

## Динамическая реакция в системе «дорожная конструкция – оползневой склон» от движения транспорта

*Л.Н. Панасюк, В.С.Тюрина, Н.А. Савельева, Ю.Ш. Чубка*

*Донской государственный технический университет*

**Аннотация:** Рассматривается задача о воздействии движущихся автомобилей на систему «дорожная конструкция – оползневой склон». Принята пространственная континуальная расчетная модель. Учитываются инерционные свойства транспортных средств и элементов системы «дорожная конструкция - оползневой склон».

**Ключевые слова:** динамическая модель, дорожная конструкция, оползневой склон, метод конечных элементов, нелинейная теория наследственности, температурно-влажностный фактор.

Оползневые процессы – одна из распространенных причин, приводящих к природным и техногенным катастрофам. Как правило, обрушение объектов из-за оползневых подвижек связано с ошибками, допущенными в процессе проведения изысканий и на стадии проектирования. Наиболее часто наблюдается разрушение объектов дорожной инфраструктуры. Также известны аварийные ситуации, обусловленные неправильными конструктивными решениями по усилению склонов котлованов под новыми объектами в условиях плотной застройки. Практика показывает, что в этом случае недостаточно учтены техногенные динамические воздействия (движущийся транспорт, работа строительных механизмов).

Действующие нормативные методики расчета дорожных одежд и оползневых склонов недостаточно учитывают упруго-вязко-пластические свойства материалов конструктивных слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна [1, 2]. Кроме того, механико-математическая постановка задачи имеет ряд критических упрощений, снижающих достоверность результатов.

В работе рассматривается более корректная механико-математическая модель системы «дорожная конструкция - оползневой склон», позволяющая учесть влияние динамической нагрузки от движущегося транспорта на

оползневой склон. Ее предлагается использовать при расчете и конструировании дорожных одежд в районах с оползневой активностью для определения накопления остаточных деформаций в элементах системы.

Проблема рассматривается в пространственной постановке и учитывает:

- инерционные свойства подвижного состава и системы «дорожная конструкция – оползневой склон»;

- переменную во времени (в течение года и суток) интенсивность грузопотока, различную скорость движения транспортных средств, а также возможность учета места расположения движущихся автомобилей на проезжей части;

- влияние переменных во времени температурно-влажностных факторов на механические свойства материалов конструктивных слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна [3];

Дискретизация пространственной области выполняется методом конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений. МКЭ позволяет рассматривать области со сложной топологией при разнообразных граничных условиях. Учитываются особенности строения дорожной конструкции как по глубине, так и по ширине проезжей части. Возможен учет подземных сооружений в толще земляного полотна насыпи (например, инженерных гидросооружений).

Проблема рассматривается в двух принципиально разных масштабах времени. Решается «быстрая» динамическая задача о движении отдельных транспортных средств с различной скоростью, вдоль разных дорожных полос, по конечному фрагменту автомобильной дороги. Здесь получаем множество «базовых» решений о динамическом воздействии отдельных транспортных средств. Полученный набор базовых решений далее

---

рассматривается как исходные данные для «медленной» по времени задачи накопления остаточных деформаций в слоях дорожной одежды.

Реализация динамической модели движения автомобилей по пространственной инерционной комбинированной системе «дорожная конструкция – оползневой склон» выполнена на основе полученных ранее явных абсолютно устойчивых схем прямого интегрирования уравнений движения. Динамическая постановка задачи, учитывающая переменную во времени движущуюся массу транспортных средств, сформулирована в виде системы (1). Инерционные свойства системы включают постоянное распределение масс (например, массы слоев дорожной конструкции)  $M$  и переменную во времени матрицу масс, связанную с перемещением подвижного транспортного состава ( $M_t$ ). При этом переменная матрица масс и связанный с нею переменный во времени вектор нагрузки в пределах малого шага интегрирования по времени линеаризованы в виде (2).

Явные абсолютно устойчивые схемы прямого интегрирования, реализующие решение системы (1), представлены в уравнениях (3) и (4).

$$\begin{cases} (M + M_t)q + Cq + Kq + M_t(q - q_t) = P_0 + P_t(t), \\ \text{при} \\ t = 0, q = q_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} q = q(t) - \text{вектор - функция узловых перемещений,} \\ P = P(t) - \text{вектор - функция внешней нагрузки,} \\ M = \sum M_i - \text{глобальная матрица масс ансамбля элементов,} \\ C = \sum C_i - \text{глобальная матрица демпфирования (вязкостисистемы),} \\ K = \sum K_i - \text{глобальная матрица жесткости ансамбля элементов} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P(\tau) \approx \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right) P_n + \frac{\tau}{\Delta t} P_{n+1}, \\ M_t(\tau) \approx \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right) M_n + \frac{\tau}{\Delta t} M_{n+1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D] q_{n+1} = \\ & [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D - \Delta t^2 K] q_n + \\ & + [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D - \Delta t C + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D - 0.5 \Delta t^2 K] s_n + \\ & 0.5 \Delta t^2 (P_n + P_{n+1}), \\ & s_{n+1} = -s_n + 2(q_{n+1} - q_n), s = q \Delta t, \lambda = \max \{ \text{eig}(K_D^{-1} K) \} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D] q_{n+1} = \\ & [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D + \Delta t^3 (C - C_D) R^{-1} K - \Delta t^2 K + 0.5 \Delta t^4 (K - \lambda K_D) R^{-1} K] q_n + \\ & + \left[ M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D - \Delta t C + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D - \Delta t C - 0.5 \Delta t^2 K + \right. \\ & \left. + \Delta t^3 (C - C_D) R^{-1} (\frac{1}{\Delta t} C + 0.5 K) + 0.5 \Delta t^4 (K - \lambda K_D) R^{-1} (\frac{1}{\Delta t} C + 0.5 K) \right] s_n + \\ & 0.5 \Delta t^2 (P_n + P_{n+1}), \\ & s_{n+1} = -s_n + 2(q_{n+1} - q_n), s = q \Delta t, \lambda = \max \{ \text{eig}(K_D^{-1} K) \} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

При построении (3-4) использован критерий абсолютной устойчивости схем прямого интегрирования Дж. Неймана.

В предыдущих вариантах математической модели прогнозирования накопления остаточных деформаций в элементах дорожных конструкций [4] использовалась теория нелинейной ползучести Шведова-Бингама. Тестирование реальных задач на основе этой гипотезы показало некоторое несовершенство модели. Во вновь разработанной механико-математической модели учет накопления остаточных деформаций выполняется на основе нелинейной теории наследственности Ю.Н. Работнова [5]. Гипотезу Работнова можно рассматривать как расширение линейной теории наследственности Вольтера [6, 7] для физически нелинейных задач механики.

Для описания процессов линейной теории наследственности в одномерном случае теории Вольтера используется уравнение (5) связи между деформациями и напряжениями в интегральной форме.

$$E \varepsilon(t) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – деформация,  $\sigma$  – напряжение,  $E$  – мгновенный модуль упругости,  $K(t-\tau)$  – ядро ползучести.

Ю.Н. Работновым на основе использования разложения Фреше [5, 8] показано, что описание процессов нелинейной теории наследственности в одномерном случае сводится к следующему уравнению состояния (6):

$$\varphi(\varepsilon(t)) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau \quad (6)$$

В уравнении (7)  $\varphi$  – нелинейная функция связи между напряжениями и деформациями, полученная при мгновенном эксперименте, а ядро  $K$  определяется из эксперимента на линейную ползучесть. Значительным достоинством теории Ю.Н. Работнова является с одной стороны, достаточно простой состав экспериментов для определения параметров сложных процессов нелинейной наследственности [9], с другой – все преимущества теории наследственности по отношению к простым техническим гипотезам ползучести (к последним также можно отнести теорию Шведова-Бингама).

Выполненная конечно-элементная аппроксимация зависимостей (6) для пространственной области, приводит к уравнениям (7). Эти уравнения отражают процесс эволюции во времени напряженно-деформированного состояния системы с течением времени.

$$k_K^{m-1}(1-R^*)\Delta q^m = \Delta p^m, \in V_{ЭЛ}$$
$$\left(1 - \frac{\Delta t}{2} R(0)\right) \hat{k}_K^{m-1} \Delta q^m = \Delta p^m + \frac{\Delta t}{2} R(m\Delta q) \hat{k}_K^{m-1} \Delta q^1 +$$
$$\Delta t \hat{k}_K^{m-1} \sum_{m=2}^{m-1} R((m-n)\Delta t) \Delta q^m$$
$$\left\{ \begin{array}{l} \left(1 - \frac{\Delta t}{2} R(0)\right) \hat{k}_k^{n-1} = \hat{k}_k^{n-1,1} \\ \frac{\Delta t}{2} R(n\Delta t) \hat{k}_k^{n-1} = \hat{k}_k^{n-1,1} \\ \Delta t R((m-n)\Delta t) \hat{k}_k^{n-1} = \hat{k}_k^{n-1, m-n} \end{array} \right. \quad (7)$$

В уравнении (7) использованы ядра релаксации  $R$ , определяемые через ядра ползучести  $L$ , которые получают на основе экспериментальных данных.

Алгоритмы аппроксимации ядер по точкам экспериментальных кривых ползучести построены на основе метода наименьших квадратов.

Параметры ядер определяются решением системы нелинейных уравнений (численное решение рекомендуется выполнять методом Ньютона).

Как отмечалось выше, модель прогнозирования накопления остаточных деформаций [10] должна учитывать переменные во времени природно-климатические факторы региона строительства дороги. Как известно, температура оказывает существенное влияние на механические свойства асфальтобетона. Влажность влияет на деформации земляного полотна.

В данной математической постановке для использования основных разрешающих уравнений требуется, чтобы ядра ползучести и релаксации были разностного типа по времени:  $K=K(t-t)$ . Поэтому влияние влажности и температуры учитывается в нелинейной функции  $\sigma=\varphi(\varepsilon)$ , определяющей процесс мгновенного деформирования материала (8):

$$\begin{cases} \sigma=\varphi(\varepsilon, t^{\circ}), & \text{– для асфальтобетонов,} \\ \sigma=\varphi(\varepsilon, W) & \text{– для грунтов} \end{cases} \quad (8)$$

где  $W$  – влажность,  $t^{\circ}$  - температура образца.

На основании вышесказанного можно заключить, что принятая гипотеза об учете влияния температурно-влажностного фактора на накопление остаточных деформаций (8) характеризуется достаточной для технических целей точностью, что подтверждает возможность использования теории Ю.Н. Работнова с разностными ядрами ползучести.

Для реализации модели был разработан программный комплекс, работающий в среде ОС Windows. Комплекс имеет развитую модульную структуру. Реализованы параллельные вычисления для оптимизации времени счета. Параллельные вычисления выполнены в трех вариантах: параллельные



процессы, параллельные потоки (thread) в рамках одного процесса, и используются специальные возможности современных процессоров (в частности, технология SSE2) для одновременного выполнения нескольких однотипных арифметических операций в рамках одного потока. Реализованы алгоритмы ускорения доступа к памяти в подходе «блокировка кэша оперативной памяти» и «блокировка регистров процессора».

В заключении приведены некоторые результаты при расчете участка четырехполосной автомобильной дороги первой категории. На рис. 1-2 показаны графики динамических линий влияния перемещений вдоль рассматриваемого участка дороги по разным продольным сечениям.

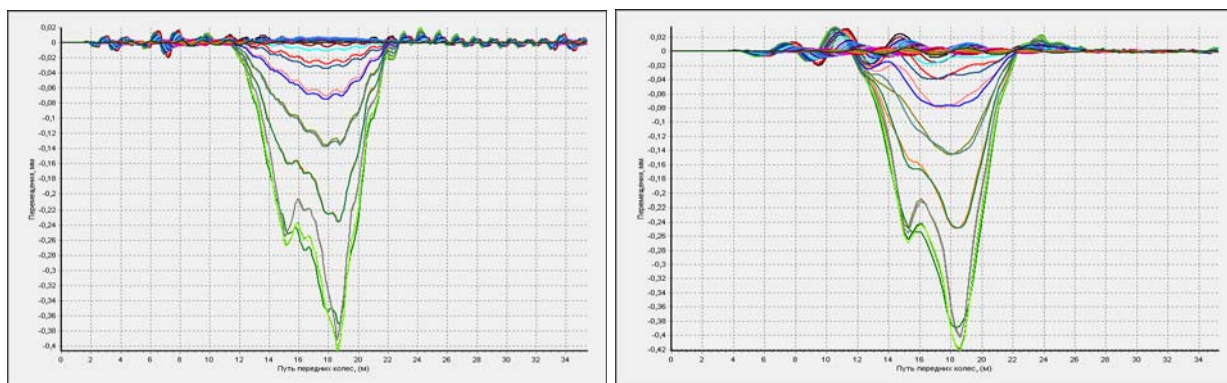


Рис. 1. Динамическая линия влияния перемещений при движении двухосного грузового автомобиля по полосе 1 со скоростью 40 км/ч. и 90 км/ч. (справа)

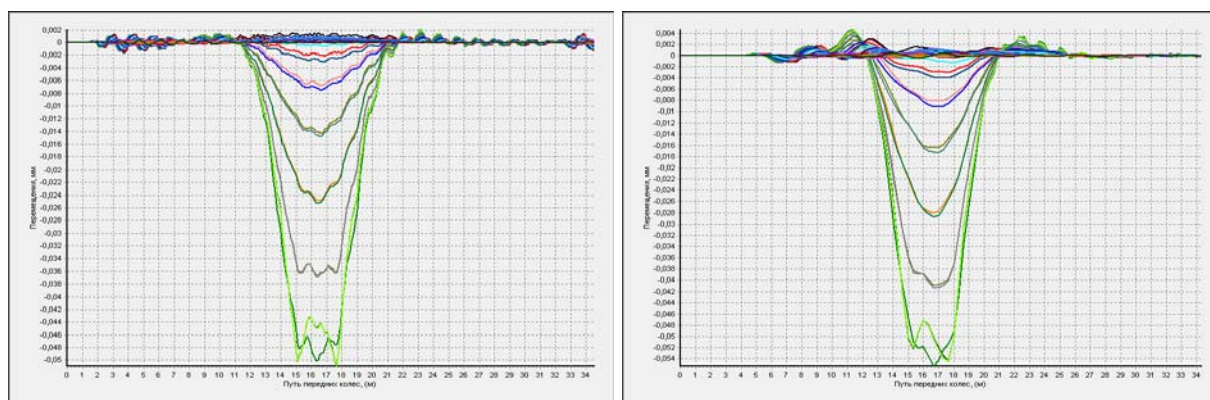


Рис. 2. Динамическая линия влияния перемещений при движении легкового автомобиля по полосе 1 со скоростью 40 км/ч. и 90 км/ч. (справа)

## Литература

1. Немчинов М. В. Дорожная одежда автомобильных дорог. Расчет и проектирование. Москва: АСВ, 2016. 108 с.
  2. Zheng Lu, Hai-lin Yao, Jie Liu, Zhi Hu Experimental evaluation and theoretical analysis of multi-layered road cumulative deformation under dynamic loads // Road Materials and Pavement Design. 2014. №1. pp. 35-54
  3. Матуа В.П., Мирончук С.А., Исаев Е.Н. Апробация датчика «Waterscout SM 100» для мониторинга влажности грунта земляного полотна в реальных условиях эксплуатации дороги // Инженерный Вестник Дона. 2018. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5086](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5086)
  4. Матуа В. П., Панасюк Л. Н. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях. Ростов-на/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2001. 372 с.
  5. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 650 с.
  6. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 383 с.
  7. Volterra V. Theory of Functionals and of Integral and Integro-Differential Equations. Dover Phoenix Editions, 1959. 304 p.
  8. Панасюк Л. Н., Кравченко Г. М. Stability of direct circuits integrating the equations of motion in the simulation of the dynamics of destruction // Matec Web of Conferences. 2017. №129. URL: [doi.org/10.1051/mateconf/201712905019](https://doi.org/10.1051/mateconf/201712905019)
  9. Панасюк Л. Н., Чубка Ю.Ш., Тюрина В.С. Решение задач в постановке нелинейной наследственности // Инженерный вестник Дона. 2016. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3742](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3742)
  10. Панасюк Л. Н., Чубка Ю.Ш., Тюрина В.С., Пошев А.У-Б. Прогнозирование накопления остаточных деформаций в строительных
-





конструкциях // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL:  
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4645

### References

1. Nemchinov M. V. Dorozhnaya odezhda avtomobil'nyh dorog. Raschet i proektirovanie [Road pavement of highways. Calculation and design]. Moskva: ASV, 2016. 108 p.
2. Zheng Lu, Hai-lin Yao, Jie Liu, Zhi Hu Road Materials and Pavement Design. 2014. №1. pp. 35-54.
3. Matua V.P., Mironchuk S.A., Isaev E.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2018. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5086
4. Matua V.P., Panasyuk L. N. Prognozirovaniye i uchet nakopleniya ostatochnykh deformatsiy v dorozhnykh konstrukciyakh [Forecasting and accounting of accumulation of residual deformations in road const]. Rostov-na/D: Rost. gos. stroit. un-t, 2001. 372 p.
5. Rabotnov Y. N. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela [Mechanics of deformable solids]. M.: Nauka, 1979. 650 p.
6. Rabotnov Y. N. Elementy nasledstvennoj mekhaniki tverdyh tel [Elements of hereditary mechanics of solids]. M.: Nauka, 1977. 383 p.
7. Volterra V. Theory of Functionals and of Integral and Integro-Differential Equations. Dover Phoenix Editions, 1959. 304 p.
8. Panasyuk L. N., Kravchenko G. M. Matec Web of Conferences. 2017. №129. URL: doi.org/10.1051/matecconf/201712905019
9. Panasyuk L. N, Chubka Y.S., Tyurina V.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n3y2016/3742
10. Panasyuk L. N, Chubka Y.S., Tyurina V.S., Poshev A.U-B. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4645