

риала. Ранее нами установлено, что вводя в конструкцию рамного каркаса дополнительные затяжки, можно сместить частоты собственных колебаний конструкции так, чтобы уйти от резонанса. В представленной работе поставлена задача установить влияние адаптирующих затяжек на вынужденные колебания каркасов зданий.

Конечноэлементное моделирование вынужденных колебаний выполнено с учетом действия вынуждающих сил, изменяющихся по гармоническому закону. Анализ зависимостей максимальных амплитуд колебаний и напряжений в конструкции рамы от частоты вынуждающей силы показал, что вследствие внутреннего трения существенный рост амплитуд колебаний и эквивалентных напряжений наблюдается только при частотах 2 и 4 Гц, т. е. при низших частотах собственных колебаний рамы. Следовательно, при эксплуатации конструкции может возникнуть необходимость отстройки от резонансов лишь на двух указанных частотах. Проведенные расчеты показали, что изменением диаметров затяжек достигается смещение резонансных областей, вместе с тем появляются условия для безопасной работы конструкции. Поэтому предложенные способы настройки конструкции на нерезонансную работу с помощью адаптирующих затяжек будут вполне эффективными.

Кроме того, выполнен анализ вынужденных колебаний стоечно-балочной конструкции каркаса производственного здания под действием аналогичной гармонической вынуждающей силы. В результате расчетов определены зависимости амплитуд колебаний конструкции от частоты вынуждающей силы для разных точек ее приложения.

Установлено, что амплитуды вертикальных колебаний на порядок больше горизонтальных, причем для разных элементов конструкции максимальные амплитуды наблюдаются при разных частотах. Отметим, что при частотах колебаний, больших 20 Гц, амплитуды колебаний оказываются весьма незначительными.

Введение затяжки в конструкцию со стоечно-балочным каркасом изменяет амплитудно-частотные характеристики. Анализ выполненных расчетов для различных точек приложения вынуждающей силы показал, что по-прежнему амплитуды вертикальных колебаний каркаса оказываются на порядок больше амплитуд горизонтальных колебаний. При этом наибольшие амплитуды колебаний имеют место в средней точке моста подкрановой балки. Наиболее неблагоприятные условия для эксплуатации рассмотренной конструкции возникают при частотах вынуждающих сил от 4 до 12 Гц. Введение затяжки незначительно изменяет амплитуды колебаний конструкции. Следовательно, для стоечно-балочного каркаса необходимо применение иных схем, позволяющих регулировать колебания конструкции.

Таким образом, результаты исследований показывают, что введением дополнительных связей и изменением их параметров можно осуществлять уход от резонансных состояний производственных зданий с рамным каркасом. Изменяя динамические характеристики таких каркасов, можно обеспечить надежность, безопасность и долговечность их использования в зданиях промышленного, сельскохозяйственного и транспортного назначения при наличии виброактивного оборудования.

УДК 539.374

## РЕЗОНАНСНЫЕ НАГРУЖЕНИЯ ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕРЖНЯ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Д. В. ЛЕОНЕНКО

*Белорусский государственный университет транспорта*

Ранее в работах был изучен статический изгиб слоистых конструкций на упругом основании. Здесь рассматриваются колебания трёхслойного стержня на безынерционном основании под действием резонансных нагрузок.

Для изотропных несущих слоёв приняты гипотезы Бернулли, в жёстком заполнителе справедливы точные соотношения теории упругости с линейной аппроксимацией перемещений его точек от поперечной координаты  $z$ . Материалы несущих слоёв несжимаемы в поперечном направлении, в заполнителе учитывается обжатие. Деформации малые.

Система координат  $x, y, z$  связывается со срединной плоскостью заполнителя. Распределенная поверхностная нагрузка  $q(x, t)$  действует перпендикулярно внешней плоскости первого слоя. На нижнюю поверхность второго несущего слоя действует реакция упругого основания  $q_r(x, t)$ . Через  $w_k(x, t)$  и  $u_k(x, t)$  обозначены прогибы и продольные перемещения срединных поверхностей несущих слоёв.

Уравнения движения трёхслойного стержня следуют из принципа Лагранжа с учетом работы сил инерции.

$$\delta A - \delta W = \delta A_f,$$

где  $\delta A$ ,  $\delta W$ ,  $\delta A_f$  – вариация работы соответственно внешних сил, внутренних сил упругости, сил инерции. В рамках модели Винклера реакция основания будет

$$q_r = \kappa_0 w_2.$$

Уравнения движения рассматриваемого трёхслойного стержня представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} a_1 u_1 - a_1 u_2 - a_4 u_{1,xx} - a_5 u_{2,xx} + a_2 w_{1,x} + a_3 w_{2,x} - 2a_6 w_{1,xxx} + a_7 w_{2,xxx} + m_1 \ddot{u}_1 &= 0; \\ -a_1 u_1 + a_1 u_2 - a_5 u_{1,xx} - a_9 u_{2,xx} - a_{10} w_{1,x} - a_{17} w_{2,x} - a_6 w_{1,xxx} + 2a_7 w_{2,xxx} + m_2 \ddot{u}_2 &= 0; \\ -a_2 u_{1,x} + a_{10} u_{2,x} + 2a_6 u_{1,xxx} + a_6 u_{2,xxx} + a_{11} w_{1,xx} - a_{12} w_{2,xx} + & \\ + a_{15} w_{1,xxx} - a_{16} w_{2,xxx} + a_8 w_1 - a_8 w_2 + m_1 \ddot{w}_1 - m_3 \ddot{w}_{1,xx} &= q; \\ -a_3 u_{1,x} + a_{17} u_{2,x} - a_7 u_{1,xxx} - 2a_7 u_{2,xxx} - a_{12} w_{1,xx} + a_{14} w_{2,xx} - & \\ -a_{16} w_{1,xxx} + a_{13} w_{2,xxx} - a_8 w_1 + (a_8 + \kappa_0) w_2 + m_2 \ddot{w}_2 - m_4 \ddot{w}_{2,xx} &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, зависящие от геометрии и материалов слоёв,  $m_p$  – массовые коэффициенты.

В качестве граничных принимаются условия свободного опирания стержня по торцам на неподвижные в пространстве жёсткие опоры:

$$w_k = u_{k,x} = w_{k,xx} = 0 \quad (k = 1, 2); \quad (2)$$

Начальные условия движения будут ( $t = 0$ )

$$u_k(x, 0) = u_{k0}(x); \quad \dot{u}_k(x, 0) = \dot{u}_{k0}(x); \quad w_k(x, 0) = w_{k0}(x); \quad \dot{w}_k(x, 0) = \dot{w}_{k0}(x) \quad (k = 1, 2). \quad (3)$$

Решение начально-краевой задачи (1)–(3) проводится методом Бубнова–Галеркина. Для этого искомые перемещения  $u_1(x, t)$ ,  $u_2(x, t)$ ,  $w_1(x, t)$ ,  $w_2(x, t)$  и нагрузка  $q(x, t)$  представляются в виде разложения в ряды по системам базисных функций, удовлетворяющей принятым граничным условиям (2):

$$\begin{aligned} u_1(x, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \cos \frac{\pi m x}{l} T_{m1}(t); \quad u_2(x, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \cos \frac{\pi m x}{l} T_{m2}(t); \quad q(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{\pi m x}{l} q_m(t); \\ w_1(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{\pi m x}{l} T_{m3}(t); \quad w_2(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{\pi m x}{l} T_{m4}(t), \end{aligned}$$

где  $q_m(t)$  – коэффициенты разложения нагрузки в ряд

$$q_m = \frac{2}{l} \int_0^l q(x) \sin(\omega_{nk} t) \sin \frac{\pi m x}{l} dx = E_m \sin(\omega_{nk} t), \quad E_m = \frac{2}{l} \int_0^l q(x) \sin \frac{\pi m x}{l} dx.$$

Функции времени  $T_{mk}(t)$  представляются в виде разложения по собственным формам:

$$T_{mk} = \sum_{i=1}^4 \delta_{mki} \zeta_{mi} \quad \left( \sum_{i=1}^4 \delta_{mki}^2 = 1 \right),$$

где  $\delta_{mki}$  – амплитуды нормированных собственных форм колебаний.

Функции  $\zeta_{mi}(t)$  определяются из системы уравнений

$$\ddot{\zeta}_{mi}(t) + \omega_{mi}^2 \zeta_{mi}(t) = \tilde{E}_{mi} \sin(\omega_{nk} t), \quad \tilde{E}_{mi} = \frac{E_m \delta_{m3i}}{\sum_{k=1}^4 M_{mkk} \delta_{mki}^2}, \quad (4)$$

где  $\omega_{mi}$  – частоты собственных колебаний стержня;  $\tilde{E}_{mi}$  – приведенная амплитуда резонансной нагрузки;  $M_{mkk}$  – массовый коэффициент.

Начальные условия движения (3) принимаем нулевыми, что не уменьшает общности решений, но делает выкладки менее громоздкими.

Общее решение уравнения (4)

$$\zeta_{mi}(t) = A_{mi} \cos(\omega_{mi}t) + B_{mi} \sin(\omega_{mi}t) + y_{mi}(t), \quad y_{mi}(t) = \begin{cases} \frac{\tilde{E}_{mi}}{(\omega_{mi}^2 - \omega_{nk}^2)} \sin(\omega_{nk}t), & m \neq n \text{ или } i \neq k, \\ -\frac{\tilde{E}_{mi}}{2\omega_{mi}} t \cos(\omega_{mi}t), & m = n, i = k. \end{cases} \quad (5)$$

Константы интегрирования  $A_{mi}, B_{mi}$  в соответствии с принятыми нулевыми начальными условиями (3) и решением (5)

$$A_{mi} = 0, \quad B_{mi} = -\frac{1}{\omega_{mi}} \begin{cases} \frac{\omega_{nk} \tilde{E}_{mi}}{(\omega_{mi}^2 - \omega_{nk}^2)} & m \neq n \text{ или } i \neq k, \\ -\frac{\tilde{E}_{mi}}{2\omega_{mi}} & m = n, i = k. \end{cases}$$

Таким образом, в данной работе рассмотрена методика исследования вынужденных колебаний трехслойного стержня на упругом основании, находящегося под действием локальных резонансных поверхностных нагрузок. Получены аналитические и числовые решения ряда начально-краевых задач для стержней со сжимаемым заполнителем.

УДК 712

## ВОЗМОЖНОСТИ ДЕКОРАТИВНОГО ОЗЕЛЕНЕНИЯ И ЛАНДШАФТНОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА ПРИДОРОЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ЭСТЕТИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

И. Г. МАЛКОВ, М. М. ВЛАСЮК

*Белорусский государственный университет транспорта*

Современные требования к состоянию окружающей среды с учетом ценности категории красоты в архитектуре вызвали появление нового направления в экологии – видеоэкологии, главной задачей которой является разработка научных основ создания визуально-психологического комфорта в условиях арте- и квазиприродной среды. Видеоэкология позволяет выделить помимо известных загрязнений: инградентного, параметрического, биоценотического, ландшафтного (стацциально-деструкционного) – еще один вид – эстетическое, которое вызвано кризисом формообразования и стихийностью характера градостроительного процесса.

Основными признаками эстетического загрязнения применительно к строительству дорог и транспортных сооружений можно назвать гомогенную монохромную архитектуру, невыразительное и точечное применение озеленения, отсутствие гармоничного единства с природой. В связи с этим особую актуальность приобретает декоративное озеленение и благоустройство придорожных территорий, что позволяет снизить усталость, раздражительность и другие виды психологического дискомфорта у участников движения благодаря использованию разнообразных форм и цветовой гаммы ограждений, а не серых, унылых и монотонных, которые еще имеют место в транспортной инфраструктуре. Следует отметить, что страдает не только эстетическое восприятие окружающего пространства, но имеется и угроза физическому механизму зрения из-за гомогенной и «агрессивной» архитектуры с одинаковыми элементами. Поэтому целесообразно применение стратегии улучшения визуального восприятия ландшафта с транспортным сооружением, обеспечивающей минимизацию эстетического и стацциально-деструкционного загрязнения, сохранение естественных эстетических экосистем, что требует выполнения следующих приемов организации транспортного строительства:

- создание визуальных акцентов в декоре транспортных сооружений, позволяющих снизить нагрузку на зрение у участников движения;
- выявление панорамных видов в процессе трассирования дороги и привлечение внимания к живописным формам;