

РАЗБИТАЯ ГРУНТОВАЯ ДОРОГА КАК ИСТОЧНИК КИНЕМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КРАНОВ

Хахов А.А.

Астраханский государственный технический университет, Астрахань

Ключевые слова: автомобильный кран, микропрофиль дороги, метод формирующего фильтра, конечный элемент, напряженно-деформированное состояние, сопротивление усталости.

Аннотация. В статье описаны основные элементы рельефа дороги и изложен принцип моделирования случайного профиля дороги методом формирующего фильтра. Рассмотрены выражения для получения корреляционной функции и спектральной плотности. Приведен пример формирования функции микропрофиля разбитой грунтовой дороги и траекторий движения точек колес шасси грузового автомобиля. Описаны принцип дискретизации конструкций и алгоритм динамического анализа автомобильных кранов с телескопическими стрелами методом конечных элементов. Представлено матричное дифференциальное уравнение вынужденных колебаний металлоконструкций кранов. Рассмотрен один из способов описания возмущающего воздействия продольного профиля дороги на металлоконструкции автомобильных кранов. Результаты расчетного анализа позволяют оценить прочность и сопротивление усталости материалов металлоконструкций на этапе проектирования и безопасность автомобильных кранов при их выпуске в обращение и нахождении в эксплуатации.

A BROKEN DIRT ROAD AS A SOURCE OF KINEMATIC IMPACT ON THE METAL STRUCTURES OF AUTOMOBILE CRANES

Khakhov A.A.

Astrakhan State Technical University, Astrakhan

Keywords: automobile crane, micro profile of the road, forming filter method, finite element, stress-strain state, fatigue resistance.

Abstract. The article describes the main elements of the road relief and outlines the principle of modeling a random road profile using the forming filter method. Expressions for obtaining the correlation function and spectral density are considered. An example of the formation of the microprofile function of a broken dirt road and the trajectories of the points of the wheels of a truck chassis is given. The principle of discretization of structures and the algorithm of dynamic analysis of automobile cranes with telescopic booms by the finite element method are described. A matrix differential equation of forced vibrations of metal structures of cranes is presented. One of the ways to describe the disturbing effect of the longitudinal profile of the road on the metal structures of automobile cranes is considered. The results of the computational analysis make it possible to assess the strength and fatigue resistance of metalwork materials at the design stage and the safety of automobile cranes when they are put into circulation and in operation.

Введение

Автомобильный кран – стреловой самоходный кран общего назначения, предназначенный для подъема, опускания и горизонтального перемещения грузов при производстве строительно-монтажных и погрузочно-разгрузочных работ на рассредоточенных объектах. Для передвижения автомобильного крана в нерабочем состоянии по дорогам общего пользования используется серийное шасси грузового автомобиля, на котором размещены элементы крановой конструкции (ГОСТ 33709.2-2015. Краны грузоподъемные. Словарь. Часть 2. Краны стреловые самоходные).

Автомобильные краны эксплуатируются в самых разнообразных дорожных условиях. Оценить все многообразие воздействий на металлические конструкции автомобильных кранов от дорожных неровностей чрезвычайно сложно, особенно, если принять во внимание, что в зависимости от сезона и специфики региона рельеф однотипных дорог может иметь

различные характеристики. Динамические эффекты, возникающие при передвижении автомобильного крана по дорожным неровностям, зависят от конфигурации машины, упругих характеристик крана и его подвески, скорости и условий перемещения, а также от физических и геометрических характеристик дороги (ГОСТ 32579.1-2013. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок).

Сечение рельефа дороги в направлении движения колесной машины, называемое продольным профилем дороги, состоит из трех составляющих:

- 1) макропрофиль (длина волны 100 м и более);
- 2) микропрофиль (длина волны от 10 см до 100 м);
- 3) шероховатости (длина волны менее 10 см).

Макропрофиль, состоящий из длинных плавных неровностей, практически не вызывает колебаний автомобильного крана, но заметно влияет на его тягово-динамические показатели. Шероховатости сглаживаются шинами и не вызывают ощутимых колебаний, но влияют на работу шины (сцепление, шум и т.д.). Микропрофиль состоит из неровностей, оказывающих определяющее влияние на многие эксплуатационные свойства автомобильных кранов (надежность, устойчивость, плавность хода, быстроходность). Микропрофиль дороги определяет нагруженность автомобильных кранов при передвижении в нерабочем состоянии и является причиной возникновения усталостных трещин в металлоконструкциях крановой системы [1].

Методы моделирования продольного профиля дороги

В общем случае поверхность дороги аналитически можно выразить как функцию двух переменных [2]:

$$z = q(x, y),$$

где x и y – координаты некоторой плоскости, относительно которой измеряют высоту q ерновностей поверхности дороги (см. рис. 1).

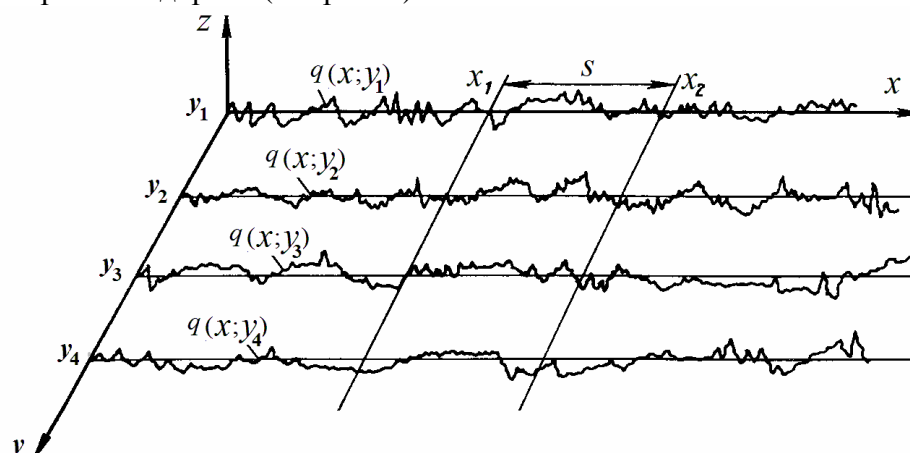


Рис. 1. Поверхность дороги как функция двух переменных

Вероятностной характеристикой функции $q(x, y)$ является ее двумерная корреляционная функция

$$R_q(x_1, y_1, x_2, y_2) = \langle q(x_1, y_1) \cdot q(x_2, y_2) \rangle,$$

где $\langle \dots \rangle$ – символ осреднения; $q(x_1, y_1)$, $q(x_2, y_2)$ – значения функции $q(x, y)$ «путевых» координат x_1, y_1 и x_2, y_2 .

Для стационарных случайных функций начало отсчета x_1, y_1 можно принять произвольным. Если ввести переменные

$$x_s = x_2 - x_1; \quad y_s = y_2 - y_1,$$

то корреляционная функция станет функцией двух переменных

$$R_q(x_s, y_s) = \langle q(x, y) \cdot q(x + x_s, y + y_s) \rangle.$$

Если поверхность дороги рассматривать как случайную функцию только одной переменной x , то ее статистической характеристикой будет корреляционная функция микропрофиля сечения вдоль дороги. При математическом ожидании, равном нулю, корреляционная функция будет иметь вид:

$$R_q(x_s) = \langle q(x) \cdot q(x + x_s) \rangle.$$

Полученную по экспериментальным данным корреляционную функцию для расчетов аппроксимируют зависимостью [3]:

$$R_q(x_s) = \sigma_q^2 \cdot (A_1 \cdot e^{-\alpha_1|x_s|} + A_2 \cdot e^{-\alpha_2|x_s|} \cdot \cos \beta_1 x_s),$$

где A_1, A_2 – весовые коэффициенты; α_i – параметры, характеризующие быстроту затухания корреляционной связи микропрофиля; β_1 – параметр, характеризующий гармоническую составляющую микропрофиля; σ_q – среднеквадратичное отклонение.

Кроме корреляционной функции достаточной характеристикой стационарной случайной функции является ее спектральная плотность:

$$S_q(\theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_q(x_s) \cdot e^{-i\theta x_s} dx_s,$$

где θ – «путевая» частота,

$$\theta = 2\pi / s,$$

где s – длина неровности (рис. 1).

В технических приложениях спектральную плотность определяют только для положительных частот. Для ее обозначения введем волнистую черту сверху:

$$\tilde{S}_q(\theta) = 2S_q(\theta) = 2 \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_q(x_s) \cdot e^{-i\theta x_s} dx_s \right) = \frac{2}{\pi} \left(\int_0^{\infty} R_q(x_s) \cdot e^{-i\theta x_s} dx_s \right).$$

Соответствующее корреляционной функции выражение для спектральной плотности имеет вид:

$$\tilde{S}_q(\theta) = 2 \cdot \sigma_q^2 \frac{1}{\pi} \left(A_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \theta^2} + A_2 \cdot \frac{\alpha_2^2 + \beta_1^2 + \theta^2}{(\theta^2 - \alpha_2^2 - \beta_1^2)^2 + 4\alpha_2^2\theta^2} \right).$$

При переходе от профиля дороги к кинематическим воздействиям на автомобильный кран необходимо учитывать скорость движения шасси грузового автомобиля [4]. Переход от случайной функции $q(x)$ к случайному процессу $q(t)$ осуществляют, принимая

$$x = vt,$$

где v – скорость движения автомобильного крана, $v = 1$ м/с; t – время движения.

Для моделирования случайных процессов с известными спектрально-корреляционными свойствами используется большое количество методов, среди которых универсальный выделить нельзя. Известные методы моделирования по степени точности алгоритма можно классифицировать следующим образом:

- 1) точные методы, к которым относятся рекуррентные алгоритмы авторегрессии – скользящего среднего и алгоритмы на основе дискретизации синтезируемого фильтра;
- 2) приближенные методы, к которым относятся метод формирующего фильтра, метод скользящего суммирования и методы канонического и неканонического представления случайного процесса.

Наиболее простым и распространенным методом моделирования случайных процессов является метод формирующего фильтра. Формирующим фильтром называют динамическую систему, преобразующую случайный процесс $q_0(t)$ вида «белого шума» в случайный процесс $q(t)$ с заданными статистическими характеристиками.

Для получения дискретных значений микропрофиля разбитой грунтовой дороги в отдельные моменты времени используем уравнение:

$$L_1\{q(t)\} = L_2\{q_0(t)\},$$

где L_1 и L_2 – линейные дифференциальные операторы.

$$L_1 = a_0 \frac{d^n}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{d}{dt} + a_n,$$

$$L_2 = b_0 \frac{d^m}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{d}{dt} + b_m,$$

где $m \geq 0$, $n \geq 0$, $m \leq n-1$.

Спектральные плотности процессов $q(t)$ и $q_0(t)$ связаны соотношением:

$$\tilde{S}_q(\omega) = \frac{|b_0(i\omega)^m + b_1(i\omega)^{m-1} + \dots + b_{m-1}(i\omega) + b_m|^2}{|a_0(i\omega)^n + a_1(i\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(i\omega) + a_n|^2} \tilde{S}_0(\omega),$$

где ω – частота процесса.

$$\frac{|b_0(i\omega)^m + b_1(i\omega)^{m-1} + \dots + b_{m-1}(i\omega) + b_m|^2}{|a_0(i\omega)^n + a_1(i\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(i\omega) + a_n|^2} \tilde{S}_0(\omega) = 2 \cdot \sigma_q^2 \frac{1}{\pi} \left(A_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1^2 + \omega^2} + A_2 \cdot \frac{\alpha_2^2 + \beta_1^2 + \omega^2}{(\omega^2 - \alpha_2^2 - \beta_1^2)^2 + 4\alpha_2^2 \omega^2} \right).$$

Приняв для разбитой грунтовой дороги $\sigma_q = 0,1$ м, $A_1 = 0,55$, $A_2 = 0,45$, $\alpha_1 = 0,085$ м⁻¹, $\alpha_2 = 0,085$ м⁻¹, $\beta_1 = 0,235$ м⁻¹ [5], получим два выражения

$$|b_0(i\omega)^m + b_1(i\omega)^{m-1} + \dots + b_{m-1}(i\omega) + b_m|^2 = 0,009935\omega^4 + 0,0005373\omega^2 + 0,0000077073,$$

$$|a_0(i\omega)^n + a_1(i\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(i\omega) + a_n|^2 = \omega^6 - 0,088775\omega^4 + 0,0032064\omega^2 + 0,0000281775,$$

из которых $m=2$, $b_0=0,1$, $b_1=0,033$, $b_2=0,002776$, $n=3$, $a_0=1$, $a_1=0,255$, $a_2=0,077$, $a_3=0,005308$.

Запишем уравнения фильтра в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{q} = q_1 + \frac{b_0}{a_0} q_0; \\ \dot{q}_1 = q_2 + \frac{a_0 b_1 + a_1 b_0}{a_0^2} q_0; \\ \dot{q}_2 = -\frac{a_1}{a_0} q_2 - \frac{a_2}{a_0} q_1 - \frac{a_3}{a_0} q + \left(\frac{b_2}{a_0} - \frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{a_0 b_1 - a_1 b_0}{a_0^2} - \frac{a_2 b_0}{a_0^2} \right) q_0. \end{cases}$$

На рисунке 2 представлен гауссовский случайный процесс «белого шума» $q_0(t)$ единичной интенсивности, а на рисунке 3 – случайный процесс микропрофиля разбитой грунтовой дороги $q(t)$, полученный путем решения уравнений фильтра.

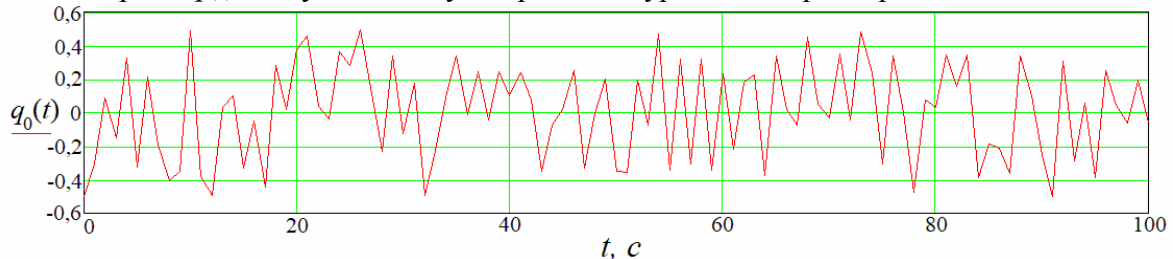


Рис. 2. Случайный процесс «белого шума»

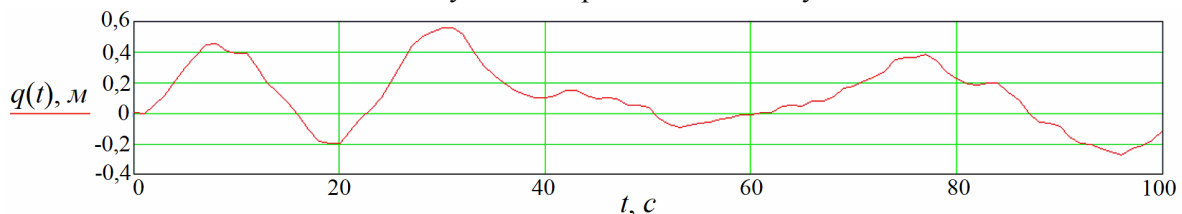


Рис. 3. Сформированный случайный процесс микропрофиля разбитой грунтовой дороги

Так как пятно контакта шины может одновременно охватывать несколько неровностей, необходимо учитывать сглаживающую способность шины [6]. Процесс микропрофиля дороги, сглаженного шиной, определяют из уравнения:

$$\ddot{q}_{ce} + \dot{q}_{ce}k_{nl}\sqrt{2} + q_{ce}k_{nl}^2 = k_{nl}^2q,$$

где q_{ce} – процесс продольного профиля дороги, сглаженного шиной; k_{nl} – коэффициент, определяемый по формуле:

$$k_{nl} = (0,9..1,3) \frac{v}{2\sqrt{0,1H(D - 0,1H)}},$$

где D – наружный диаметр шины; H – высота профиля шины, v – скорость движения автокрана вдоль оси x .

Объектом динамического исследования принят автомобильный кран КС-35715 производства Ивановского машиностроительного завода «АВТОКРАН» (рис. 4).

При $v=1$ м/с функция профиля разбитой грунтовой дороги, сглаженного шиной автомобильного крана КС-35715, имеет вид, представленный на рисунке 5.

На рисунке 6 изображена трехмерная модель автокрана на поверхности дороги сформированного микропрофиля.

Центр окружности i -го колеса перемещается по эквидистанте микропрофиля поверхности, сглаженного шиной автокрана (рис. 7).



Рис. 4. Автомобильный кран КС-35715

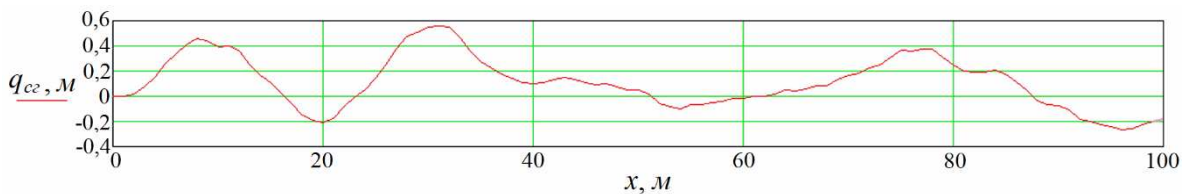


Рис. 5. Функция случайного микропрофиля разбитой грунтовой дороги, сглаженного шиной



Рис. 6. Трехмерная модель автомобильного крана КС-35715 на сформированной поверхности разбитой грунтовой дороги

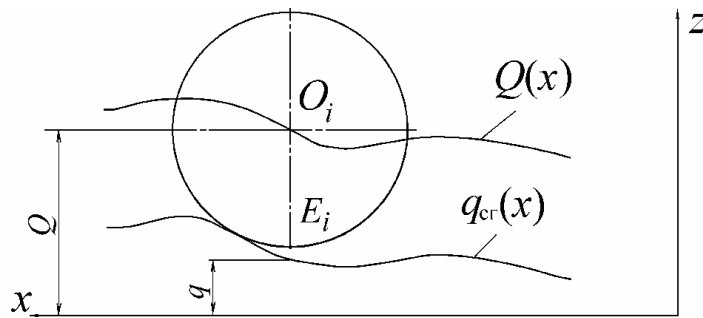


Рис. 7. Продольный профиль дороги и эквидистанта профиля, описываемая центром окружности колеса

Абсциссу и ординату эквидистанты $Q = f(X)$ определяют по зависимостям [7]:

$$X = x - \frac{Dq'_{cz}}{2\sqrt{(x')^2 + (q'_{cz})^2}}; \quad Q = q_{cz} + \frac{Dx'}{2\sqrt{(x')^2 + (q'_{cz})^2}}.$$

На рисунке 8 представлена эквидистанта микропрофиля дороги, описываемого функцией, график которой изображен на рисунке 5.

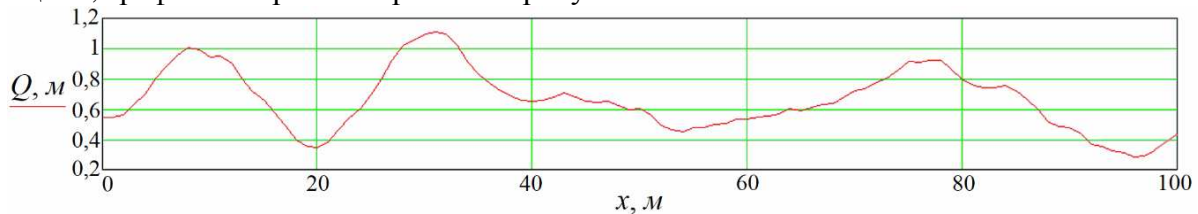


Рис. 8. Траектория движения центра O_i окружности колеса автомобильного крана

Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций автомобильного крана методом конечных элементов

Дискретизация конструкции автомобильного крана КС-35715 позволяет построить модель исходной системы путем приведения ее к совокупности отдельных элементов с дискретно-континуальными параметрами масс и жесткостей, связанных между собой в точках – узлах. Перемещения узлов принимаются за обобщенные координаты системы и характеризуют перемещения системы в целом. Полученная таким образом модель имеет конечное число степеней свободы. На рисунке 9 представлена конечно-элементная модель автомобильного крана КС-35715, включающая в свой состав дискретные модели шин [8], колес и их осей, многорессорных рессор, рамы грузового автомобиля МАЗ-5337, кабины водителя, двигателя, топливного бака, гидробака, опорной рамы с выносными опорами, поворотной рамы, телескопической стрелы, стрелового полиспаста с крюковой подвеской. Дискретизация проведена с использованием объемных конечных элементов. Полученная модель имеет 1770496 узлов, 2117327 конечных элементов. Количество степеней свободы конечно-элементной модели $n=3511284$ [9].

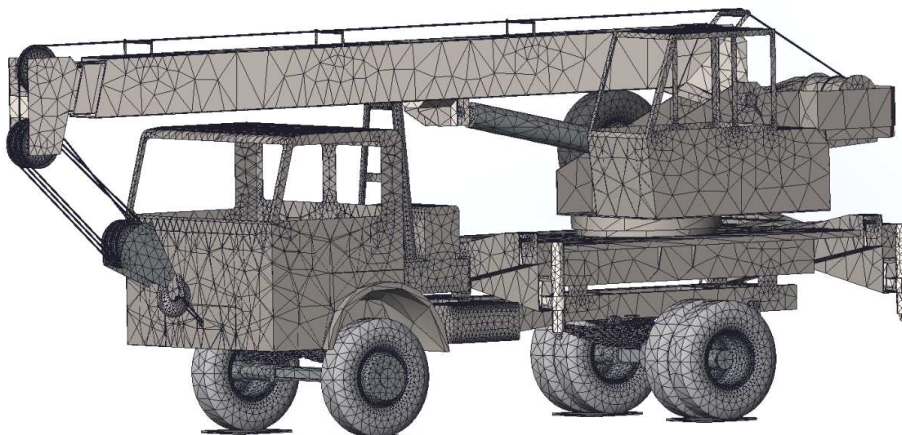


Рис. 9. Конечно-элементная модель автомобильного крана КС-35715

Матричное уравнение движения системы с n степенями свободы имеет вид [10]:

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = \{P_c\} - [M]\{\ddot{A}(t)\},$$

где $[M]$ – матрица масс системы; $[C]$ – матрица демпфирования, характеризующая рассеивание (диссипацию) энергии; $[K]$ – матрица жесткости системы, характеризующая действие упругих восстанавливающих сил; $\{V\}$, $\{\dot{V}\}$, $\{\ddot{V}\}$ – векторы обобщенных перемещений, скоростей и ускорений системы соответственно, характеризующие смещения, скорости и ускорения узлов моделируемой системы в общей системе координат; $\{P_c\}$ – вектор статических нагрузок; $\{\ddot{A}(t)\}$ – вектор вертикальных ускорений узлов конечно-элементной модели автомобильного крана.

При движении автокрана вдоль оси x с постоянной скоростью v вертикальные ускорения точек E_i (рис. 7) вектора $\{\ddot{A}(t)\}$ определяют путем двойного дифференцирования функции эквидистанты микропрофиля дороги:

$$a_{E_i}(t) = a_{O_i}(t) = \ddot{Q}(t).$$

При движении автокрана по направлению оси x со скоростью $v = 10$ м/с по сформированному профилю (рис. 5) вертикальные ускорения точки E_1 переднего колеса (рис. 11) принимают значения, представленные на рисунке 10.

Вертикальные ускорения точки E_2 заднего колеса изменяются по такому же закону, что и ускорения точки E_1 переднего колеса, с временной задержкой

$$\Delta t = B/v,$$

где B – база автомобильного крана (рис. 11).

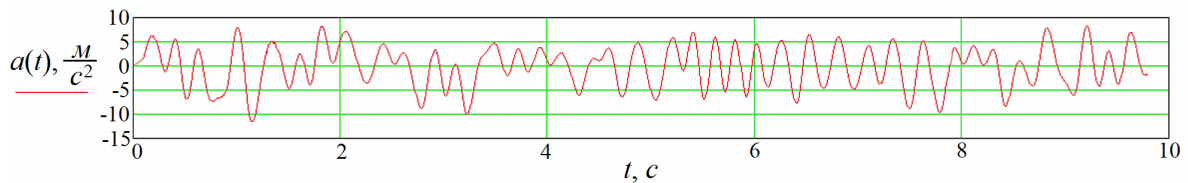


Рис. 10. Вертикальные ускорения точки E_1 переднего колеса при прямолинейном движении автомобильного крана КС-35715 со скоростью $v = 10$ м/с

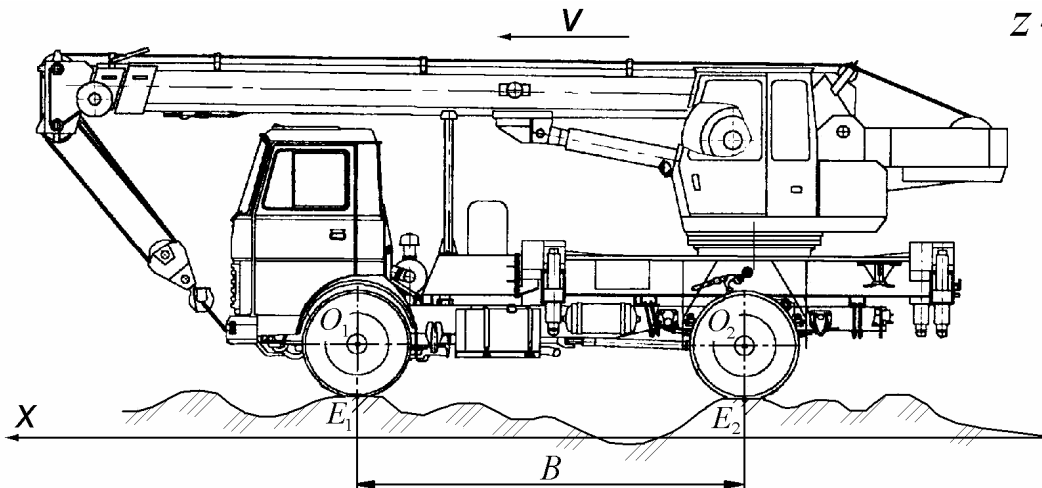


Рис. 11. Схема движения автомобильного крана КС-35715 вдоль оси x

Результаты анализа

Решение матричного уравнения движения системы методом Ньюмарка позволяет получить значения перемещений, скоростей, ускорений, узлов системы в произвольные моменты времени. На основе геометрических и физических соотношений сформирована матрица усилий и определены эквивалентные напряжения в узлах конечных элементов. Найденные значения эквивалентных напряжений в отдельных конечных элементах расчетно-динамической модели автомобильного крана КС-35715 достигали предельных значений, установленных для материала металлоконструкций нормами (рис. 12).

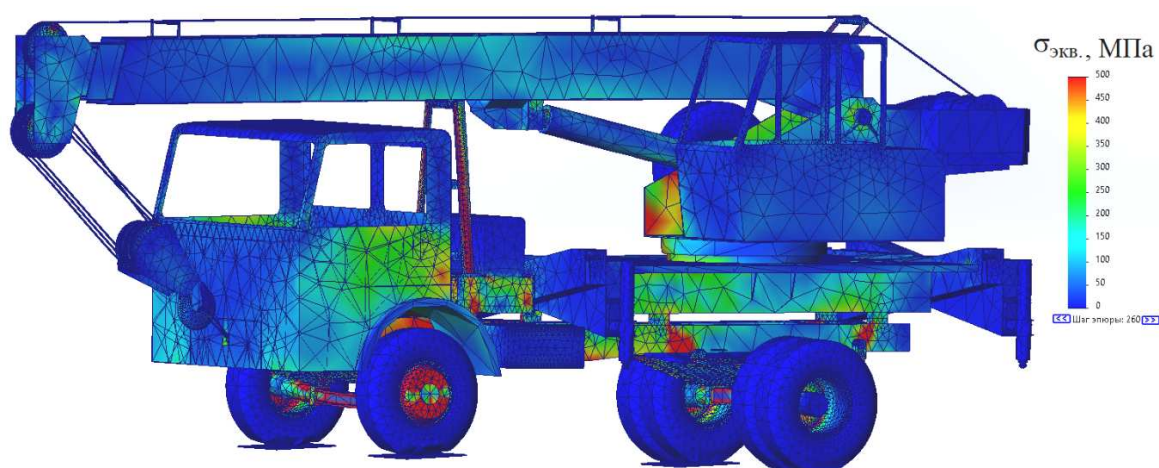


Рис. 12. Деформированное состояние конечно-элементной модели и эпюра эквивалентных напряжений на 3-й секунде движения автомобильного крана по смоделированному профилю разбитой грунтовой дороги со скоростью 10 м/с

Выводы

Учитывая, что разрушение металлических конструкций автомобильных кранов носит усталостный характер, полученные значения эквивалентных напряжений позволяют оценить выносливость материала расчетных элементов и внести на этапе проектирования необходимые изменения с целью повышения сопротивления усталости опасных зон (ГОСТ 33169-2022. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности). Кроме того, результаты динамического расчета дают возможность оценить безопасность автомобильных кранов при их выпуске в обращение и нахождении в эксплуатации на единой таможенной территории Таможенного союза (ТР ТС 018/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности колесных транспортных средств).

Заключение

Предложенная методология может быть использована для развития и совершенствования существующих норм расчета металлических конструкций стреловых самоходных кранов, не предусматривающих расчет автомобильных кранов в нерабочем состоянии при передвижении.

Финансирование

Статья написана при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Проблемы и перспективы развития транспортной логистики, безопасности и эксплуатации транспортно-технологического комплекса Региона» по заказу университета в 2023 году.

Список литературы

1. Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Гладов Г.И., Жеглов Л.Ф., Зузов В.Н., Котиев Г.О., Полунгян А.А., Фоминых А.Б. Проектирование полноприводных колесных машин: учебное пособие: в 3 томах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – Т. 1. – 496 с.
2. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля: Колебания и плавность хода. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
3. Корнюшин Ю.П., Лавров А.В., Сидорова А.В. Моделирование случайных процессов, обусловленных профилем опорной поверхности транспортно-технологических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17, №3. – С. 61-66.
4. Гусев А.С., Карунин А.Л., Крамской Н.А., Стародубцева С.А. Надежность механических систем и конструкций при случайных воздействиях: Учебное пособие. – М.: МГТУ "МАМИ", 2001. – 284 с.
5. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: Учебник для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
6. Левенков Я. Ю. Сглаживающая способность пневматической шины при статическом и динамическом взаимодействии автомобильного колеса с твердой неровной опорной поверхностью: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: Моск. гос. индустр. ун-т, 2013. – 16 с.

7. Валишин А.А., Туманов И.А., Ахунд-заде М.Р. Компьютерное построение сети эквидистант сложных негладких кривых на местности // Математическое моделирование и численные методы. – 2020. – № 2. – С. 95-106.
8. Томашевский С.Б. Моделирование автомобильных шин на основе метода конечных элементов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – №3(45). – С. 65-74.
9. Хахов А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций автомобильных кранов при движении по грунтовым дорогам // 67-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, Астрахань, 29-31 мая 2023 года: материалы. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2023. – С. 665-673.
10. Панасенко Н.Н., Дербенев Н.А., Смирнов В.В., Синельщиков А.В., Юзиков В.П. Строительная механика сварных пространственных металлоконструкций. Специальные главы: учебное пособие. – Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2017. – 492 с.

References

1. Afanasyev B.A., Belousov B.N., Gladov G.I., Zheglov L.F., Zuzov V.N., Kotiev G.O., Polungyan A.A., Fomin A.B. Design of all-wheel drive wheeled vehicles: textbook: in 3 vol. – M.: Publ. house of the Bauman Moscow State Technical University, 2008. – Vol. 1. – 496 p.
2. Rotenberg R.V. Car suspension: Vibrations and smoothness. – M.: Mechanical Engineering, 1972. – 392 p.
3. Korniyushin Yu.P., Lavrov A.V., Sidorova A.V. Modeling of random processes caused by the profile of the supporting surface of transport and technological means // Agricultural machinery and technology. 2023, vol. 17, no. 3, pp. 61-66.
4. Gusev A.S., Karunin A.L., Kramskoy N.A., Starodubtseva S.A. Reliability of mechanical systems and structures under accidental influences: Textbook. – M.: MSTU "MAMI", 2001. – 284 p.
5. Tarasik V.P. Theory of car movement: Textbook for universities. – SPb.: BHV-Petersburg, 2006. – 478 p.
6. Levenkov Ya.Yu. The smoothing ability of a pneumatic tire in the static and dynamic interaction of an automobile wheel with a solid uneven support surface: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – M.: Moscow State Industrial University, 2013. – 16 p.
7. Valishin A.A., Tumanov I.A., Akhund-zadeh M.R. Computer construction of an equidistant network of complex non-smooth curves on the ground // Mathematical modeling and numerical methods. 2020, no. 2, pp. 95-106.
8. Tomashevsky S.B. Simulation of vehicle tires based on the finite element method // News of MSTU "MAMI". 2020, no. 3(45), pp. 65-74.
9. Khakhov A.A. Analysis of the stress-strain state of metal structures of automobile cranes when driving on dirt roads // 67th International Scientific Conference of Astrakhan State Technical University, Astrakhan, May 29-31, 2023: materials. – Astrakhan: Publ. house of ASTU, 2023. – P. 665-673.
10. Panasenko N.N., Derbenyov N.A., Smirnov V.V., Sinelshchikov A.V., Yuzikov V.P. Construction mechanics of welded spatial metal structures. Special chapters: Textbook. – Volgograd: Volgograd Scientific Publishing House, 2017. – 492 p.

Сведения об авторах:

Хахов Алексей Алексеевич – доцент кафедры «Общеинженерные дисциплины и наземный транспорт»
halax@mail.ru

Information about authors:

Khakhov Aleksey Alekseevich – associate professor of the Department of general engineering disciplines and ground transport

Получена 10.01.2024