Научная статья УДК 624.072.14 DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-808-824 EDN XVORPP



ВИБРАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ СТАЛЬНЫХ БАЛОК, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВЫТЯЖКОЙ СТЕНКИ

Е.В. Кравчук¹*, И.Ю. Белуцкий², В.А. Кравчук²

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Россия ²Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ), г. Хабаровск, Россия 004938@pnu.edu.ru, http://orcid./0000-0001-5419-1365 000177@pnu.edu.ru.http://orcid.org/0000-0002-3881-2050 000415@pnu.edu.ru.http://orcid.org/0000-0002-4101-1334 *ответственный автор

аннотация

Введение. Выполнен анализ колебаний строительных конструкций и деталей механизмов. Сформулирована необходимость исследования колебательных процессов и вибрационной надежности стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки. Предмет исследования – стальные строительные конструкции. Объектом исследования является стальная биметаллическая балка, предварительно напряжен.

Материалы и методы. В основу научного поиска приняты основы строительной механики зданий и сооружений — принцип независимости действия сил, дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня, энергетический метод, а также методы определения напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных стальных стержней.

Результаты. Выполнен сопоставительный анализ вибрационной надежности балок без предварительного напряжения и предварительно напряженных конструкций равной несущей способности. Интегрированием дифференциального уравнения изогнутой оси разрезного стержня определены повороты сечений опорных узлов балок, нагруженных усилиями предварительного напряжения и внешними воздействиями. На основании принципа независимости действия сил определены опорные моменты в жестких опорных узах конструкций. Разработанные методы напряженного состояния предварительно напряженных стержней положены в основу определения нормальных напряжений в сечениях исследуемых балок. Результирующие напряжения найдены путем алгебраического сложения предварительных напряжений и вызванных внешней нагрузкой. Динамические параметры несущей способности балок определены на основе работ И. М. Рабиновича и В. А. Киселева. Установлена круговая частота колебаний традиционных и предварительно напряженных балок, сформулированы аналитические выражения для определения угловой скорости предварительно напряженных изгибаемых элементов, определены динамические прогибы и коэффициенты конструкций. Установлено, что круговая частота предварительно напряженных балок, шарнирно закрепленных в опорных узлах, по сравнению с круговой частотой обычных балок снижается в 1,4 раза и в 5,6 – в балках с жесткими опорами. Угловая скорость снижается, соответственно, в 1,4 (шарнирные опоры) и 6,8(жесткие опоры). Прогибы преднапряженных балок снижаются в 1,87и 11,9 раз. Имеет место значительное снижение напряженного состояния предварительно напряженных конструкций.

Выводы. Шарнирно закрепленная традиционная балка, нагруженная внешней и вибрационной нагрузками, в предельном состоянии находится в зоне текучести материала и не удовлетворяет требованиям первого и второго предельного состояния. Такие конструкции обладают самой низкой вибрационной надежностью. Более надежны предварительно напряженные конструкции. При жестких опорных узлах моменты усилий предварительного напряжения совпадают с опорными моментами и создают выгиб, вектор которого направлен в сторону, противоположную вектору прогиба от внешней нагрузки. В предельном состоянии суммарные прогибы оказываются меньше прогибов внешних нагрузок. Напряжения в конструкции снижаются. Поскольку моменты нагрузок и прогибы балок являются исходными пара-

© Кравчук Е. В., Белуцкий И. Ю., Кравчук В. А., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

808

метрами для решения задач динамической прочности, можно утверждать о том, что предварительно напряженные балки с жесткими опорными узлами обладают повышенной вибрационной надежностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: предварительное напряжение, колебание, круговая частота, угловая скорость, динамические коэффициенты

Статья поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Кравчук Е. В., Белуцкий И. Ю., Кравчук В. А. Вибрационная надежность стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 808-824. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-808-824

Origin article DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-808-824 EDN: XVORPP

VIBRATION RELIABILITY OF STEEL BEAMS PRESTRESSED BY DRAWING

Evgenii V. Kravchuk¹*, Igor Yu. Belutskii², Valerii A. Kravchuk² ¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia ²PacificStateUniversity, Khabarovsk, Russia 004938@.pnu.edu.ru,htt:/orcid.org/0000-0001-5419-136 000177@pnu.edu.ru.http:/orcid.org/0000-0002-3881-2050 000415@pnu.edu.ru,http://orcid.org/0000-0002-4101-1334 *corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Vibrations of building structures and mechanism parts were analyzed. The need to investigate the oscillation processes and vibration reliability of steel beams prestressed by web drawing was formulated. The subject of study is structural steel. The object of study is bimetallic steel beam prestressed without rods.

Materials and methods. The scientific inquiry is based on the basics of structural mechanics of buildings and structures: superposition principle, differential equation of deflection curve of a bar, energy method, and methods of determination of stress-strain state of prestressed steel bars.

Results. A comparative analysis of vibration reliability of non-prestressed beams and prestressed structures of equal bearing capacity was performed. Rotations of the beam supporting nodes loaded by prestressing forces and external impacts were determined by integration of differential equation of deflection curve of a split bar. The support moments in rigid supporting nodes of structures were determined on the basis of superposition principle. The developed methods of stressed condition of prestressed bars are the basis for determination of normal stresses in the sections of beams under study. The resultant stresses were obtained by algebraic addition of prestresses and stresses from external loads. Dynamic parameters of bearing capacity of beams were determined on the basis of works by I.M. Rabinovich and V.A. Kiselev. The oscillation circular frequency of conventional and prestressed beams was established, analytical expressions for determination of angular velocity of prestressed bending elements were formulated, and the dynamic deflections and factors of structures were determined. It is found that the circular frequency of prestressed beams hinged in supporting nodes compared to the circular frequency of conventional beams decreases by a factor of 1.4 and by a factor of 5.6 in beams with rigid supports. Angular velocity decreases by a factor of 1.87: 11,9. There is a significant reduction in the stressed condition of prestressed structures.

© Kravchuk E. V., Belutskii I. Yu., Kravchuk V. A., 2023



Content is available under the license Creative Commons Attribution 4.0 License.



РАЗДЕЛ III СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Conclusions. A hinged traditional beam under external and vibration loads in limit state is in the material yield zone and does not meet the first and second limit state conditions. These structures have the lowest vibration reliability. Prestressed structures are more reliable. With rigid supporting nodes, the moments of prestressing forces coincide with the supporting moments and produce hogging with the vector opposite to the external load deflection vector. In the limit state, total deflections are less than the external load deflections. Stresses in the structure decrease. Since load moments and beam deflections are initial parameters for dealing with dynamic strength tasks, we may state that prestressed beams with rigid supporting nodes have an increased vibration reliability.

KEYWORDS: prestressing, alternating voltage, angular frequency, angular velocity, exciting coefficients

The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 27.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Kravchuk Evgeni. V., Belutsky Igor Yu., Kravchuk Valeri. A. Vibration reliability of steel beams prestressed by drawing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6

ВВЕДЕНИЕ

Без сомнения все строительные конструкции зданий и сооружений находятся под воздействием вибрационных нагрузок различной интенсивности. Пульсационная ветровая нагрузка или воздействие движущегося транспорта в мостовых конструкциях создают в них вибрации, способные достичь предела вибрационных нагрузок, при которых материал конструкций будет находиться в состоянии предела выносливости. За предел выносливости принимается вибрационная прочность металла. Все это возможно при условии, когда материал конструкций будет находиться в состоянии упругопластического деформирования. При упругой работе стали предел выносливости не наступит.

Все исследования, касающиеся определения частоты колебаний, круговой частоты, угловой скорости или динамических прогибов направлены на установление предельных параметров динамической прочности конструкций.

Цель работы – исследование динамических параметров вибрационной надежности стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки при различных закреплениях их опорных узлов.

Российские и зарубежные ученые ведут интенсивную работу по изучению проблем колебательных процессов в строительных конструкциях или механизмах.

Большую работу в этом направлении выполняют ученые Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета. Итерационный метод определения спектра частот свободных колебаний прямоугольных панелей предложен в работе [1]. Метод вычисления частот собственных колебаний упругих стержней прямым интегрированием дифференциального уравнения изгиба изложен в работе [2]. Задача поиска свободных изгибных колебаний тонкостенного подземного газопровода с учетом влияния грунта решена в работе [3]. Расчет сооружений с динамическим гасителем колебаний по акселерограммам проектных землетрясений предложен в работе [4]. Исследование спектра свободных колебаний тонких упругих оболочек рассмотрено в статье [5]. Определение частот собственных колебаний складчатых пологих оболочек выполнено в работе [6]. Влияние внутреннего рабочего давления на частоты свободных колебаний криволинейных участков полиэтиленовых трубопроводов описано в [7].

В Московском государственном строительном университете (МГСУ) предложены общие рекомендации по проектированию и эксплуатации зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям [8]. Частоты собственных поперечных колебаний и максимальные прогибы системы перекрестных стальных ферм изложены в работе [9]. Нестационарные случайные процессы в плоской стальной раме при землетрясениях даны в работе [10]. Методы моделирования колебаний упругих неоднородных тел описаны в статье [11].

Журнал «Вестник СибАДИ» (г. Омск) объединяет разработку проблем, связанных с колебательными процессам в механизмах и строительных конструкциях. Колебание системы вибромашин описаны в работе [12]. Уменьшение колебаний груза, перемещаемого грузоподъемными кранами, изложено в работе [13]. Анализ влияния координат точек крепления уравновешивающего каната на колебательность груза на стреле крана-трубоукладчика выполнен в работе [14].

Исследование параметров динамической прочности балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки, выполняется в Тихоокеанском государственном университете (г. Хабаровск, Россия). Влияние предварительного напряжения на изменение круговой частоты, частоты периода и количества колебаний в минуту при свободном колебании с учетом сил сопротивления изучено в работе [15]. Круговая частота, период колебаний, количество колебаний в минуту в преднаряженных балках, жестко закрепленных в опорных узлах, определены в статье [16]. Параметры динамической несущей способности исследуемых балок при случайных воздействиях сформулированы в работе [17].

Сопредельные с Россией зарубежные страны, расположенные в зоне интенсивных сейсмических воздействий, выполняют также большой объем исследовательских работ по изучению динамической и сейсмической надежности строительных конструкций. Хрупкость материала стальных мостов описана в статье [18]. Напряженное состояние стенки стальной балки в зоне касательных напряжений изложено в работах [19, 20]. Фактическая работа подкрепленных пластин сформулирована в исследовании [21]. Частота стенок стальных балок, шарнирно закрепленных в опорных узлах, описана в работе [22]. Метод динамической жесткости при анализе свободных и вынужденных колебаний представлен в публикации [23].

При всем многообразии работ по изучению динамических параметров несущей способности строительных конструкций зданий и сооружений пока нет работ, изучающих вибрационную надежность стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки. Настоящая статья описывает динамику колебательного процесса балок, эксплуатирующийся в составе каркаса высотного здания, при воздействии на них вибрационных сосредоточенных и изгибных внешних нагрузок.

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ

При проектировании и эксплуатации высотных зданий появляется необходимость устройства технических этажей, в пределах которых устанавливается вентиляционное оборудование, коммуникации радио и телевещания. Подобная ситуация возникает в промышленных зданиях, на перекрытиях которых размещается система вентиляции, водоснабжения и канализации с двигателями, создающими вибрационные нагрузки в несущих конструкциях сооружения.

Настоящая работа посвящена расчету предварительно напряженной балки перекрытия здания рамного типа с жестким сопряжением ее в опорных узлах.

Для решения задачи балку с жесткими узлами расчленим на составляющие балки с шарнирными сопряжениями в узлах, заменив опорный момент M_{op} узловым моментом в шарнирном сопряжении. Расчетная схема балки представлена на рисунке 1.

Определение опорного момента M_{op} базируется на предположении о том, что в жестком узле поворот сечения равен нулю.

Используя дифференциальное уравнение изогнутой оси балки

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI_x},\tag{1}$$

известными из курса сопротивления материалов приемами, найдем повороты опорных сечений балки от каждого вида нагружения (рисунок 2).

Поворот опорного сечения балки от момента усилий предварительного напряжения M_0 ,

$$\frac{dy}{dx} = \theta_{M_0} = -\frac{M_0 l}{2EI_x},\tag{2}$$

от опорного момента M_{0P} -

$$\theta_M = -\frac{M_{op}l}{2EI_x},\tag{3}$$

от равномерно распределенной нагрузки д-

$$\theta_q = \frac{ql^3}{24EI_x},\tag{4}$$

от вибрационного момента M_{σ} –

$$\theta_g = -\frac{M_g l}{24EI_x},\tag{5}$$

от вибрационного усилия P_{a} –

$$\theta_{g1} = \frac{P_g l^2}{16EI_x}.$$
 (6)



Рисунок 1 – Расчетная схема предварительно напряженной балки: а – схема нагружения балки моментом усилий предварительного напряжения; б – нагружение балки равномерно распределенной нагрузкой; в – нагружение балки опорным моментом; г – нагружение балки вибрационным моментом; д – то же, вибрационной сосредоточенной нагрузкой Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Scheme for calculating the prestress of a beam: a – diagram of the loading of a changing the prestress; b – loading of a beam of uniform distributed adjustment; c – loading of the beam with a supporting moment; d – loading of the beam by vibration moment; d – the same, vibration artificial form Source: by the authors.



Рисунок 2 – Повороты сечений балки от отдельных нагружений Источник: составлено авторами.

> Figure 2 – Rotations of beam sections due to individual loads Source: Compiled by the authors.

812

Из равенства

$$\frac{ql^3}{24EI_x} - \frac{M_0l}{2EI_x} - \frac{M_{op}l}{2EI_x} - \frac{M_{g}l}{24EI_x} - \frac{M_gl}{24EI_x} + \frac{P_gl^2}{16EI_x} = 0$$

определяем опорный момент M_{op} :

$$M_{op} = \left[\frac{ql^2}{12} - M_o - \frac{M_g}{12} + \frac{P_g l}{8}\right].$$
 (7)

Момент усилий предварительного напряжения представлен в работе [24].

$$M_o = \frac{R_y AhK^2}{(K+1)^2 (K+2)},$$
 (8)

где R_y — расчетное сопротивление материала стенки предварительно напряженной балки; A — площадь поперечного сечения балки; h — высота сечения балки; K — коэффициент асимметрии сечения, K = 1,175.

В работах И. М. Рабиновича¹ и В. А. Киселева² вибрационный момент $M_{\rm g}$ рекомендуется определять зависимостью

$$M_g = P\cos ot \cdot a \,, \tag{9}$$

сипа.

где

$$P = m^* o^2 \rho = \frac{G^* o^2 \rho}{\sigma}$$
 (рисунок 3): $\rho = \sqrt{\Gamma \rho}$

вибрационная

вая скорость, $o = \frac{2\pi n}{60}$, n -количество оборотов неуравновешенной массы; $m^* -$ масса неуравновешенного груза; $\rho -$ эксцентриситет массы; $G^* -$ вес неуравновешенного груза; g -ускорение свободного падения груза, g = 998 см/с²; a -расстояние от центра тяжести механизма до горизонтального уровня покрытия.

Под действием усилия P_g в балках возникают вертикальные $P\sin ot$ и горизонтальные $P\cos ot$ силы (см.рисунок3). Кроме этого, усилие P, приложенное с эксцентриситетом ρ , создает момент $M_g = P \cdot \cos ot \cdot a$ (a – расстояние от центра тяжести механизма до горизонтального уровня покрытия.



Рисунок 3 – Схема и вибрационные нагрузки балки с одной степенью свободы Источник: взято из работ [25,26].

Figure 3 – Diagram and vibration loads of a beam with one degree of freedom Source: Taken from works [25,26].

Нормальная и горизонтальная составляющие $P \sin ot$ и $P \cos ot$ создают прогибы в балках.

При наличии сил сопротивления прогиб от силы $P \sin o \cdot t$

$$y = \alpha \sin(\omega t - \lambda) +$$

+ $\alpha e^{-\alpha t} [\sin \lambda \cos \omega t + \frac{\alpha \sin \lambda - \omega \cos \lambda}{\omega}] +$ (10)
+ $e^{-\alpha t} [v(0) \cos \omega t + \frac{v(0) + \alpha y(0)}{\omega} \sin \omega t]$

m

 $P\cos ot$:

$$y = \alpha \cos(\omega t - \lambda) +$$

+ $\alpha t^{-\alpha t} [-\cos \lambda \cos \omega t - \frac{\alpha \cos \lambda + o \sin \lambda}{\omega} \sin \omega t] +$ (11)
+ $e^{-\beta t} [y(0) \cos \omega t + \frac{v(0) + \alpha y(0)}{\omega} \sin \omega t]$

В том случае, когда силы сопротивления свободным колебаниям балок незначительны, можно допустить, что $\alpha \approx 0, \lambda \approx 0, e^{-\alpha t} \approx 1,0$ и при начальных условиях y(0) = v(0) = 0 прогибы от усилий $P \sin ot$ и $P \cos ot$ будут равны

¹ Рабинович И.М. Курс строительной механики стержневых систем. 2-е изд., перераб. Т.2. Статистические неопределимые системы. Специальный курс. М.: Госиздат, 1954. 543 с.

² Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс. М.: Стройиздат, 1964.331 с.

РАЗДЕЛ III СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

$$1 y = \left[\frac{\delta_{1p}P}{(1-\frac{o^2}{\omega^2})}\right] (\sin ot - \frac{o}{\omega}\sin \omega t); \quad (12)$$

$$y = \left[\frac{\delta_{1p}P}{(1-\frac{o^2}{\omega^2})}\right](\cos ot - \frac{o}{\omega}\cos \omega t).$$
(13)

Здесь δ_{1p} – прогиб балки от единичного на-гружения.

$$\delta_{1p} = \frac{l^3}{48EI_r}.$$
 (14)

Динамические коэффициенты

$$\mu(t) = \frac{1}{(1 - \frac{o^2}{\omega^2})} (\sin ot - \frac{o}{\omega} \sin \omega t):$$
(15)

$$\mu(t) = \frac{1}{(1 - \frac{o^2}{\omega^2})} (\cos ot - \frac{o}{\omega} \cos \omega t).$$
(16)

Из работы [24] известно, что угловую скорость О можно определить из зависимости

$$tg\lambda = 2o\alpha / (\omega_{gpr}^{2} - o^{2}), \qquad (17)$$

решение которой позволяет получить квадратное уравнение

$$o^{2}tg\lambda + o \cdot 2\alpha - tg\lambda \cdot \omega_{gpr}^{2} = 0,$$
(18)

из которого следует

$$\sigma = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}$$
рад/сек, (19)

где $A = tg\lambda$; $B = 2\alpha$; $C = tg\lambda \cdot \omega^2$.

Коэффициент $\lambda = 2\alpha / \omega$ – отвлеченная величина, учитывающая силы сопротивления; $\alpha = \beta / 2m$ – коэффициент, характеризующий степень влияния сил сопротивления на свободные колебания; *m* – масса элемента.

Коэффициент пропорциональности β подчиняется зависимости $\beta = 2$ $\alpha m = \frac{2\delta m \sqrt{\omega^2 - \alpha^2}}{2\pi}$, преобразование которой позволяет установить, что

$$\alpha = \frac{\delta\omega}{\sqrt{4\pi + \delta^2}}.$$
 (20)

Здесь δ — логарифмический декремент затухания колебаний, δ =0,3 (СП 20.13330.2017, п.11.1.10); ω — круговая частота балки при свободном колебании:

- обычная балка

$$\omega_{ob} = \frac{9,876}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}}; \qquad (21)$$

- предварительно напряженная балка с шарнирными опорами

$$\omega_{pr} = \frac{7,162}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}}; \qquad (22)$$

- предварительно напряженная балка с жесткими опорами

$$\omega_{prg} = \frac{1,7689}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}}$$
(23)

(*µ*-погонная масса балки и нагрузки на ней, кг/см).

Практическая реализация теоретических положений расчета вибрационной надежности предварительно напряженных стальных балок

Рассмотрим обычные и предварительно напряженные балки при условии шарнирного и жесткого закрепления их в опорных узлах. Балки пролетом l = 12000 мм. Нагружены равномерно распределенной нагрузкой q = 0,18 кН/см. На балках находится механизм массой 500 кг. Предположим, что геометрические параметры обычных и предварительно напряженных балок равны между собой: $I_x = 40979$ см⁴, E = 2100000 кг/см². Расчетное сопротивление материала стенки $R_y = 2300$ кг/см², площадь поперечного сечения балок – A = 52 см², высота сечения h = 69 см.

Обычная балка

Усилие P, создающее вибрационную нагрузку, на основании зависимости (9) $P = m^* o^2 \rho$. Установлено, что масса $m^* = 500$ кг.

Угловая скорость *о* на основании формулы (19):

$$o = -B \pm \sqrt{B^2 + 4AC} / 2A$$





Рисунок 4 – Расчетная схема обычной балки Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Design diagram of a conventional beam Source: compiled by the authors.

Здесь $A = tg\lambda = tg(2\alpha / \omega)$. Параметр α_{ob} – коэффициент, характеризующий степень влияния сил сопротивления на свободные колебания, определяется формулой (20):

$$\alpha_{ob} = \frac{\delta\omega}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}$$

Круговая частота обычной балки на основании зависимости (21):

$$\omega = \frac{9,876}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}} =$$
$$= \frac{9,876}{1200^2} \sqrt{\frac{2100000 \cdot 40979}{0,83}} = 2,2^{-1}.$$

Следовательно,

$$\alpha_{ob} = \frac{0,30 \cdot 2,2}{\sqrt{4 \cdot 3,14^2 + 0,3^2}} = 0,104928.$$

Наконец,

$$A = tg \frac{2\alpha}{\omega_{o\delta}} = \frac{2 \cdot 0,104928}{2,2} = tg 0,0953891 = 0,0956794.$$

Параметры

$$B = 2\alpha_{o\delta} = 2 \cdot 0,104928 = 0,209856:;$$

$$C = tg\lambda\omega_{o\delta}^{2} = tg\frac{2\alpha}{\omega_{o\delta}}\omega_{o\delta}^{2} =$$

$$= 0,0956794 \cdot 4,84 = 0,463.$$

С учетом A, B, C угловая скорость обычной балки

 $o = \frac{-0,209856 \pm \sqrt{0,209856^2 + 4 \cdot 0,0956794 \cdot 0,463}}{2 \cdot 0,0956794} = 1,3613296 \text{ pag/cek.}$

Таким образом, усилие P_g , создающее вибрационную нагрузку в обычной балке (см. рис.4) по зависимости (9):

$$P_g = m * o^2 \rho =$$

= 500 · 1,36133² · 2 = 1853,2 ке.

Момент усилий вибрационной нагрузки, вызванный усилием P_a ,

$$M_g = P_g \cdot \cos o \cdot t \cdot a.$$

Здесь a – расстояние от центра тяжести механизма до горизонтального уровня покрытия, a = 40 см; t – продолжительность работы механизма. Предположим, что t = 24 часа = 86400 сек. В таком случае $M_g = 1853, 2 \cdot \cos(1,36133 \cdot 86400) \cdot 40 = = 1853, 2 \cdot \cos 117618 \cdot 40 =$

 $=1853,2 \cdot -0,7 \cdot 4052193 = -52193_{K2} \cdot CM.$

Прогиб в балке от усилий вибрационной нагрузки в соответствии с зависимостью (13):

$$y = \left[\frac{\delta_{1p}P}{(1 - \frac{O_{o\delta}}{D_{o\delta}}^{2})}\right](\cos O_{o\delta}t - \frac{O_{o\delta}}{W_{o\delta}}\cos W_{o\delta}t) = \\ = \left[\frac{0,000418 \cdot 1853,2}{(1 - \frac{1,36133^{2}}{2,2^{2}})}\right](\cos(1,36133 \cdot 86400) - \\ -\frac{1,36133}{2,2^{2}}\cos(2,2 \cdot 86400)) = -0,464 \,\mathrm{CM}.$$



Здесь δ_{1P} – прогиб в балке от единичного нагружения,

$$\delta_{1p} = \frac{l^2}{48EI_x} = \frac{1200^3}{48 \cdot 2100000 \cdot 40979} = 0,00041833$$
 см.

Суммарный изгибающий момент в балке

$$\sum M = M_g + M_{pg} - \frac{M_q}{2} = \frac{ql^2}{8} + \frac{P_gl}{4} - \frac{M_g}{2} =$$
$$= \frac{18 \cdot 1200^2}{8} + \frac{1853, 2 \cdot 1200}{4} - \frac{52193}{2} =$$
$$3240000 + 555960 - 2696 =$$
$$= 32929864 \text{ Ke} \cdot \text{cm}.$$

Суммарный прогиб в балке

$$\sum y = y_q \cdot \mu(t) + y_p - y_{M_g}.$$

Здесь $\mu(t)$ - динамический коэффициент

$$\mu(t) = \frac{1}{(1 - \frac{o^2}{\omega^2})} (\sin ot - \frac{o}{\omega} \sin \omega t) =$$
$$= \frac{1}{(1 - \frac{1,36133^2}{2.2^2})} (\sin 1.36133 \cdot 86400) - \frac{1,36133}{2.2^2} \sin 2,2 \cdot 86400)) = 1,776 \cdot$$

Следовательно,

$$\sum y = \frac{5}{384} \cdot \frac{18 \cdot 1200^4}{2100000 \cdot 40979} \cdot 1.9 - 0.464 \pm 0.008 \frac{52193 \cdot 1200^2}{2100000 \cdot 40979} = 5.648 \cdot 1.776 - 0.464 + 0.006989 = 9.547 \text{ cm.}$$

Действующие напряжения в обычной балке:

- от равномерно распределенной нагрузки *q* = 18 кг / см.

$$σ_q = \frac{3240000 \cdot h}{40979 \cdot 2} = \frac{3240000 \cdot 69}{81958}$$

$$= 2727 \text{ ke/cm}^2;$$

- от динамического воздействия в виде механизма массой 500 кг.

$$\sigma_g = \frac{(555960 - 26096) \cdot 69}{40979 \cdot 2} = 2727$$
 кг / см².

Суммарное напряжение

$$\sum \sigma = \sigma_q + \sigma_g = 2727 + 446 = 3173$$
 кг / см².

Вывод: обычная балка пролетом l = 1200 см, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой q = 18 кг / см и находящаяся под воздействием динамической нагрузки массой 500 кг, не обладает необходимой несущей способностью по критерию первого и второго предельного состоянии. $\sum \sigma = 3173 > R_y = 2300$ КН / см². y/l = 9,574/1200 = 0,007978.

Суммарное напряжение

$$\sum \sigma = \sigma_q + \sigma_g = 2727 + 446 = 3173$$
 ке / см².

Вывод: обычная балка пролетом l = 1200 см, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой q = 18 кг/см и находящаяся под воздействием динамической нагрузки массой 500 кг, не обладает необходимой несущей способностью по критерию первого и второго предельного состоянии $\sum \sigma = 3173 > R_y = 2300 \ kH / cm^2$. y/l = 9,574/1200 = 0,007978 >> [y/l] = 0,005.

Балка, предварительно напряженная, с шарнирными опорами нагружена равномерно распределенной нагрузкой q = 18 кг/см и вибрационной массой P = 500 кг (рисунок 5)

Круговая частота, согласно формулы (22):

$$\omega_{pr} = \frac{7,162}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}} =$$
$$= \frac{7,162}{1200^2} \sqrt{\frac{2100000 \cdot 40979}{0,86}} = 1.573 \text{ c}^{-1}.$$

Коэффициент, характеризующий степень влияния сил сопротивления

$$\alpha_{pr} = \frac{\delta\omega_{pr}}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} = \frac{0.3 \cdot 1.573}{6.2947} = 0.075$$

Параметры угловой скорости:



Рисунок 5 – Расчетная схема предварительно напряженной балки Источник: составлено авторами.

> Figure 5 – Design diagram of a prestressed beam Source: compiled by the authors.

$$\begin{split} \lambda_{pr} &= 2 \cdot \alpha_{pr} / \omega_{pr} = 2 \cdot 0,075 / 1,573 = 0,09539 ; \\ A &= tg\lambda = tg0,09539 = 0,09568 ; \\ B &= 2 \cdot \alpha_{pr} = 2 \cdot 0,075 = 0,15 ; \\ C &= tg \frac{2 \cdot \alpha_{pr}}{\omega_{pr}} \cdot \omega_{pr}^2 = tg0,09539 \cdot 1,573^2 = \\ &= 0,09568 \cdot 2,47433 = 0,2367. \end{split}$$

Угловая скорость

$$o_{pr} = \frac{-0.15 \pm \sqrt{0.15^2 + 4 \cdot 0.09568 \cdot 0.2367}}{2 \cdot 0.09568} = 0.973$$
 рад / сек.

Сосредоточенная вибрационная нагрузка,

$$P_{pg} = m^* o_{pr}^{2} \rho = 500 \cdot 0,973^2 \cdot 2 = 946,73 \ \kappa z.$$

Прогиб балки от вибрационной сосредоточенной нагрузки

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta_{1p} P_{pg}}{(1 - \frac{\sigma_{pr}^2}{\sigma_{pr}^2})} \end{bmatrix} (\sin \sigma_{pr} \cdot t - \frac{\sigma_{pr}}{\omega_{pr}} \sin \omega_{pr} \cdot t) = \\ = \begin{bmatrix} \frac{0,0004183 \cdot 946,73}{(1 - \frac{0,793^2}{1,573^2})} \end{bmatrix} (-0,969254 - 0.00057) = 0.00057 \end{bmatrix}$$

Прогиб балки от усилий предварительного напряжения

$$f_o = -\frac{M_o \cdot l^2 \cdot 1,7466}{8,3 \cdot EI_x}.$$

Момент усилий предварительного напряжения

$$M_o = \frac{R_y AhK^2}{(K+1)^2 (K+2)} =$$

$$=\frac{2300\cdot52\cdot69\cdot1,175^2}{2,175^2\cdot3,175}=758566\ \kappa c\cdot cM.$$

В таком случае прогиб от усилий предварительного напряжения

$$f = -\frac{758566 \cdot 1200^2 \cdot 1,7466}{8,3 \cdot 2100000 \cdot 40979} = -2,67 \cdot cm.$$

Прогиб от равномерно распределенной на-грузки

$$y_q = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI_x} =$$

= 0,013 \cdot \frac{18 \cdot 1200^4}{210000 \cdot 40979} = 5,647 \cdot cm.

Вибрационный момент

$$M_g = P \cos o \cdot t \cdot a = 946,73 \cdot \cos(0,973 \cdot 86400) \cdot 40 = -9318,1 \ \text{K2} \cdot \text{CM} \,.$$

Прогиб от вибрационного момента

$$y_{Mg} = -0,008 \frac{M_g l^2}{EI_x} = -$$

= -0,008 $\frac{9318,1 \cdot 1200^2}{2100000 \cdot 40979} =$
= -0,001247. *cm*.

Динамический коэффициент

$$\mu(t)_{g} = \frac{1}{(1 - \frac{o_{pr}}{\omega_{pr}}^{2})} (\sin o_{pr} t - \frac{o_{pr}}{\omega_{pr}} \sin \omega t) =$$

= 1,6197 \cdot (-0,96925 - 0,618563 \cdot 0,945715) =
= 2,148.

Суммарный прогиб в балке, предварительно напряженной вытяжкой стенки

$$\sum y = y - f_0 \cdot \mu(t) + y_q \cdot \mu(t) + y_g =$$

= (-0,621 - 2,64 + 5,647 - 0,0124)2.148 =
= (-1,333 - 5,67 + 12,129 - 0,0266) = 5.1cm

Отметим, что выгиб балки от усилий предварительного напряжения $f_o = -2,67$ см снижает прогиб ее $y_q - 5,647$ в 2,1 раза.

Напряженное состояние предварительно напряженных балок. Как отмечено в работе [24], предварительно напряженная балка представляет собой биметаллическую конструкцию с поясами из высокопрочной стали С440 и стенкой из малоуглеродистой стали С235. На стадии изготовления балок по их поперечному сечению получена эпюра нормальных напряжений, вектор которых направлен в сторону, противоположную вектору напряжений, вызванных внешней нагрузкой.

В верхней зоне стенки балок

$$\sigma_{wv} = -\frac{2KR_y}{2K+1} = -\frac{2 \cdot 1,175 \cdot 2300}{2 \cdot 1,175 + 1} =$$
$$= -1612\kappa c/cm^2.$$

Нижней зоне

$$\sigma_{\rm wn} = \frac{KR_y}{2K+1} = 806\kappa c/cm^2.$$

Напряжения в балке от внешней нагрузки

$$\sigma_q = \frac{M_q}{W_x} = \frac{qI^2 \cdot h}{8 \cdot 2I_x} = \frac{18 \cdot 1200^2 \cdot 69}{8 \cdot 2 \cdot 40979} = 2727 \kappa c/cm^2.$$

Напряжения в балке, вызванные вибрационной сосредоточенной нагрузкой $P_{g} = 946,73 \ \kappa c$.

$$\sigma_g = \frac{P_g l \cdot 69}{4 \cdot 2 \cdot 40979} = \frac{946.73 \cdot 1200 \cdot 69}{40979 \cdot 8} = 239,1 \kappa c / cm^2.$$

Напряжение в балке от вибрационного момента

$$M_g = P_g \cos ot \cdot a =$$

= 946,73 \cdot \cos 0,973 \cdot 86400 \cdot 40 =
= 946,73 \cdot (-0,246) \cdot 40 = -9315,82 \kappa c \cdot cm \cdot 40

Следовательно,

$$\sigma_{n1} = -\frac{M_g}{W_r} = \frac{9315,82 \cdot 69}{2 \cdot 40979} = -7,843 \, \kappa_2 \, / \, c_M^2 \, .$$

Суммарные напряжения

$$\sum \sigma = -\sigma_{wv} + \sigma_{q} + \sigma_{g} + \sigma_{g1} =$$

= -1612 + 2727 + 239,1 - 7,843 =
= 1346,257 \kappa c/cm^{2}.

Заметим, что предварительное напряжение $\sigma_{wv} = -1612kH/cM^2$ снижает суммарные нормальные напряжения, вызванные внешней равномерно распределенной и вибрационной нагрузками ($\sigma_a + \sigma_e - \sigma_{e1}$) = 2958 kH/cM^2 в 1,8 раз $\psi = \sum \sigma / \sigma_{wn}$ = 2958.1612=1,8). Предварительно напряженная балка

Предварительно напряженная балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой q = 18 кг / см, вибрационной нагрузкой массой 500кг, жестко закрепленная в опорных узлах

Круговая частота балки на основании зависимости (23):



Рисунок 6 – Расчетная схема и нагрузки на предварительно напряженную балку, жестко закрепленную на опорах Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Design diagram and loads on a prestressed beam rigidly fixed to supports Source: compiled by the authors.

 $\omega_g = \frac{1,7689}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}} =$ $= \frac{1,7689}{1200^2} \sqrt{\frac{2100000 \cdot 40979}{0,86}} = 0,38858c^{-1}.$

Коэффициент, характеризующий влияние сил сопротивления

$$\alpha_g = \frac{\delta \omega_g}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} = \frac{0.3 \cdot 0.38858}{\sqrt{4 \cdot 9.8696 + 0.09}} = 0.018533.$$

Параметры угловой скорости

$$\begin{split} \lambda_g &= 2\alpha_g \,/\, \omega_g = 2 \cdot 0,018533 \,/\, 0,38858 = \\ &= 0,0954; \\ A &= tg\lambda_g = 0,0957; \\ B &= 2\alpha_g = 2 \cdot 0,018533 = 0,037; \\ C &= tg\lambda_g \omega_g = tg(0,0954) \cdot 0,38858^2 = \\ &= 0,0956797 \cdot 0144 = 0,0144. \end{split}$$

Угловая скорость

$$o_g = \frac{-0.037 \pm \sqrt{0.037^2 + 4 \cdot 0.0957 \cdot 0.0144}}{2 \cdot 0.0957} = 0.2 \, pad / сек.$$

Динамическая сосредоточенная сила (см. рисунок 6)

$$P_{pg} = m^* o_g^2 \rho = 500 \cdot 0.2^2 \cdot 2 = 40.0 \ \kappa c.$$

Прогиб в балке от динамической силы $P_{_{pg}}$

$$w_{pg} = \frac{\delta_{1p} P_{pg}}{(1 - \frac{\sigma_g^2}{\omega_g})} (\sin \sigma_g t - \frac{\sigma_g}{\omega_g} \sin \omega_g t) =$$
$$= \frac{0,00041833 \cdot 40}{(1 - \frac{0,2^2}{0,38858^2})} (\sin 0,2 \cdot 86400 - \frac{0,2}{0,38858}) - \frac{0,2}{0,38858} \sin 0,38858 \cdot 86400) =$$
$$= 0,0148$$

Динамический коэффициент

$$\mu(t) = 0.887$$
.

Выше установлено, что момент усилий предварительного напряжения

$$M_0 = 7585666, 6 \kappa 2 \cdot c M$$
.

Момент усилий динамической нагрузки

$$M_{pg} = P_{pg} \cos o_{pg} t \cdot a =$$

= 40 \cdot \cdot \cdot \cdot 0 \cdot 2 \cdot 86400 \cdot 40 =
= 40(0,324) \cdot 40 = 518,4 \kappa \cdot \cdo

Момент от сосредоточенной динамической нагрузки

$$M_{pg1} = \frac{P_{pg}l}{4} = \frac{40 \cdot 1200}{4} = 12000 \, \text{ke} \cdot c_{M}$$

Опорный момент на основании выражения (7):



$$M_{op} = [\frac{ql^2}{12} - M_o - \frac{M_g}{12} + \frac{P_gl}{8}]$$

Момент усилий предварительного напряжения представлен в работе [24].

$$M_{op} = \frac{ql^2}{12} - M_0 - \left(-\frac{M_{pg}}{12}\right) + \frac{P_{pg}l}{8} =$$

= $\frac{18 \cdot 1200^2}{12} - 758566,66 +$
+ $\frac{518,4}{12} + \frac{40 \cdot 1200}{8} =$
2160000 - $758566 + 43,2 + 6000 =$
= $1401477\kappa c \cdot cM$

Суммарный момент нагрузок в предварительно напряженной балке, жестко защемленной в опорных узлах

$$\sum_{p=1}^{M=-M_0-M_{op}+M_q+M_{pg}} - M_{pg1} = -758566 - 1401477 + 3240000 + 518,4 - 12000 = -1068475 \, \text{kz} \cdot \text{cm}.$$

Заметим, что предварительное напряжение совместно с опорным моментом снижают суммарный момент внешних нагрузок на 67%. Вибрационные нагрузки (M_{pg}, M_{pg1}) увеличивают суммарный момент внешних воздействий только лишь на 2%.

Прогиб балки от опорного момента $M_{\it on}$

$$y_{M_{op}} = -\frac{M_{op}l^2}{8EI_x} =$$
$$= -\frac{1410090 \cdot 1200^2}{8 \cdot 2100000 \cdot 40979} = -3,00 \text{ cm}.$$

Прогиб от момента усилий предварительного напряжения

$$f_o = -2,64$$
 см

Прогиб от равномерно распределенной нагрузки

$$y_a = 5,647$$
 см.

Результирующий прогиб в балке, жестко закрепленной на опорах с учетом коэффициента динамичности,

$$y^{0} = (-y_{M_{op}} - f_{0} + y_{q})\mu(t) =$$
$$= (-3,00 - 2,64 + 5,647) \cdot 0,887 = 0,007 cM.$$

Наглядно видно, что прогибы от опорного момента и момента усилий предварительного напряжения $(-y_{M_{op}} - f_0) = -5,64 \ cm$ равны прогибу, вызванному равномерно распределенной нагрузки ($y_q = 5,647 \ cm$). Прогиб от сосредоточенной вибрационной нагрузки (см. расчет выше)

$$y_{po} = 0,0148 \ CM$$
.

Прогиб от вибрационного момента $M_{_{pg}}$

$$y_{pg1} = -0,008 \frac{M_{pg1}l^2}{EI_x} =$$
$$= -0,008 \frac{518,4 \cdot 1200^2}{2100000 \cdot 40979} =$$
$$= -0,000328 cm.$$

Таким образом, прогиб в предварительно напряженной балке, жестко закрепленной на опорах

$$\sum y = y^0 + y_{pg} - y_{pg1} =$$

= 0,007 + 0,0148 - 0,0000328 = 0,084 cm

Вывод: усилие предварительного напряжения M_0 совместно с опорным моментом в узлах балки M_{op} позволяют практически исключить прогибы балки. Вибрационная нагрузка не оказывает влияния на перемещения пред-

варительно напряженной балки. Нормальные напряжения в предварительно напряженной балке, жестко закрепленной в опорных узлах

Нормальные напряжения от опорного момента

$$\sigma_{M_{op}} = -\frac{M_{op}}{W_x} = -\frac{1410090 \cdot 69}{2 \cdot 40979} =$$
$$= -1187.14 \kappa c/c M^2.$$

Напряжения от усилий предварительного напряжения – верхняя область стенки –

$$\sigma_{wv} = -\frac{R_y 2K}{2K+1} = -\frac{2300 \cdot 2 \cdot 1,175}{(2 \cdot 1,175+1)} =$$
$$= -1613,44\kappa c/cm^2.$$

Табпица

PART III

Вибрационные параметры балок Коэффициенты динамичности μ, круговая частота Φ, угловая скорость Φ, прогибы у и напряжения σ приняты из раздела «Практическая реализация теоретических положений расчета вибрационной надежности предварительно напряженных стальных балок» настоящей статьи

Источник: составлено авторами.

Table

Vibration parameters of beams

μ dynamic coefficients, ω circular frequency, o angular velocity, y deflections and stresses are taken from the 'Practical implementation of the theoretical provisions for calculating the vibration reliability of prestressed steel beams' section of this article:

Source: Source: compiled by the authors.

Балки	μ	ω, c ⁻¹	о, рад/с	у,см	σ кН/см²
Б	1,776	2,2	1,363	9,574	3173,7
ПН	2,148	1,573	0,973	5,1	1346,7
пнж	0,887	0,38858	0,2	0,84	-83,0

Напряжения от равномерно распределенной нагрузки

$$\sigma_{q} = \frac{ql^{2} \cdot h}{8 \cdot 2 \cdot I_{x}} = \frac{18 \cdot 1200^{2} \cdot 69}{8 \cdot 2 \cdot 40979} = 2727 \kappa c/cm^{2}.$$

Результирующие нормальные напряжения в балке от опорного момента, момента усилий предварительного напряжения и равномерно распределенной нагрузки с учетом динамического коэффициента

$$\sigma^{0} = (-\sigma_{M_{op}} - \sigma_{wv} + \sigma_{q})\mu(t) =$$

= (-1187,14 - 1613 + 2727) \cdot 0,8869 =
= -73,0\kappa 2 / cm^{2}.

Напряжения от сосредоточенной вибрационной нагрузки $P_{n\sigma}$

$$\sigma_{\rm pg} = -12000 \cdot 69 / 2 \cdot 40970 = -10,1 \kappa_{\rm C} \cdot c_{\rm M},$$

Напряжение от вибрационного момента $M_{{\scriptscriptstyle {\rm no1}}}$

$$\sigma_{pg1} = \frac{40 \cdot 69}{2 \cdot 40979} = 0,0336 \kappa c / cm^2$$

Суммарные нормальные напряжения

$$\sum \sigma = -\sigma^{0} - \sigma_{pg} + \sigma_{pg1} =$$

= -73 - 10,1 + 0,0336 = -83 \kappa c/cc²

Полученный результат свидетельствует о том, что опорный момент и усилия предвари-

тельного напряжения позволяют получить по поперечному сечению предварительно напряженной балки с жесткими опорными узлами нормальные напряжения, вектор которых противоположен вектору напряжений, вызванных равномерно распределенной нагрузкой. Это означает, что балка обладает большим запасом несущей способности.

Параметры вибрационной прочности обычных, предварительно напряженных шарнирно закрепленных и предварительно напряженных с жесткими опорами, показаны в таблице.

Анализ таблицы свидетельствует о том, что круговая частота ω предварительно напряженных балок, шарнирно закрепленных в опорных узлах по сравнению с круговой частотой обычных балок, снижается в 1,4 раза и в 5,6 – в балках с жесткими опорами.

Угловая скорость снижается, соответственно, в 1,4 (шарнирные опоры) и 6,8 (жесткие опоры). Прогибы преднапряженных балок снижаются в 1,87 и 11,9 раз. Наблюдается многократное снижение нормальных напряжений.

Примечания: Б–обычные балки: ПН– балки, предварительно напряженные с шарнирными опорами: ПНЖ – то же, с жесткими опорами.

Результаты таблицы закономерны. Известно [25, 26], что круговая частота определяется выражением

$$\omega^{2} = \frac{\sum \int \frac{\sum M^{2} dx}{EI_{x}}}{\sum \int \sum y^{2} \mu dx}$$



Снижение суммарных статических моментов внешних нагрузок и прогибов в предварительно напряженных балках сопровождается снижением в них круговой частоты колебательного процесса. Поскольку выражение круговой частоты ω является составной частью угловой скорости O(17)–(19), то и она снижается в исследуемых балках. Вспомним, что круговая частота ω является показателем изменения в радианах радиуса кривизны (1/r) изгибаемого элемента, который, в свою очередь, находится в прямой зависимости от дифференциального уравнения изогнутой оси балок.

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI_x}.$$

Однократное интегрирование дифференциального уравнения

$$\int \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{EI_x} \int M dx$$

позволяет получить угол наклона касательной к кривой изгиба оси балки или углы поворота поперечных сечений балок. Снижение суммарных моментов, действующих на предварительно напряженную балку, влечет за собой снижение поворотов сечения конструкций, что является характеристикой снижения прогибов и напряжений в изогнутом элементе.

выводы

Стальные биметаллические балки, предварительно напряженные вытяжкой стенки, имеют повышенную вибрационную надежность. Особой надежностью обладают балки, жестко закрепленные на опорах, которые могут быть рекомендованы для применения их в узлах разных зданий и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Масленников А.М., Сухотерин М.В. [и др.] Сравнительный анализ определения частот собственных колебаний прямоугольных панелей с защемленными свободными краями // Вестник гражданских инженеров.2022. №2 (91). С.45–57.

2. Розенцвейг Л.М. Метод вычисления частот собственных колебаний упругих стержней прямым интегрированием. Каган дифференциального уравнения изгиба // Вестник гражданских инженеров. 2019. №1(72). С.61–66.

3. Соколов В.Г., Дмитриев А.В. Свободные колебания подземных прямолинейных тонкостенных участков газопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2019.№ 2(73). С. 29–34. 4. Нестерова О.П. Особенности расчета сооружений с динамическими гасителями колебаний по акселерограммам проектных землетрясений // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2 (73). С. 48–53.

5. Соколов В.Г., Огородникова Ю.В. Колебания подземных тонкостенных магистральных трубопроводов с учетом внутреннего давления и продольной силы // Вестник гражданских инженеров. № 5(76). 2019. С. 105–112.

6. Нгуен Х. Х. Определение частот свободных колебаний пологих оболочек на прямоугольном плане и сравнение аналитических и численных результатов // Вестник гражданских инженеров. 2014. №1(42). С. 44–48.

7. Березнев А.В. Влияние внутреннего рабочего давления на частоты свободных колебаний криволинейных участков полиэтиленовых трубопроводов // Вестник гражданских инженеров. 2015. №(50). С. 101–104.

8. Чернов Ю.Т. Проектирование зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №4. С.73–77.

9. Турков А. В., Ветрова О. А, Марфин К. В. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных ферм на квадратном плане с различными схемами опирания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №11. С. 42–45.

10. Мкртычев О. Р.,Булушев С. В. Вероятностный анализ работы плоской стальной рамы при сейсмическом воздействии // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 45–50.

11. Гусев Б. В., Саурин В. В. О моделировании изгибных колебаний балок переменного поперечного сечения // Промышленное и гражданское строительство.2020. №11. С. 94–98.

12. Зедгенизов В.Г., Файзов С.Х. Влияние точки приложения вынуждающей силы в двухмассовой колебательной системе на ее энергоэффективность // Вестник СибАДИ. 2023;20(1):12-23. https:// doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23

13. Корытов М.С., Щербаков В.С., Беляков В.Е. Моделирование и исследование колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном // Вестник СибАДИ. 2019;16(5):526-533. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2019-5-526-533

14. Сухарев Р.Ю., Танский В.В. Анализ влияния координат точек крепления уравновешивающего каната на колебательность груза на стреле крана-трубоукладчика // Вестник СибАДИ. 2018;15(2):199-206. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-199-206

15. Кравчук В. А. Свободные колебания стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки // Вестник гражданских инженеров. 2020. 6 (83). С. 97–103.

16. Кравчук В.А. Динамические параметры несущей способности стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой тонкой стенки при жестком закреплении их на опорах // Вестник гражданских инженеров. 2021. №6 (89). С. 72–77. 17. Кравчук В.А., Кравчук Е.В. Работа тонкостенных стальных стержней, предварительно напряженных вытяжкой стенки, при случайных динамических воздействиях // Вестник гражданских инженеров. 2022. №6 (95). С. 10–20.

18. Song S., Qian Y., Liu J., Xie X., Wu G. Time-variant fragility analysis of the bridge system considering time-varying dependence among typical component seismic demands // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2019. Vol. 18. Issue 2. Pp. 363- 377.

19. Du Y., Hao J., Yu J., Yu H., Deng B., Liang Z. Seismic performance of a repaired thin steel plate shear wall structure // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 151. Pp. 194-203

20. 20.Jalali S. A., Darvishan E. Seismic demand assessment of self-centering steel plate shear walls // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 162. 105738

21. Mu Z., Yang Y. Experimental and numerical study on seismic behavior of obliquely stiffened steel plate shear walls with openings // Thin-Walled Structures. 2020. Vol. 146. 106457

22. Zhong S. C., Oyadiji S. O. Analytical predictions of natural frequencies of cracked simply supported beams with a stationary roving mass // Journal of Sound and Vibration. 2008. Vol. 311 (1-2). Pp. 328-352. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.09.00923

23. .Lien T. V., Duc N. T., Khiem N. T. Free and forced vibration analysis of multiple cracked FGM multi span continuous beams using dynamic stiffness method // Latin American Journal of Solids and Structures. 2019. Vol. 16 (2). Pp. 1-26. DOI: 10.1590/1679-78255242

24. Кравчук В. А. Стальные стержни, предварительно напряженные без затяжек. М.: АСВ, 2015. 550 с.

REFERENCES

1. Maslennikov A. M., Sukhoterin M. V. et al. Sravnitel'nyy analiz opredeleniya chastot sobstvennykh kolebaniy pryamougol'nykh paneley s zashchemlennymi svobodnymi krayami [Comparative analysis of determining the natural vibration frequencies of rectangular panels with clamped free edges]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2022; No. 2(91): 45-57. (in Russ.)

2. Rosenzweig L. M. Metod vychisleniya chastot sobstvennykh kolebaniy uprugikh sterzhney pryamym integrirovaniyem differentsial'nogo uravneniya izgiba [Method for calculating the natural frequencies of elastic rods by direct integration of the Kagan differential equation of bending]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers.* 2019; 1(72): 61-66. (in Russ.)

3. Sokolov V. G., Dmitriev A. V. Kolebaniya podzemnykh tonkostennykh magistral'nykh truboprovodov s uchetom vnutrennego davleniya i prodol'noy sily. [Free vibrations of underground rectilinear thinwalled sections of gas pipelines]. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers. 2019; 2 (73): 29-34. (in Russ.) 4. Nesterova O. P. Osobennosti rascheta sooruzheniy s dinamicheskimi gasitelyami kolebaniy po akselerogrammam proyektnykh zemletryaseniy. [Features of calculation of structures with dynamic vibration dampers based on accelerograms of design earthquakes]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 2(73): 48-53. (in Russ.)

5. Sokolov V. G., Ogorodnikova Yu. V. Kolebaniya podzemnykh tonkostennykh magistral'nykh truboprovodov s uchetom vnutrennego davleniya i prodol'noy sily. [Oscillations of underground thin-walled main pipelines taking into account internal pressure and longitudinal force]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 5 (76): 105-112. (in Russ.)

6. Nguyen H. H. Opredeleniye chastot svobodnykh kolebaniy pologikh obolochek na pryamougol'nom plane i sravneniye analiticheskikh i chislennykh rezul'tatov [Determination of the frequencies of free vibrations of shallow shells on a rectangular plan and comparison of analytical and numerical results]. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – *Bulletin of Civil Engineers*. 2014; 1(42): 44-48. (in Russ.)

7. Bereznev A.V. Vliyaniye vnutrennego rabochego davleniya na chastoty svobodnykh kolebaniy krivolineynykh uchastkov polietilenovykh truboprovodov [Influence of internal working pressure on the frequencies of free vibrations of curved sections of polyethylene pipelines]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers.* 2015; (50): 101-104. (in Russ.)

8. Chernov Yu. *T.* Proyektirovaniye zdaniy i sooruzheniy, podvergayushchikhsya dinamicheskim vozdeystviyam. [Design of buildings and structures subject to dynamic influences]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo.* 2018; 4: 73-77. (in Russ.)

9. Turkov A.V., Vetrova O.A, Marfin K.V. Progiby i chastoty sobstvennykh kolebaniy sistem perekrestnykh ferm na kvadratnom plane s razlichnymi skhemami operaniya [Deflections and natural oscillation frequencies of cross-truss systems on a square plan with various support schemes]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018; 11: 42–45. (in Russ.)

10. Mkrtychev O. R., Bulushev. Veroyatnostnyy analiz raboty ploskoy stal'noy ramy pri seysmicheskom vozdeystvii. [Probabilistic analysis of the operation of a flat steel frame under seismic influence]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo.* 2020; 5: 45-50. (in Russ.)

11. Gusev B.V., Saurin V.V. O modelirovanii izgibnykh kolebaniy balok peremennogo poperechnogo secheniya [On modeling of bending vibrations of beams of variable cross-section]. *Industrial and Civil Construction*. 2020; 11: 94-98. (in Russ.)

12. Zedgenizov V.G., Faizov S.Kh. Impact of force application point in two-mass oscillation system on its energy efficiency. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(1):12-23. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-12-23

13. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Belyakov V.E. Fluctuations of the cargo transported by lifting crane: simulation and analysis. *The Russian Automo*- *bile and Highway Industry Journal*. 2019;16(5):526-533. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-5-526-533

14. Sukharev R.Y., Tanskiy V.V. Influence analysis of the attachment coordinates relating to the cargo oscillations on the pipe laying crane's boom. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2018;15(2):199-206. (In Russ.) https://doi. org/10.26518/2071-7296-2018-2-199-206

15. Kravchuk V. A. Svobodnyye kolebaniya stal'nykh balok, predvaritel'no napryazhennykh vytyazhkoy stenki [Free vibrations of steel beams prestressed by drawing the wall]. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83): 97-103. (in Russ.)

16. Kravchuk V.A. Dinamicheskiye parametry nesushchey sposobnosti stal'nykh balok, predvaritel'no napryazhennykh vytyazhkoy tonkoy stenki pri zhestkom zakreplenii ikh na oporakh. [Dynamic parameters of the load-bearing capacity of steel beams prestressed by stretching a thin wall when rigidly fastened to supports]. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers. 2021; 6 (89): 72-77. (in Russ)

17. Kravchuk V. A., Kravchuk E. V. Rabota tonkostennykh stal'nykh sterzhney, predvaritel'no napryazhennykh vytyazhkoy stenki, pri sluchaynykh dinamicheskikh vozdeystviyakh. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers. 2022; 6(95):10-20. (in Russ.)

18. Song S., Qian Y., Liu J., Xie X., Wu G. Time-variant fragility analysis of the bridge system considering time-varying dependence among typical component seismic demands. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2019; Vol. 18. Issue 2: 363-377.

19. Du Y., Hao J., Yu J., Yu H., Deng B., Lv D., Liang Z. Seismic performance of a repaired thin steel plate shear wall structure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 151: 194-203

20. Jalali S. A., Darvishan E. Seismic demand assessment of self-centering steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 162: 105738

21. Mu Z., Yang Y. Experimental and numerical study on seismic behavior of obliquely stiffened steel plate shear walls with openings. *Thin-Walled Structures*. 2020; 146: 106457

22. Zhong S. C., Oyadiji S. O. Analytical predictions of natural frequencies of cracked simply supported beams with a stationary roving mass. *Journal of Sound and Vibration*. 2008; 311 (1-2): 328-352. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.09.00923

23. Lien T. V., Duc N. T., Khiem N. T. Free and forced vibration analysis of multiple cracked FGM multi span continuous beams using dynamic stiffness method. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2019; 16 (2): 1-26. DOI: 10.1590/1679-78255242

24. Kravchuk V. A. Stal'nyye sterzhni, predvaritel'no napryazhennyye bez zatyazhek [Steel rods, prestressed without tightening.] Moscow, ASV, 2015. 550 p. (in Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кравчук Е. В. Руководство темой исследования. Формирование целей и задачи исследования. Анализ состояния вопроса. Подготовка материала для статьи.

Белуцкий И. Ю. Консультирование по вопросам применения стальной балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки, в экстремальных условиях мостостроения. Анализ состояния вопроса. Подготовка материала для статьи.

Кравчук В. А. Сбор библиографической информации. Оформление статьи.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Evgenii V. Kravchuk. Research topic management. Purposes and objectives of the study statement. State of the issue analysis. Material for the article preparation.

Igor Yu. Belutskii. Consulting on the use of a steel beam, prestressed by drawing a wall, in extreme conditions of bridge construction. State of the issue analysis. Material for the article preparation.

Valerii A. Kravchuk. Collection of bibliographic information. Article outline.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравчук Евгений Валерьевич – ст. преподаватель кафедры «Строительство»; ст. преподаватель кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Тихоокеанского государственного университета, SPIN-код: 2325-0177.

Белуцкий Игорь Юрьевич – доц., проф. кафедры «Автомобильные дороги», SPIN-код: 4125-7182.

Кравчук Валерий Андреевич – проф., проф. кафедры «Промышленное и гражданское строительство», SPIN-код: 3004-5213.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgenii V. Kravchuk – Senior Lecturer, the Construction Department of the Far Eastern State University of Communications, Senior Lecturer, the Industrial and Civil Engineering Department of the Pacific State University, SPIN: 2325-0177

Igor Yu. Belutskii – Associate Professor, Professor of the Roads Department, Pacific State University, SPIN-code: 4125-7182

Valerii A. Kravchuk – Professor, the Industrial and Civil Engineering Department, Pacific State University, SPIN-code: 3004-5213.