

даже в тех, когда заведомо известно, что требуемые капитальные вложения для наращивания мощности станционных устройств в нужные сроки выделены не будут. Наличие оптимальной траектории развития станции позволяет иметь ориентир, к которому следует стремиться при планировании капитальных вложений на перспективу и который даёт возможность избежать неверных решений.

### Библиографический список

1. **Выбор** оптимальной этапности развития железнодорожных станций и узлов: учеб. пособие / Ю. И. Ефименко. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1989. – 60 с.

2. **Динамическое** программирование / Р. Беллман ; пер. с англ. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1960. – 400 с.

УДК. 625.041.1

**А. Ф. Колос, Д. В. Крюковский**

Петербургский государственный университет путей сообщения

## УСТАНОВЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА, СЛОЖЕННОГО ТОРФОМ, С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Рассматриваются вопросы оценки несущей способности основания земляного полотна железных дорог с учетом действия вибродинамической нагрузки, вызванной движением поезда. Задача установления несущей способности решается с использованием модели идеально связного грунта на базе теории предельного равновесия.

несущая способность, основание земляного полотна, вибродинамическая нагрузка, модель, идеально связный грунт, теория предельного равновесия, сопротивление сдвигу, сцепление, угол внутреннего трения.

### Введение

Железнодорожное сообщение в нашей стране было и остается важнейшей и самой крупной составляющей транспортной системы. В перспективе железнодорожный транспорт будет оставаться основным видом сообщения, обеспечивающим массовые грузовые и пассажирские перевозки.

Стратегия развития железнодорожного сообщения в Российской Федерации до 2030 г. предусматривает в ближайшем буду-

щем увеличение грузооборота. Возникает острая необходимость повышения провозной и пропускной способности железных дорог. Решать эту проблему нужно как за счет интенсификации работы существующей железнодорожной сети, так и строительства новых железных дорог. На сегодняшний день активными темпами на отдельных направлениях и участках осуществляется повышение скоростей движения как пассажир-

ских, так и грузовых поездов, планируется увеличение веса поездов за счет увеличения длины составов.

Реализация планируемых мероприятий неминуемо приведет к значительному увеличению степени вибродинамического воздействия на железнодорожный путь, включая земляное полотно и его основание [4, 6]. Данный факт негативным образом скажется, в первую очередь, на работе земляного полотна, отсыпанного в районах с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, в частности в зонах с залеганием слабых торфяных грунтов [2].

Опыт строительства, эксплуатации и специальные наблюдения за работой земляного полотна, опирающегося на торфяные грунты, убедительно показали, что с возрастанием скоростей движения, даже при неизменных осевых нагрузках, происходит увеличение «больных» мест, появляются просадки пути на тех участках, где их раньше не было, в отдельных случаях зарегистрированы значительные деформации пути, требующие закрытия движения. Отмеченные дефекты в большинстве случаев являются следствием негативного влияния вибродинамического воздействия от проходящих поездов на земляное полотно и торфяное основание железной дороги [2].

Таким образом, существует объективная необходимость комплексного решения задачи количественной оценки несущей способности основания земляного полотна, сложенного торфяными грунтами, с учетом действия динамических нагрузок от проходящих поездов.

Решение задачи по установлению несущей способности торфяного основания принципиально возможно на базе теории предельного равновесия грунта. Согласно этой теории, предельное состояние грунтов, слагающих основание насыпи, характеризуется тем, что в любой точке на поверхности скольжения касательные напряжения равны предельному сопротивлению грунта сдвигу. Такое состояние определяет условие предельного равновесия грунта, которое

при действии статической и вибродинамической нагрузок соответствует теории прочности Мора, а инженерные расчеты можно производить на основе зависимости Кулона:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi + C, \quad (1)$$

где  $\tau$  – величина касательных напряжений, возникающих в грунте;  $\sigma$  – величина нормальных напряжений, возникающих в грунте;  $C$ ,  $\varphi$  – сцепление и угол внутреннего трения грунта.

Как известно, определение прочностных характеристик торфа достаточно трудоемкая задача. Существующие экспериментальные методы определения прочности торфяных грунтов нередко дают весьма условные и несогласующиеся между собой результаты [3]. Наиболее близкие к реальным значениям дают результаты трехосных испытаний торфяных грунтов в вибростабилометрах. Однако проведение таких экспериментов не всегда технически возможно. Кроме того, отбор монолитов торфа требует наличия специального оборудования и проведения геологических работ непосредственно на железнодорожной насыпи с нарушением ее целостности, что сопряжено с определенным риском.

В такой ситуации ряд преимуществ, с практической точки зрения, дает решение задачи о несущей способности основания земляного полотна, сложенного идеально связным грунтом [1]. Такое решение применимо в тех случаях, когда величина угла внутреннего трения грунта не превышает  $15^\circ$ , а величина их прочности определяется главным образом величиной сцепления. Торф относится именно к такой категории грунтов. В этом случае закон Кулона принимает следующий вид:

$$\tau = C_p, \quad (2)$$

где  $C_p$  – величина расчетного сцепления торфяного грунта.

Такой подход к решению задачи установления несущей способности основания

земляного полотна, сложенного торфяными грунтами, позволяет получить решение на основе данных полевых экспериментов по определению сопротивления торфа сдвигу методом вращательного среза с помощью четырехлопостной крыльчатки.

Величину  $C_p$  также можно вычислить в случае, когда известны  $C$  и  $\varphi$  торфа, величина расчетного сцепления  $C_p$  в этом случае определяется следующей зависимостью:

$$C_p = C \frac{\operatorname{ctg}\varphi}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \pi/2}. \quad (3)$$

Формула (3) для определения величины расчетного сцепления  $C_p$  получена на основании сравнения формул для определения давления на некоторой глубине  $x$ , при котором начинается развитие областей предельного состояния в случаях идеально связной среды (4), и среды, характеризующейся как сцеплением, так и внутренним трением (5).

Формула для определения давления  $p_x$  на глубине  $x$ , при котором начинается развитие областей предельного состояния, для модели идеально-связного грунта следующая:

$$p_x = \pi \cdot C_p - \pi \cdot \gamma (x + h) + \gamma \cdot h \cdot \cos\varphi. \quad (4)$$

Формула для определения давления  $p_x$  на глубине  $x$ , при котором начинается развитие областей предельного состояния, для модели, характеризующейся как сцеплением, так и внутренним трением:

$$p_x = \frac{\pi \cdot \gamma}{\operatorname{ctg}\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} \left( x + h + \frac{c}{\gamma} \operatorname{ctg}\varphi \right) + \gamma \cdot h. \quad (5)$$

Зависимость (3) справедлива в случае, если прочность рассматриваемого грунта в большей степени определяется величиной сцепления  $C$ , а величина угла внутреннего трения  $\varphi$  незначительна и составляет не более  $15^\circ$ .

Использование формулы (3) на основе модели идеально связного грунта позволяет получить универсальное решение задачи

установления несущей способности основания земляного полотна, сложенного торфом. При наличии данных полевых исследований торфяной залежи (результаты, полученные с помощью четырехлопостной крыльчатки) в качестве основной характеристики прочности торфа следует принимать величину сопротивления торфа сдвигу, а при наличии результатов лабораторных экспериментов производить оценку несущей способности следует на основании величины расчетного сцепления  $C_p$ , получаемого по формуле (3) при известных значениях величины удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$ .

Расчетная схема к решению задачи показана на рис. 1.

Задача определения количественной оценки несущей способности основания земляного полотна, с учетом действия динамических нагрузок, сводится к решению системы дифференциальных уравнений движения и выполнению условия предельного напряженного состояния [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = Z + \rho \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = Y + \rho \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \\ \sigma_1 - \sigma_2 = 2C_{p, \text{дн}} \end{cases} \quad (6)$$

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$  – составляющие нормальных напряжений, соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, т/м<sup>2</sup>;  $\tau_{zy}$ ,  $\tau_{yz}$  – составляющие касательных напряжений, т/м<sup>2</sup>;  $U$ ,  $V$  – перемещения при колебаниях в направлении осей  $Z$  и  $Y$ ;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – максимальное и минимальное главные напряжения;  $Z$  и  $Y$  – объемные силы, при направлении оси  $z$  вертикально вниз,  $Z = \gamma$ ,  $Y = 0$ ;  $\gamma$  – объемный вес грунта, т/м<sup>3</sup>;  $C_{p, \text{дн}}$  – расчетное сцепление торфяного грунта, воспринимающего вибродинамическую нагрузку.

Для решения система уравнений (6) преобразуется за счет введения новых неизвестных: величины  $\delta$ , численно равной углу наклона большего главного напряжения  $\sigma_1$  к оси  $y$  (рис. 2); величины напряжения  $\sigma_1$ ,

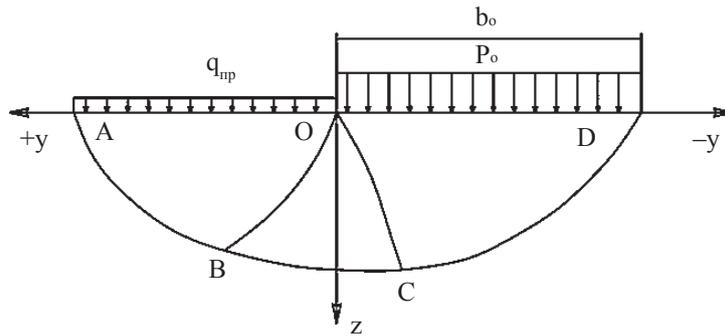


Рис. 1. Расчетная схема решения задачи о несущей способности идеально связного грунта

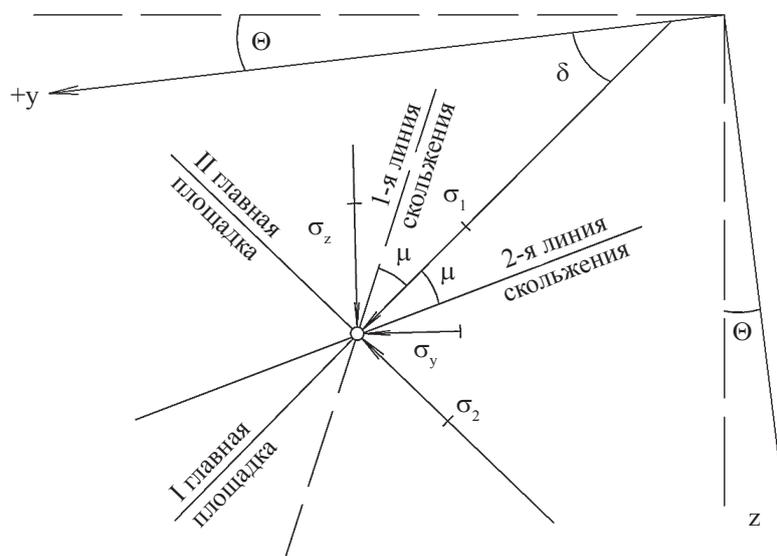


Рис. 2. Взаимосвязь линий скольжения и главных площадок с действующими напряжениями

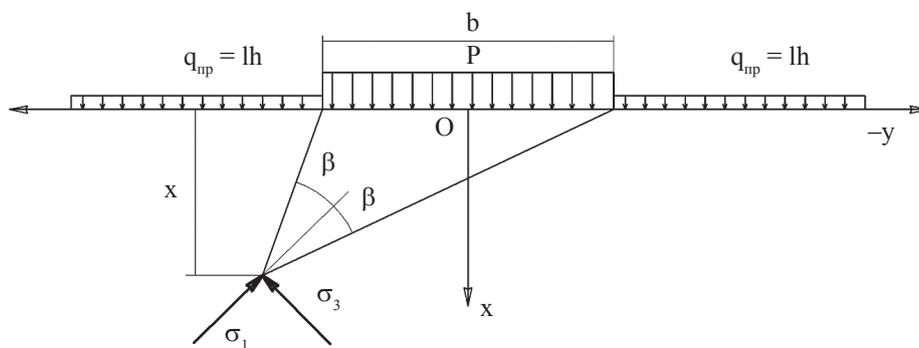


Рис. 3. Схема определения напряжений в грунте при действии равномерно распределенной нагрузки  $P$

выражаемого через главные напряжения следующей формулой:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (7)$$

Дальнейшие преобразования сводятся к дифференцированию полученных выражений и подстановке в левую часть уравнений системы (6), при этом учитывается, что все компоненты уравнений зависят от координат  $z$  и  $y$ .

Уравнения характеристик и дифференциальные соотношения вдоль них имеют следующий вид:

$$dz = dy \cdot \operatorname{tg} \left( \delta \mp \frac{\pi}{4} \right); \quad (8)$$

$$d\sigma \mp 2C_{\text{дн}} d\delta = \gamma \cdot (\cos \theta dz + \sin \theta dy) + B_1 dz + D_1 dy, \quad (9)$$

где  $B_1 = 0,15 \cdot \gamma \cdot H - C_p \cdot K_\tau \cdot \Phi \cdot (n \cdot \cos 2\delta + \delta_1^0 \times \sin 2\delta)$ ;  $D_1 = 0,04 \cdot \gamma \cdot H - C_p \cdot K_\tau \cdot \Phi \cdot (n \cdot \sin 2\delta + \delta_1^0 \cdot \cos 2\delta)$ ;  $K_\tau$  – показатель относительного снижения сопротивления торфа сдвигу;  $\Phi = k \cdot A_0 \cdot e^{n \cdot z - \delta_1^0 \cdot y + 1,35\delta_1^0 - k \cdot A_0}$ ;  $\delta_1^0 = \delta_2^1 + \delta_2^2$ ;  $n = \ln \delta_1 + \ln |\delta_1| \cdot 0,667 \operatorname{tg} \alpha$ ;  $H = e^{n \cdot z - \delta_1^0 \cdot y + 1,35\delta_1^0}$ ;  $\delta_1$  – коэффициент затухания колебаний по глубине;  $\delta_2^1$ ;  $\delta_2^2$  – коэффициенты затухания колебаний в поперечном оси пути направлении.

Уравнения характеристик и дифференциальные соотношения вдоль них при совместном решении позволяют определить предельно допустимую величину напряжений. В выражениях (8), (9) дифференциалы заменяются соответствующими разностными отношениями, принадлежащими двум соседним точкам. Такой подход позволяет получить вместо дифференциальных уравнений четыре обычных линейных уравнения первого порядка, решение которых не вызывает особых трудностей [7].

После построения сетки линий скольжения и определения значений  $\delta$  и  $\sigma$  во всех узлах расчет закончен. Значения предельных горизонтальных, вертикальных и ка-

сательных напряжений в точках, лежащих на границе полуплоскости (отрезок  $OD$  на рис. 1), определяют несущую способность основания земляного полотна, сложенного торфом.

## Заключение

Многочисленные реализации задачи с учетом различных исходных данных в условиях расчетной схемы, представленной на рис. 3, позволили получить данные, для которых типичным случаем являются результаты, приведенные на рис. 4. Сетки линий скольжения построены на основе расчета с использованием прочностных характеристик торфяных грунтов, полученных во время испытаний при вибродинамических нагрузках. Абсолютные значения амплитуд колебаний, передающихся на основание земляного полотна, сложенного торфом, а также коэффициенты затухания колебаний установлены по результатам многочисленных экспериментов, проведенных на железнодорожной линии Санкт-Петербург – Приозерск Октябрьской железной дороги.

Расчеты позволили решить актуальную и не решенную до сегодняшнего времени задачу по определению несущей способности основания земляного полотна, сложенного торфяными грунтами, в условиях действия вибродинамических нагрузок.

Использование модели идеально связанного грунта позволяет снизить объем изыскательских работ при проектировании мероприятий по усилению заболоченных участков железнодорожных дорог.

Расчет несущей способности торфяного основания железнодорожных насыпей, воспринимающего динамические нагрузки от проходящих поездов, необходимо выполнять с учетом снижения прочностных характеристик и с введением в расчет сил инерции, затухающих в теле земляного полотна. В этом случае расчетная схема в наибольшей степени соответствует работе грунтов в реальных условиях функционирующей железнодорожной линии.

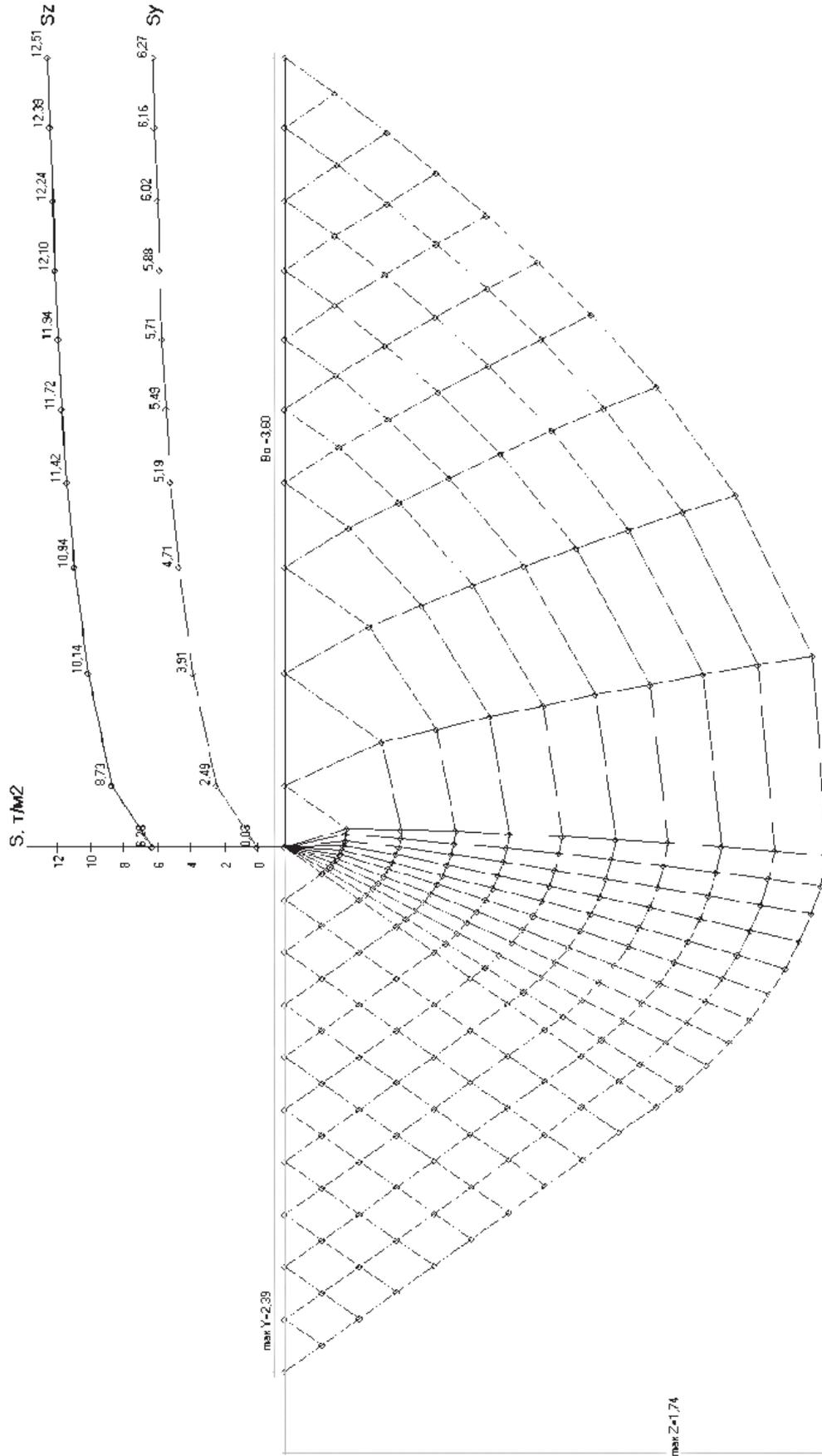


Рис. 4. Сетка линий скольжения задачи определения несущей способности основания земляного полотна, сложенного торфом

**Библиографический список**

1. **Расчет** оснований и сооружений / В. Г. Безрезанцев. – Ленинград : Изд-во литературы по строительству, 1970. – 212 с.

2. **Особенности** колебательного процесса грунтов насыпей, опирающихся на торфяное основание при движении поездов / А. Ф. Колос, Д. В. Крюковский // Известия ПГУПС. – 2013. – Вып. 2.

3. **Методика** определения коэффициента стабильности основания земляного полотна с учетом вибродинамической нагрузки / А. Ф. Колос, А. А. Сидоренко, В. С. Рыжов // Сб. науч. тр. Sworld по материалам Международной научно-практической конференции (Одесса, 2011). Т. 2. – 2011. – № 4. – С. 52–59.

4. **Расчет** несущей способности земляного полотна в особой точке с использованием интегрирования // Сб. науч. тр. Sworld по материалам Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения

в науке, транспорте, производстве и образовании – 2011». Т. 2 / Д. В. Крюковский, И. С. Козлов. – Одесса : Транспорт, 2011. – 100 с.

5. **Исследование** прочностных характеристик лессовых грунтов в условиях трехосного напряженного состояния при воздействии вибродинамических нагрузок / А. Ф. Колос, М. А. Абдукаримов // Известия ПГУПС. – 2011. – Вып. 3. – С. 176–182.

6. **Колебательный** процесс грунтов железнодорожного земляного полотна, возведенного из лессовых суглинков, при скоростном движении поездов в условиях республики Узбекистан / А. Ф. Колос, З. Э. Мирсалихов // Известия ПГУПС. – 2011. – Вып. 4. – С. 105–113.

7. **Чувствительность** щебеночного балласта к вибродинамическому воздействию / И. С. Козлов, Д. С. Николайтис // Сб. науч. тр. Sworld по материалам Международной научно-практической конференции (Одесса, 2011). Т. 2. – 2011. – № 4. – С. 23–24.

УДК 629.4.023

**В. А. Кручек, Х. Р. Косимов**

Петербургский государственный университет путей сообщения

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ТЕПЛОВОЗА UZTE16M**

Безопасная эксплуатация транспортного средства определяется остаточной прочностью деталей, узлов и конструкций. Статья посвящена моделированию и анализу напряженно-деформированного состояния рамы тепловоза и определению наибольших напряжений в сечениях рамы тепловоза типа *UzTE16M*.

подвижной состав, рама тепловоза, срок службы, несущие конструкции, прочность.

### **Введение**

Основной задачей железнодорожного транспорта любой страны является полное обеспечение перевозок народно-хозяйственных грузов и пассажиров. Повышение скоростей движения на железнодорожном транспорте, увеличение веса поездов и грузоподъемности ведут к росту динамических

воздействий на ходовую часть и диктуют повышенные требования к несущим конструкциям подвижного состава, в частности рамам тепловоза. Необходимость оценки остаточного ресурса несущих конструкций после выработки ими назначенного ресурса возникла в последние годы в связи с проведением на железнодорожном транспорте