

УДК 625.46

**Н. В. Романовская**

Петербургский государственный университет путей сообщения

**ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ТРАМВАЙНЫХ ПУТЕЙ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Непрерывный процесс разрушения трамвайных путей происходит от воздействия внешних факторов. Одним из таких опасных воздействий является вибрация, которая влияет не только на пути, но и на близлежащие территории. Для решения данной проблемы в конструкцию трамвайных путей включаются упругие прирельсовые вкладыши. Для определения оптимальных параметров данных вкладышей разработана математическая модель, которая максимально приближена к реальному объекту. В ней определены геометрические параметры и граничные условия. В математической модели заданы статические и динамические нагрузки, действующие на путь. В программном комплексе Autodesk Robot, использующем для расчетов метод конечных элементов (МКЭ), задается функция удара, выбирается метод расчета колебаний элементов модели во времени и анализируется степень демпфирования упругих материалов и напряжений, возникающих в них.

упругие профили, трамвайный рельс, конструкция трамвайных путей, статическое воздействие, динамическое воздействие, деформация, напряжение.

**Введение**

Известно, что при эксплуатации трамвайных путей под влиянием эксплуатационных и различных внешних воздействий происходит непрерывный процесс их разрушения. Такие воздействия производят: подвижной состав (по трем перпендикулярным направлениям); природно-климатические факторы (температура, атмосферные осадки и др.); собственные напряжения, возникающие в верхнем строении пути, главным образом в рельсах при изготовлении, укладке и эксплуатации; кроме того, происходит разрушение основания и балластного слоя пути вследствие влияния техногенных либо антропогенных факторов и др.

Одним из опасных факторов является вибрация. Высокий уровень вибрации снижает срок службы рельсовых плетей, а также подпрессоренных частей составов, разрушает балластный слой, колесные пары, увеличивает шумовое воздействие от проходящих составов, что негативно влияет на близлежащие жилые территории и людей, находящихся рядом с проходящим составом и проезжаю-

щих в нем. Нежелательные вибрации приводят к постепенному разрушению близлежащих домов и объектов инфраструктуры (например, если путь находится на совмещенном с автомобильной дорогой полотне).

Одним из основных решений по снижению уровня вибрационных воздействий является применение упругих эластичных элементов, например упругих прокладок под рельс и прирельсовых профилей. Применение таких прокладок не только снижает вибрацию, но и сокращает эксплуатационные расходы, увеличивает срок службы трамвайного пути и повышает уровень фиксации рельсов трамвайных путей.

**1 Математическая модель****1.1 Геометрия модели**

Для решения проблем вибрации рельсовых путей разработана математическая модель, которая максимально приближена к реальному объекту.

Модель представляет собой прямоугольный параллелепипед с шириной  $B = 2,28$  м,

глубиной от головки рельса  $H = 4,7$  м, длиной вдоль рельса  $L = 10$  м. Размеры модели определены конструкцией верхнего строения трамвайного пути, размерами тележки вагона и геологическими характеристиками подстилающих грунтов.

## 1.2 Граничные условия

В модели каждый элемент имеет границы. На границах модели устанавливаются условия взаимодействия элемента с окружающей средой, с другими элементами модели или естественная граница элемента, а также граничные условия, разрешающие или препятствующие смещению и/или повороту относительно трех осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

В связи с тем, что модель «вырезана» из протяженного трамвайного пути, учет ее взаимодействия с элементами, не включенными в модель, осуществляется постановкой опор. На вертикальных границах модели для горизонтального направления по осям  $X$ ,  $Y$  устанавливаются опоры, запрещающие перемещение точек границ модели отдельно по этим направлениям.

Для железобетонной плиты, свободный конец которой (по оси  $X$ ) совпадает с границей модели, также устанавливаются опоры, препятствующие смещению ее границы по оси  $X$ . Это связано с тем, что действующие горизонтальные силы относительно невели-

ки, а по нижней поверхности плиты включаются силы трения, препятствующие ее смещению, и что в процессе реальной эксплуатации трамвайных путей не было отмечено горизонтальных смещений. На нижней границе модели устанавливаются опоры, препятствующие вертикальному смещению ее границы по оси  $Z$  (рис. 1). Все материалы внутри границ работают в упругой стадии.

## 2 Статические нагрузки и динамические воздействия

В модели приняты статические нагрузки и динамические воздействия. К статическим нагрузкам относятся: собственный вес сооружения, вес трамвая, приходящийся на одно колесо. К динамическим воздействиям относятся: собственные колебания сооружения, удар колеса.

Рассмотрим, из чего складывается собственный вес. С учетом относительно небольшого давления на грунты небольшие деформации, вызываемые движением трамвая, щебеночный слой и слои грунта приняты упругодеформируемыми. В модели они представлены упругими объемными телами.

Собственный вес слоев грунта довольно больших значений обуславливает существенные вертикальные смещения точек

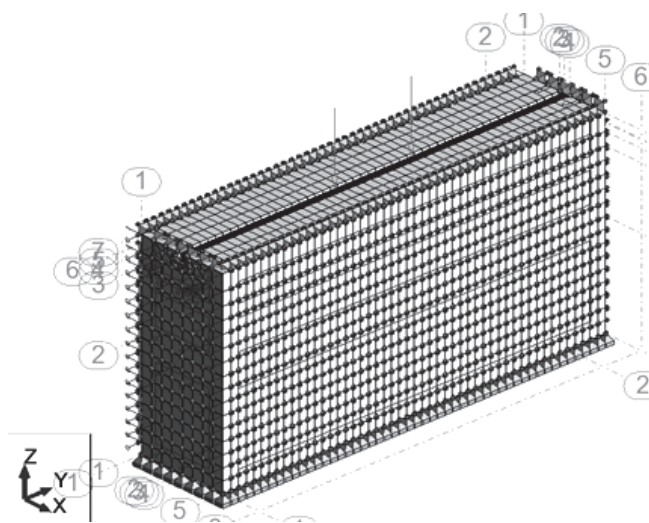


Рис. 1. Граничные условия модели

модели. В реальной обстановке нового строительства или реконструкции трамвайных путей смещения от собственного веса давно прошли и не оказывают влияния на верхнее строение пути. Поэтому собственный вес грунтов не учитывается при сохранении в модели их прочностных и деформативных характеристик. Таким образом, в собственный вес входят: щебень, который при строительстве укладывается вместо убранного для него грунта либо замещает при реконструкции старый щебень, а также железобетонная плита, демпфирующие материалы, рельс.

Вес трамвая, приходящийся на одно колесо, определяем следующим образом:

$F = 8,5$  – максимальная вертикальная нагрузка на ось, т;  $0,5 \cdot F \cdot K_d = 5,95$  – нагрузка на одно колесо, т;  $H = 0,6$  – максимальная горизонтальная нагрузка на колесо, т;  $H \cdot K_d = 0,84$  – горизонтальная нагрузка с коэффициентом динамичности, т;  $K_d = 1 + 18 / (30 + l_{am}) = 1,4$  – динамический коэффициент;  $l_{am} = 15$  – участок загрузки, м.

Рассмотрим динамические воздействия. К ним относятся собственные колебания сооружения. Модальный расчет сооружения необходим для динамического расчета колебаний и учета распределения массы модели по трем направлениям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис. 2).

Сила удара колеса по рельсу в данной задаче рассчитывалась следующим образом:

$R_k = 0,31$  – радиус колеса, м;  
 $M = 600$  – масса колесной пары с учетом необрессоренных частей тележки, кг;  
 $0,5 \cdot M = 300$  – масса колесной пары на одно колесо, кг;  
 $S = 1,94$  – расстояние между колесными парами, м;  
 $t = 0,001$  – время удара, с;  
 $L_n = 0,02$  – величина неровности рельса, м;  
 $V = 20$  – скорость трамвая, км/ч;  $5,556$  – скорость трамвая, м/с;  
 $V_{уд} = A_{lf} \cdot V = 0,361$  – вертикальная скорость удара, м/с;  
 $A_{lf} = L_n / R_k = 0,065$  – центральный угол неровности, рад;  
 $J(t) = 0,5 \cdot M \cdot A_{lf} \cdot V = 108,342$  – ударный импульс, кг·м/с;  
 $P = J(t) / t = 108342$  – сила удара, Н;  
 $10,8342$  – сила удара, тс;  
 $T = S / V = 0,097$  – время удара второго колеса тележки, с.

В программный комплекс Autodesk Robot введена подобранная функция удара и выбран метод расчета колебаний элементов модели во времени. Функция удара приведена на рисунке 3.

На рисунке 4 показано расположение характерных точек в математической модели, для которых производятся расчеты.

В результате расчетов мы получаем следующие графики колебаний (рис. 5) и напряжений (рис. 6) характерных точек в за-

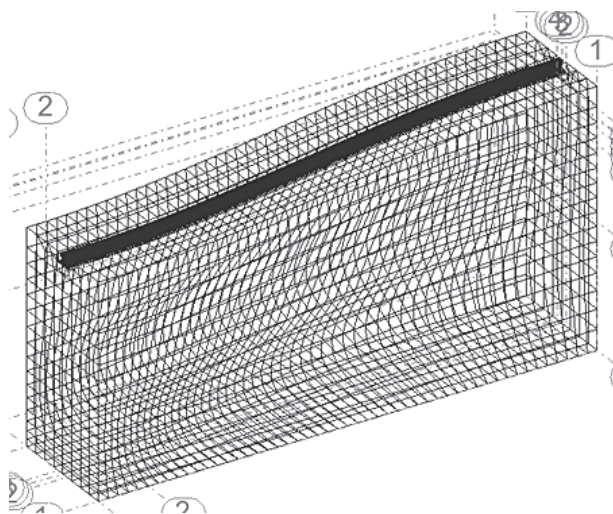


Рис. 2. Собственные колебания по 3-й форме из 15

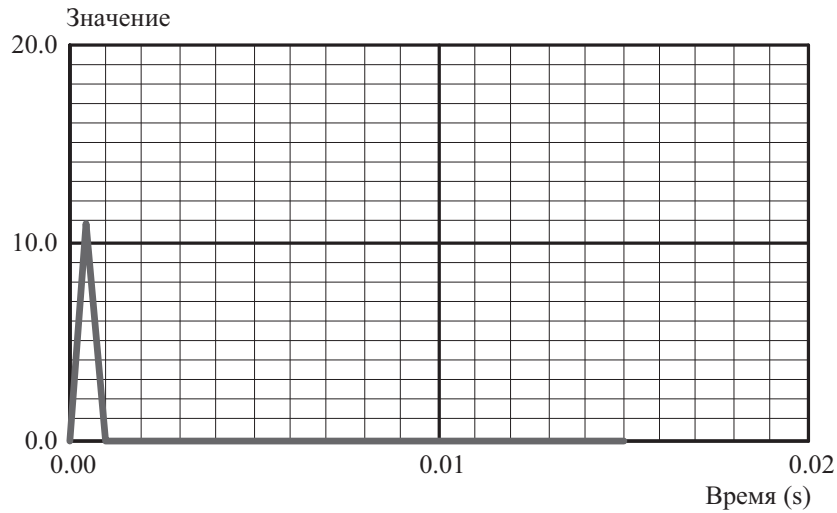


Рис. 3. Функция удара

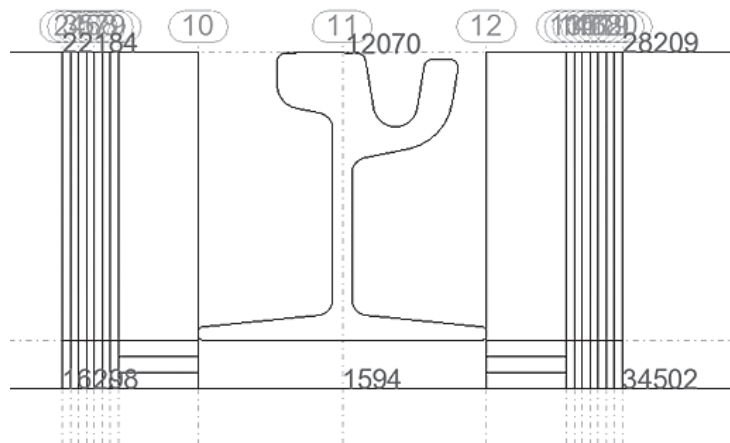


Рис. 4. Расположение характерных точек в математической модели

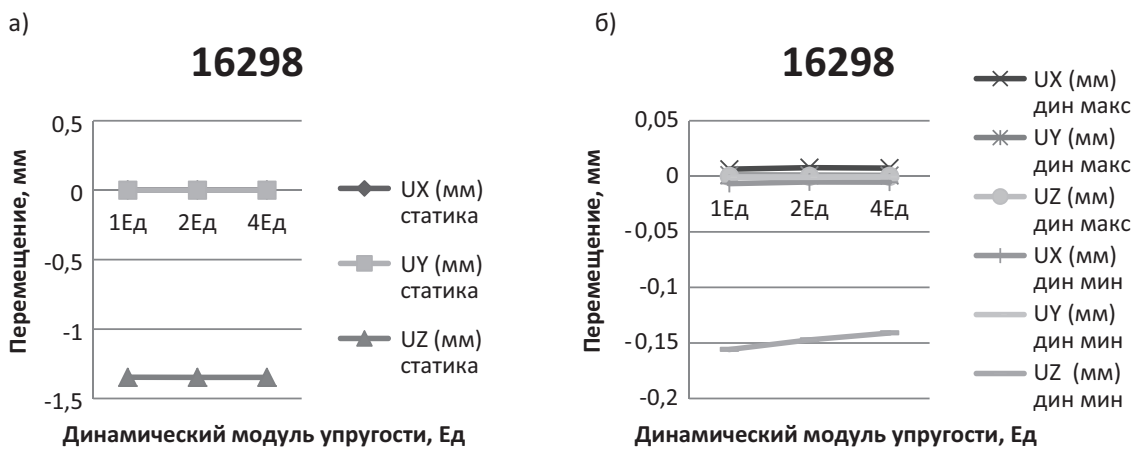


Рис. 5. Колебание точки при статическом (а) и динамическом (б) воздействии

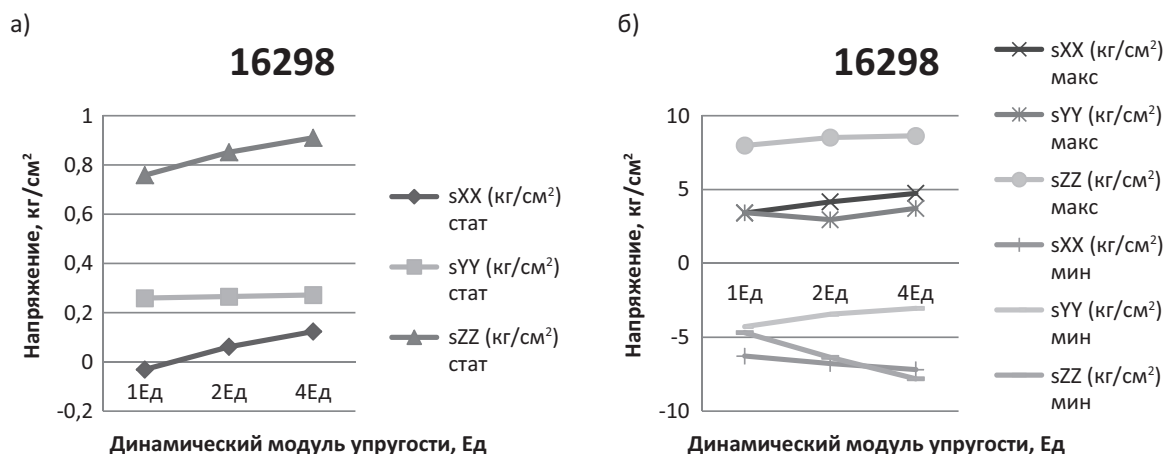


Рис. 6. Напряжение точки при статическом (а) и динамическом (б) воздействии

висимости от модуля динамической упругости.

На данных графиках: 1Ед – минимальное значение; 2Ед – минимальное значение, умноженное на 2; 4Ед – минимальное значение, умноженное на 4 в заданном диапазоне значений модуля динамической упругости (Ед).

## Заключение

В математической модели варьируемым параметром является модуль динамической упругости. Анализируя полученные в результате произведенных расчетов данные, можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением модуля динамической упругости Ед уровень колебаний всех точек (рельса и точек бетона) снижается.

2. С увеличением модуля динамической упругости Ед уровень напряжений всех точек (рельса и точек бетона) растет.

3. Необходимо продолжить исследования с изменением скорости движения трамвая.

По результатам данных исследований можно дать следующие рекомендации: необходимо повышать модуль динамической упругости Ед до такого предела, чтобы снизить уровень колебаний, но при этом не довести бетон до предельного состояния. Анализируя полученные данные, можно реко-

мендовать принимать модуль динамической упругости 2Ед, при котором колебания точек уменьшаются, а напряжения значительно не увеличиваются.

## Библиографический список

1. **Информационные материалы** по применению современных конструкций верхнего строения трамвайных путей / Отчет о НИР ПГУПС ; рук. Е. П. Дудкин ; исполн. Ю. Г. Параскевопуло и др.]. – СПб. : ПГУПС, 2006. – 87 с.
2. **Параметрическое** моделирование строительных конструкций : учеб. пособие / В. В. Свитин. – СПб. : ПГУПС, 2011. – 47 с.
3. **Разработка** моделей конструкций и сооружений : учеб. пособие / В. В. Свитин. – СПб. : ПГУПС, 2009. – 85 с.
4. **Защита** от повышенного шума и вибрации : сб. докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 26–28 марта 2013 г., СПб. / ред. Н. И. Иванов. – СПб. : БГТУ «Военмех», 2013. – 743 с.
5. **Альбом** «Дорожные конструкции для Ленинграда». А-385–88. – СПб. : Ленгипроинжпроект, 1990. – 82 с.
6. **Альбом** типовых конструкций трамвайных путей, применяемых в Санкт-Петербурге (классификация конструкций). – СПб. : Генеральная строительная корпорация, 2000. – 63 с.

7. **ГОСТ Р ИСО 14837-1–2007.** Шум и вибрация, создаваемые движением рельсового транспорта. Введен с 01.10.2008. – Нижний Новгород : ОАО НИЦ КД, 2012. – 39 с.

8. **СП 98.13330.2012.** Свод правил. Трамвайные и троллейбусные линии. Актуализированная редакция СНиП 2.05.09.90. Введен с 01.01.2013. – М., 2012. – 78 с.

9. **ТУ 2539-001-03222089–2011.** Профили резиновые подошвенные под рельс трамвайных

путей. Введены 29.03.2012. – СПб. : СПб ГУП «Горэлектротранс». – 13 с.

10. **ТУ 2539-002-03222089–2011.** Профили резиновые боковые для рельсов трамвайных путей. Введены 29.03.2012. – СПб. : СПб ГУП «Горэлектротранс». – 13 с.

11. **Расчет** верхнего строения трамвайного пути с установкой упругих элементов / Н. В. Романовская. – СПб. : Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – Вып. 2. – С. 162–168.

УДК 532.685

**Л. Б. Сватовская, А. М. Сычева, М. Хаммади, Т. И. Бойкова**  
Петербургский государственный университет путей сообщения

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КАПИЛЛЯРНОГО ПОДСОСА НАНОРАСТВОРОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ГЕОЭКОЗАЩИТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ТРАНСПОРТА**

Рассматриваются возможности повышения уровня свойств изделий на основе цемента методом капиллярного подсоса коллоидного раствора, содержащего кремнезоль. Показаны достигнутые результаты для пенобетонных изделий средних плотностей D400...D600. Рассмотрены представления об использовании наночастиц другой природы.

капиллярный подсос, прочность, теплопроводность, энтропия, энтальпия, наночастицы.

### **Введение**

Основная идея работы состоит в использовании для повышения уровня свойств изделий на цементной основе такого самопроизвольного явления, как капиллярный подсос жидкости [1]. Полагалось, что жидкость может быть коллоидным раствором, содержащим кремнезоль или золь любой другой природы, частицы которого способны участвовать в химических процессах с составляющими затвердевшего камня, обеспечивая в итоге энергосбережение и повышение механофизических свойств; полагалось также, что капиллярный подсос может быть применен с последовательным использованием разных жидкостей (ступенчатый

процесс), что обеспечивает определенные химические процессы.

Цементный камень является пористым телом, имеющим в соответствии с [2] определенное распределение пор по размерам (табл. 1), поэтому явления, связанные с капиллярным подсосом, могут быть использованы в технологии получения материалов на цементной матрице. В таком случае явления капиллярного подсоса как самопроизвольного процесса будут использоваться для развития геоэкозащитных строительных технологий повышения эксплуатационных свойств пенобетонов.

Геоэкозащитными эти технологии являются потому, что предполагается рост прочности без дополнительных материальных затрат