of calculation of deformed states of a metal structure at destruction of fixing of a T-shaped mortage (a –  $t = 0.6$  ms; б –  $t = 1$  ms; в –  $t = 1.5$  ms)

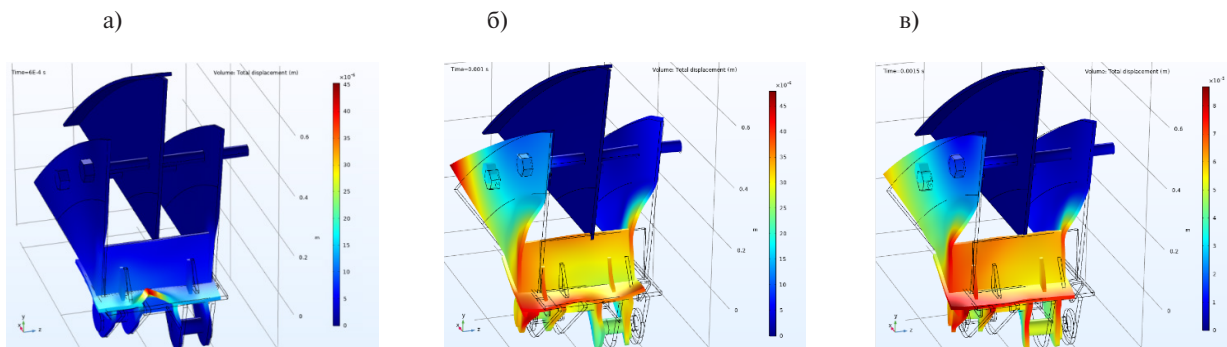


Рис. 7. Результаты расчета деформированных состояний металлоконструкции при полной коррозии шпилек (а –  $t = 0,6$  мс; б –  $t = 1$  мс; в –  $t = 1,5$  мс)

Fig. 7. Results of calculation of deformed states of metal structures with complete corrosion of studs (a –  $t = 0.6$  ms; б –  $t = 1$  ms; в –  $t = 1.5$  ms)

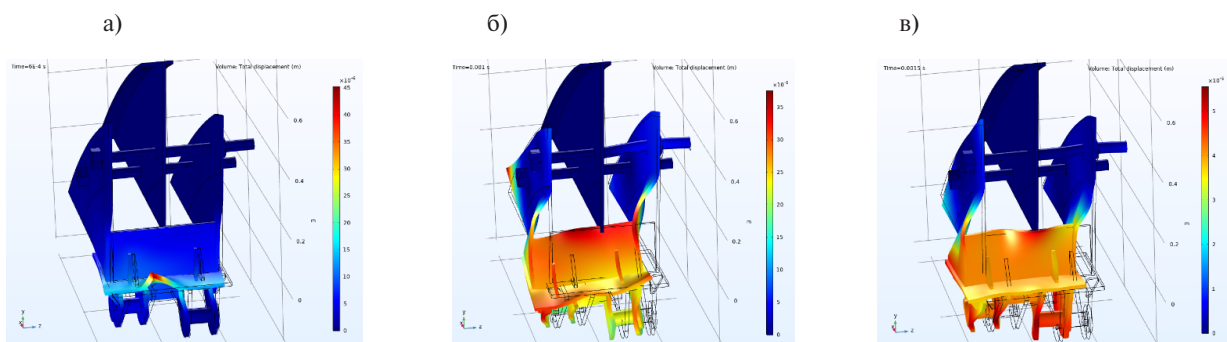


Рис. 8. Результаты расчета деформированных состояний металлоконструкции при коррозии правой части верхней шпильки (а –  $t = 0,6$  мс; б –  $t = 1$  мс; в –  $t = 1,5$  мс)

Fig. 8. Results of calculation of the deformed states of the metal structure during corrosion of the right part of the upper stud (a –  $t = 0.6$  ms; б –  $t = 1$  ms; в –  $t = 1.5$  ms)

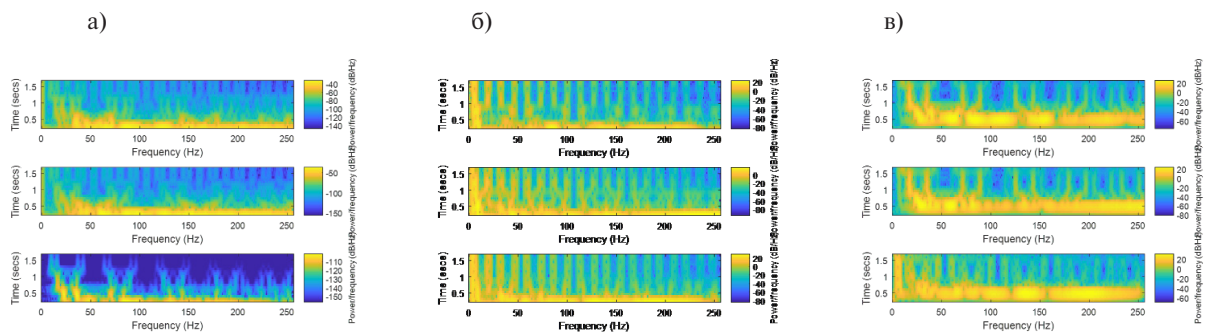


Рис. 9. Результаты спектрального анализа колебательного процесса при наличии дефектов:  
 а – разрушение закрепления Т-образной закладной;  
 б – полная коррозия шпилек; в – коррозия правой части верхней шпильки  
 Fig. 9. The results of the spectral analysis of the oscillatory process in the presence of defects:  
 а – destruction of the fastening of the T-shaped mortgage;  
 б – complete corrosion of the studs; c – corrosion of the right part of the upper stud

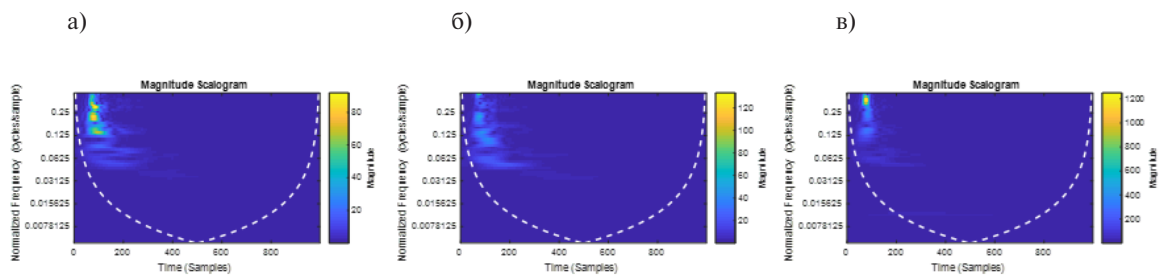


Рис. 10. Скалограммы вейвлет-преобразования для случая разрушения закрепления Т-образной закладной; а - для отведения X, б –для отведения Y; в –для отведения Z  
 Fig. 10. Wavet transform scalograms for the case of destruction of the T-shaped mortgage attachment; а - for X, б –for Y; c –for Z

мощности сигнала имеют четко структурированный вид циклически повторяющихся последовательностей энергетических флуктуаций различной интенсивности (см. рис. 9).

Временная динамика диссипации энергии в сопряженных элементах конструкции в исправном и дефектных состояниях оценивалась с применением базисного вейвлета типа 'bump' (удар) [13–16]. Составляющие компоненты масштабных коэффициентов анализируемого колебательного процесса представлены на вейвлет-скалограммах «масштабный фактор – время». В качестве примера на рис. 10 приведены скалограммы для случая дефекта в виде разрушения закрепления Т-образной закладной.

В результате анализа скалограмм вейвлет-анализа выявлено, что для дефекта Т-образной закладной характерно значительное снижение значений экстремумов спектра в области высоких частот. Конусная структура импульса имеет уширение и пролонгацию гребней энергетических возбуждений в направлении больших масштабов, сопровождающуюся снижением интенсивности. При *полной коррозии шпилек* экстремумы спектра на скалограммах наблюдаются в области высоких частот, с постепенным снижением интенсивности в направлении больших масштабов. При этом по сравнению с исправным состоянием значения экстремумов снижаются до 50%, что может служить характерным признаком указанного дефекта. При коррозии правой части верхней шпильки в конструкции возникают значительные энергетические колебания, отображающиеся на скалограммах, но большей мощности. Вид их аналогичен дефекту «Т»-образной закладной.



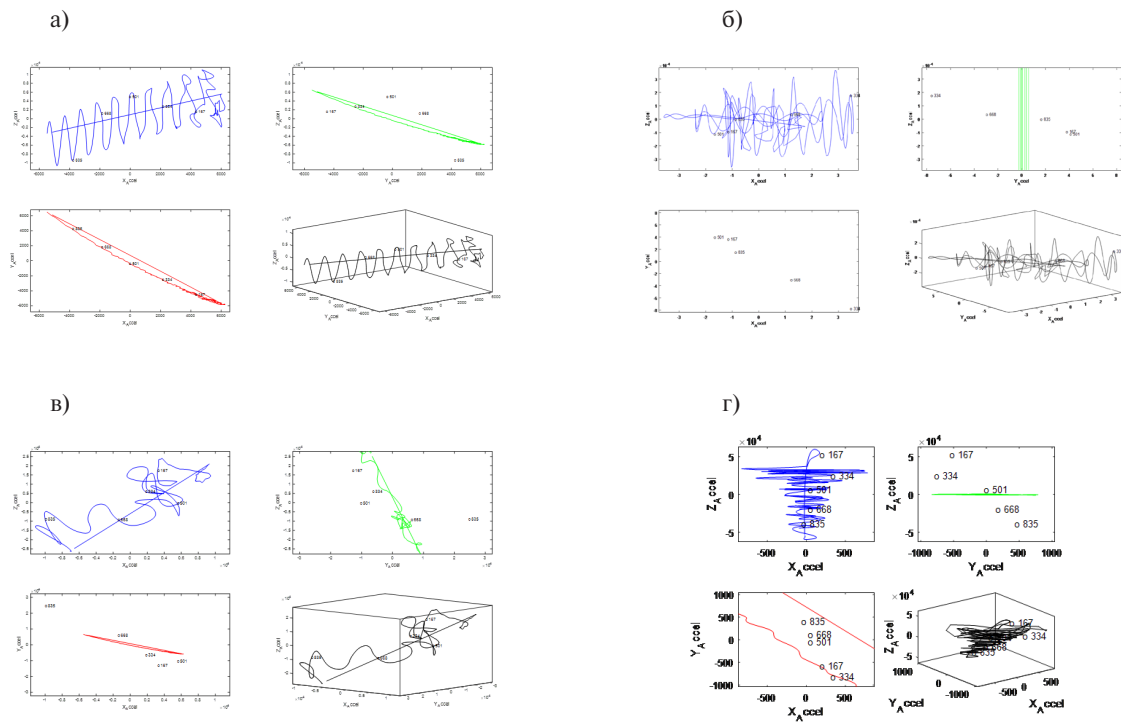


Рис. 11. Результаты расчета годографа вектора ускорения, полученные для характерной точки, расположенной на вертикальном торце левого листа: а – в исправном состоянии, б – при разрушение закрепления Т-образной закладной; в – при полной коррозии шпилек; г – при разрушении участка шпильки

Fig. 11. The results of the calculation of the acceleration vector hodograph obtained for a characteristic point located on the vertical end of the left sheet. а – in good condition, б – with the destruction of the fastening of the T-shaped mortgage; в – with complete corrosion of the studs; д – with the destruction of the hairpin secti

Для исправного и всех дефектных состояний были рассчитаны максимальные значения амплитуд коэффициентов вейвлет-преобразования по отведениям X, Y, Z. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1  
**Расчетные значения амплитуд коэффициентов вейвлет-преобразования**

Table 1

**Calculated values of the amplitudes of the wavelet transform coefficients**

Состояние конструкции	Отведение X	Отведение Y	Отведение Z
Исправное	90	110	1200
Разрушение закрепления Т-образной закладной	10	10	10
Полная коррозия шпилек	130	200	600
Коррозия правой части верхней шпильки	130	200	600

Видно, что значения коэффициентов значительно отличаются в случаях исправных и дефектных состояний, особенно для случая разрушения закрепления Т-образного закладного элемента. Вместе с тем, определение типа дефектного состояния объекта с помощью вейвлет-преобразования затруднено и требует рассмотрения дополнительного критерия, определяющего состояние конструкции. В качестве такого дополнительного критерия в настоящей работе предложено

использовать годографы вектора ускорения, позволяющие визуализировать пространственные перемещения объекта в характерных точках металлоконструкции. В качестве примера на рис. 11 показаны годографы вектора ускорения для характерной точки, расположенной на вертикальном торце левого листа.

На основе анализа расчета годографов вектора ускорения сформулированы диагностические признаки рассмотренных выше дефектов. Так, признаками повреждения Т-образной закладной является потеря повторяемости структуры вида кривой годографа с ориентацией линии тренда параллельно оси ОХ. Диагностическими признаками коррозии шпилек является плавная смена направления линии годографа, потеря повторяемости структуры кривой с ориентацией линии тренда параллельно оси ОХ. Для коррозии правой части верхней шпильки характерна резкая смена направления линии годографа, потеря повторяемости структуры кривой с ориентацией линии тренда параллельно оси ОZ.

### **Выводы**

1. Разработана и экспериментально апробирована конечно-элементная математическая модель, описывающая штатные и дефектные состояния металлоконструкции узла подвеса в динамических режимах нагружения.
2. Показано, что для оценки состояния металлоконструкции необходимо и достаточно получения временных зависимостей виброускорений в трех точках металлоконструкции: торцевых плоскостей вертикальных боковых и горизонтального листов.
3. На основе проведенного с использованием разработанной модели численного эксперимента для случаев исправного и дефектного состоя металлоконструкции показано, что для однозначного определения дефектного состояния металлоконструкции и определения типа дефекта необходимо и достаточно применение в комплексе спектрального анализа, вейвлет-преобразования анализа и анализа годографа вектора ускорения.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- [1] **Егания Г.В.** Пассивная вибродиагностика мостовых сооружений // Наука и техника в дорожной отрасли: Материалы конференции, Москва, 18 марта 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. С. 52–54.
- [2] **Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Одина М.И.** Диагностика металлических пластин с остаточными напряжениями и дефектами методами нелинейной лазерной сканирующей виброметрии // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 3. С. 317.
- [3] **Кобяков И.Б., Малютин Д.В., Сперанский А.А.** Векторная виброметрия – технология XXI века // Датчики и системы. 2006. № 1. С. 2–8.
- [4] **Дубов А.А, Демин Е.А, Миляев А.И., Стеклов О.А.** Контроль за напряженно-деформированным состоянием газопроводов с использованием различных методов // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 2. С. 9–13.
- [5] **Малютин Д.В., Кобяков И.Б., Сперанский А.А.** Векторная виброметрия – инструмент техногенной безопасности // Нефтегазопромысловый инж.-нг. 2005. № 3. С. 10–15.
- [6] **Мормуль Р.В., Павлов Д.А., Сальников А.Ф.** Вибродиагностика и структурный анализ исследования нелинейных динамических процессов роторных турбомашин с магнитным подвесом // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2019. Т. 1. С. 96–99.
- [7] Патент № 2229136 С1 Российская Федерация, МПК G01P 15/09, G01P 15/18. Трехкомпонентный пьезоэлектрический виброакселерометр с одним чувствительным элементом : № 2002132201/28 : заявл. 29.11.2002 : опубл. 20.05.2004 / И.Б. Кобяков.

[8] **Пановко Я.Г.** Основы прикладной теории колебаний и удара: изд. 3-е, доп. и переработ. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. 320 с.

[9] **Подуvalьцев В.В., Хлыстунов М.С., Могилко Ж.Г.** Проблемы безопасности и нормативное обеспечение контроля векторных динамических параметров объектов техносферы // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2. № 6. С. 33–37.

[10] COMSOL Multiphysics v 5.5 Reference manual. [Эл. ресурс] [https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL\\_ReferenceManual.pdf](https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf) дата обращения 30.05.2020 г. Comsol Inc., 2019. — 1742 с.

[11] **Петров К.В., Башарова А.Ф., Пушина Г.Л., Недзвецкая Е.В.** Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в COMSOL Multiphysics // Приборостроение в XXI веке. 2016. Интеграция науки, образования и производства: Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции, Ижевск, 23–25 ноября 2016 года. — Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2017. С. 284–291.

[12] **Молоканов Б.М., Драчев К.А., Римлянд В.И.** Конечно-элементное моделирование распространения ультразвука в COMSOL Multiphysics // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: Материалы XVI региональной научной конференции, Хабаровск, 01–04 сентября 2018 года / Под редакцией А.И. Мазура. — Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2018. — С. 137–140.

[13] **Смоленцев Н.К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB: Издание 5-е, дополненное и переработанное. Москва : Общество с ограниченной ответственностью "ДМК пресс. Электронные книги", 2019. 560 с.

[14] **Субботин С.В., Большаков Д.Ю.** Выбор вида вейвлет — функции в дискретном вейвлет — преобразовании при фильтрации сложного сигнала на фоне белого шума // Радиопромышленность. 2006. № 1. С. 93–100.

[15] **Закиричная М.М., Корнишин Д.В., Камалов Ф.Ф.** Вейвлет-анализ и определение фрактальной размерности вейвлет-преобразования вибросигналов // Остаточный ресурс нефтезаводского оборудования: Материалы Международной научно-технической конференции, Уфа, 25–26 апреля 2014 года. — Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2014. — С. 19–20.

[16] **Mallat S.** A theory for multiresolutional signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, N7, p. 674–693.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВАТУЛИН Ян Семенович** — доцент, *Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, канд. техн. наук.*

E-mail: yan-roos@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6271-0399>

**БАТАЕВ Андрей Сергеевич** — доцент, *Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, канд. техн. наук.*

E-mail: avataev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9285-709X>

**ВЕЛИКАНОВ Владимир Михайлович** — начальник отдела, *ФГУП Петербургский Метрополитен, без степени.*

E-mail: velikanov@metro.spb.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1561-6479>

**КИМ Константин Константинович** — *заведующий кафедрой, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, д-р техн. наук.*

E-mail: kimkk@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-4429>

**СОЧАВА Марианна Валерьевна** — *доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.*

E-mail: mvsochava@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6871-2774>

**КОЗЛОВ Максим Николаевич** — *старший преподаватель, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, без степени.*

E-mail: maxx511@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1350-8714>

## REFERENCES

- [1] **G.V. Yeganyan**, Passivnaya vibrodiagnostika mostovykh sooruzheniy [Passive vibration diagnostics of bridge structures] // *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli : Materialy konferentsii*, Moskva, 18 marta 2021 goda. — Moskva: Moskovskiy avtomobilno-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet (MADI), 2021. S. 52–54.
- [2] **A.I. Korobov, M.Yu. Izosimova, M.I. Odina**, Diagnostika metallicheskih plastin s ostatochnymi napryazheniyami i defektami metodami nelineynoy lazernoy skaniruyushchey vibrometrii [Diagnostics of metal plates with residual stresses and defects by methods of nonlinear laser scanning vibrometry] // *Akusticheskiy zhurnal*. 2015. T. 61. № 3. S. 317.
- [3] **I.B. Kobyakov, D.V. Malyutin, A.A. Speranskiy**, Vektornaya vibrometriya — tekhnologiya XXI veka [Vector vibrometry — technology of the XXI century] // *Datchiki i sistemy*. 2006. № 1. S. 2–8.
- [4] **A.A. Dubov, Ye.A. Demin, A.I. Milyayev, O.A. Steklov**, Kontrol za napryazhenno-deformirovannym sostoyaniyem gazoprovodov s ispolzovaniyem razlichnykh metodov [Monitoring of the stress-strain state of gas pipelines using various methods] // *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2002. № 2. S. 9–13.
- [5] **D.V. Malyutin, I.B. Kobyakov, A.A. Speranskiy**, Vektornaya vibrometriya — instrument tekhnogennoy bezopasnosti [Vector vibrometry — a tool of technogenic safety] // *Neftegazopromyslovyy inzh-ng*. 2005. № 3. S. 10–15.
- [6] **R.V. Mormul, D.A. Pavlov, A.F. Salnikov**, Vibrodiagnostika i strukturnyy analiz issledovaniya nelineynykh dinamicheskikh protsessov rotornykh turbomashin s magnitnym podvesom [Vibration diagnostics and structural analysis studies of nonlinear dynamic processes of rotary turbomachines with magnetic suspension] // *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*. 2019. T. 1. S. 96–99.
- [7] Patent № 2229136 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G01P 15/09, G01P 15/18. Trekhkomponentnyy pyezoelektricheskiy vibroakselerometr s odnim chuvstvitelnym elementom [Three-component piezoelectric vibration accelerometer with single sensitive element] : № 2002132201/28 : zayavl. 29.11.2002 : opubl. 20.05.2004 / I. B. Kobyakov
- [8] Ya.G. Panovko, *Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara* [Fundamentals of the applied theory of vibrations and impact]: izd. 3-ye, dop. i pererabot. L.: Mashinostroyeniye (Leningr. otd-niye), 1976. 320 s.
- [9] **V.V. Poduvaltsev, M.S. Khlystunov, Zh.G. Mogilyuk**, Problemy bezopasnosti i normativnoye obespecheniye kontrolya vektornykh dinamicheskikh parametrov obyektov tekhnosfery [Safety problems and regulatory support for the control of vector dynamic parameters of technosphere objects] // *Bezopasnost v tekhnosfere*. 2013. T. 2. № 6. S. 33–37.

[10] COMSOL Multiphysics v 5.5 Reference manual. [El. resurs] [https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL\\_ReferenceManual.pdf](https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf) data obrashcheniya 30.05.2020 g. Comsol Inc., 2019. — 1742 c.

[11] **K.V. Petrov, A.F. Basharova, G.L. Pushina, Ye.V. Nedzvetskaya**, Modelirovaniye rasprostraneniya akusticheskikh voln v tsilindricheskikh obyektakh s defektami v COMSOL Multiphysics [Modeling of acoustic wave propagation in cylindrical objects with defects in COMSOL Multiphysics] // *Priborostroyeniye v XXI veke*. 2016. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva : Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Izhevsk, 23–25 noyabrya 2016 goda. — Izhevsk: Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. M.T. Kalashnikova, 2017. S. 284–291.

[12] **B.M. Molokanov, K.A. Drachev, V.I. Rimlyand**, Konechno-elementnoye modelirovaniye rasprostraneniya ultrazvuka v COMSOL Multiphysics [Finite element modeling of ultrasound propagation in COMSOL Multiphysics] // *Fizika: fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya, obrazovaniye: Materialy XVI regionalnoy nauchnoy konferentsii, Khabarovsk, 01–04 sentyabrya 2018 goda / Pod redaktsiyey A.I. Mazura*. — Khabarovsk: Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet, 2018. — S. 137–140.

[13] **N.K. Smolentsev**, Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB [Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in MATLAB]: Izdaniye 5-ye, dopolnennoye i pererabotannoye. Moskva: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu "DMK press. Elektronnyye knigi", 2019. 560 s.

[14] **S.V. Subbotin, D.Yu. Bolshakov**, Vybor vida veyvlet – funktsii v diskretnom veyvlet – preobrazovanii pri filtratsii slozhnogo signala na fone belogo shuma [Choosing the type of the wavelet function in a discrete wavelet transform when filtering a complex signal against a background of white noise] // *Radiopromyshlennost*. 2006. № 1. S. 93–100.

[15] **M.M. Zakirnichnaya, D.V. Kornishin, F.F. Kamalov**, Veyvlet-analiz i opredeleniye fraktalnoy razmernosti veyvlet-preobrazovaniya vibrosignalov [Wavelet analysis and determination of the fractal dimension of the wavelet transform of vibration signals] // *Ostatochnyy resurs neftezavodskogo oborudovaniya: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Ufa, 25–26 aprelya 2014 goda*. — Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskii universitet, 2014. — S. 19–20.

[16] **S. Mallat**, A theory for multiresolutional signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, N7, p. 674–693.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Yan S. VATULIN** – *Petersburg State Transport University*.

E-mail: yan-roos@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6271-0399>

**Andrew S. VATAEV** – *Petersburg State Transport University*.

E-mail: avataev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9285-709X>

**Vladimir M. VELIKANOV** – *St. Petersburg State Unitary Enterprise "St. Petersburg Metro"*.

E-mail: velikanov@metro.spb.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1561-6479>

**Konstantin K. KIM** – *Petersburg State Transport University*.

E-mail: kimkk@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-4429>



**Marianna V. SOCHAVA** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: mvsochava@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6871-2774>

**Maxim N. KOZLOV** – *Petersburg State Transport University.*

E-mail: maxx511@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1350-8714>

**Поступила: 23.04.2021; Одобрена: 01.06.2022; Принята: 01.06.2022.**

**Submitted: 23.04.2021; Approved: 01.06.2022; Accepted: 01.06.2022.**