

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 6. С. 201–213.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (6): 201–213.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.178.311.62

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-201-213

EDN: VKRYUG

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ СТАЛЕБЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ

Владимир Иванович Ерофеев¹, Павел Алексеевич Хазов²,
Ирина Васильевна Шкода^{1,2}, Александр Сергеевич Торопов²

¹Институт проблем машиностроения РАН –
филиал Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Актуальность. Изучение свойств материалов под воздействием динамических нагрузок является важным аспектом для проведения сложных инженерных расчетов. Исследования влияния динамических нагрузок на сталебетонные конструкции приведут к разработке новых методов расчета и проектирования таких конструкций.

Цель исследования – изучить влияние продольной силы на динамическое поведение сталебетонного образца при различных мощностях динамического воздействия.

В исследовании применяются методы экспериментального моделирования при помощи современных измерительных устройств и последующая аналитическая обработка полученных результатов.

Научная новизна заключается в проведении экспериментального исследования динамического поведения сталебетонного образца при действии гармонической нагрузки различной мощности и характера приложения с учетом поэтапно увеличивающейся продольной сжимающей силы.

В результате исследования определены коэффициент затухания колебаний, коэффициент неупругой работы, необходимые при расчете динамических систем в околорезонансных зонах. Также приведены графики зависимости частоты свободных колебаний и амплитуды колебаний от величины продольной сжимающей силы и мощности импульса.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования результатов исследования для разработки новых методов расчета и проектирования сталебетон-

ных конструкций, а также оснащения баз данных программ численного моделирования информацией о свойствах сталебетона посредством натуральных испытаний.

Ключевые слова: динамические возмущения, продольная сила, сталебетон, гармонические колебания, частота колебаний, акселерометр

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИПМ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2024–2026 годы (тема ФФУФ-2024-0031, № 1023032800130-3-2.3.2).

Для цитирования: Ерофеев В.И., Хазов П.А., Шкода И.В., Торопов А.С. Динамические реакции сталебетонных стержней при гармонических нагрузках при действии продольной силы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 6. С. 201–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-201-213. EDN: VKRYUG

ORIGINAL ARTICLE

DYNAMIC RESPONSE OF STEEL-CONCRETE BARS AT HARMONIC AND LONGITUDINAL LOADS

Vladimir I. Erofeev¹, Pavel A. Khazov², Irina V. Skoda^{1,2}, Aleksandr S. Toropov²

¹Mechanical Engineering Research Institute RAS, Institute of Applied Physics RAS Affiliate, Nizhny Novgorod, Russia

²Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Material properties under dynamic loads are important to calculate for engineering applications. Investigation of dynamic loads of steel-concrete structures requires the development of new calculation and design techniques.

Purpose: The aim of the paper is to investigate the effect of longitudinal force on the dynamic behavior of steel-concrete bars under different dynamic loads.

Methodology: Experimental modelling based on up-to-date measuring devices and analytical processing of the obtained results.

Research findings: Vibration damping and inelastic work coefficients are determined for the dynamic system analysis in near-resonance zones. Dependences are suggested for the free oscillation frequency and amplitude, and the longitudinal compressive force and pulse power.

Practical implications: The results obtained can be used to develop new calculation and design techniques for steel-concrete structures and numerical simulation program data seed with steel-concrete properties through field tests.

Originality: Experimental research into the dynamic behavior of steel-concrete bars under different harmonic loading with regard to a stepwise increase of the longitudinal compressive force.

Keywords: steel-concrete, harmonic oscillations, longitudinal force, dynamic perturbations, oscillation frequency, accelerometer

Funding: The work was carried out within the state assignment to IAP RAS for fundamental scientific research for 2024-2026 (topic FFUF-2024-0031, No 1023032800130-3-2.3.2).

For citation: Erofeev V.I., Khazov P.A., Shkoda I.V., Toropov A.S. Dynamic Response of Steel-Concrete Bars at Harmonic and Longitudinal Loads. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and

Architecture. 2024; 26 (6): 201–213. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-6-201-213.
EDN: VKRYUG

Введение

В современном строительстве и технике широко распространены упругие конструкции сооружений, машин, технических устройств, испытывающие в реальных условиях колебания от различного рода динамических возмущений. В качестве материала таких конструкций благодаря своей прочности, долговечности и экономической эффективности может быть использован сталебетон. При проектировании подобных конструкций важно учитывать их динамическое поведение под воздействием различных нагрузок, особенно при гармонических воздействиях. Значительное влияние на динамический отклик сталебетонных стержней, а именно на частоту свободных колебаний, при воздействии на конструкцию поперечных возмущений оказывает продольная сила, приложенная к ней.

В настоящей статье рассматривается характер влияния этого фактора на динамическое поведение сталебетонного образца при различных мощностях динамического воздействия.

На данный момент существует большое количество работ, в основном посвященных изучению проблемы сопротивления динамическому возмущению железобетонных и стальных конструкций [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], в то время как работ, исследующих сталебетонные конструкции, крайне мало [10, 11], что является ограничивающим фактором для развития и применения сталебетона, несмотря на его потенциал и преимущества в инженерных конструкциях. Более глубокое изучение сталебетона поможет раскрыть возможности материала и способы оптимизации его использования.

Материалы и методы исследования

Испытания сталебетонного образца проводились в 3 этапа.

1. Статические испытания при действии осевой сжимающей нагрузки для определения критической силы потери устойчивости [12].

2. Динамические испытания центрально-сжатых образцов при действии однократно приложенного импульса.

3. Динамические испытания центрально-сжатых образцов при вынужденных колебаниях от действия многократно приложенного импульса.

На всех этапах экспериментальных исследований сталебетонный образец, состоящий из обоймы (стальная прямошовная электросварная труба) и сердечника (искусственный камень из цементно-песчаного раствора марки М100) длиной 700 мм и диаметром 76 мм, закреплялся шарнирно с двух концов в установке для статического нагружения сжимающей нагрузкой.

Общий вид схемы установки для испытания на воздействие однократного импульса представлен на рис. 1. В ходе испытания к свободному концу двутавровой балки 1 подвешивалась корзина 5, на которую поэтапно подавалась сжимающая нагрузка 6. Суммарная сжимающая нагрузка на образец не превышала его несущую способность, определенную на первом этапе исследований [12].

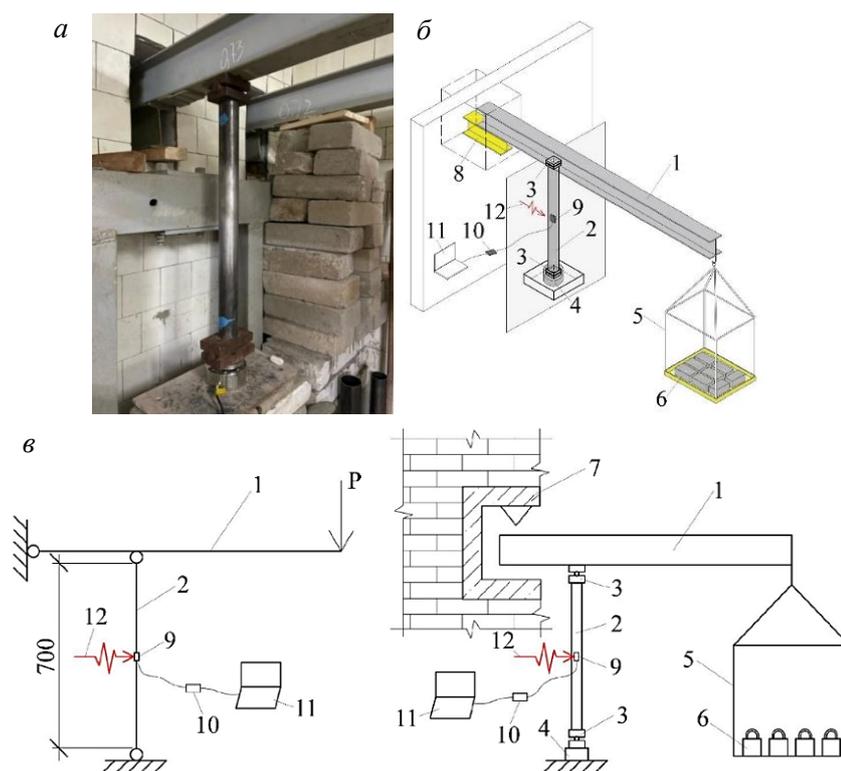


Рис. 1. Испытания центрально-сжатых образцов на определение собственных колебаний: *a* – общий вид; *b* – аксонометрическая схема экспериментальной установки; *в* – плоская схема и расчетная модель: 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – силомер; 5 – корзина; 6 – гири; 7 – усиленный ж/б пояс; 8 – страховочная конструкция; 9 – блок акселерометра; 10 – модуль обработки сигнала акселерометра; 11 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации; 12 – ударник для импульсного воздействия

Fig. 1. Axial compression of bars to determine natural vibrations: *a* – general view; *b* – axonometric view of the experimental setup; *c* – plane view and calculation model: 1 – loading lever; 2 – test specimen; 3 – cylindrical support joint; 4 – force meter; 5 – basket; 6 – weights; 7 – reinforced concrete binding strake; 8 – safety structure; 9 – accelerometer; 10 – accelerometer signal processing module; 11 – laptop for recording oscillograms and vibration measurements; 12 – impulse impact hammer

На всех ступенях загрузки возбуждение поперечных колебаний производилось с помощью пружинного ударника 12. Датчик акселерометра 9, прикрепленный в центре образца, снимал проекции кажущегося ускорения после каждого удара.

При однократном приложении импульса в образце возникают собственные колебания, при этом уравнение движения акселерометра можно записать через закон движения свободных колебаний:

$$y(t) = A \cdot e^{-\beta t} \cos(\omega t), \quad (1)$$

где A – начальная амплитуда колебаний, м; β – коэффициент затухания, c^{-1} ; ω – круговая частота, рад/с; t – время, с.

График затухающих колебаний, возбуждаемых при однократном импульсе, показан на рис. 2.

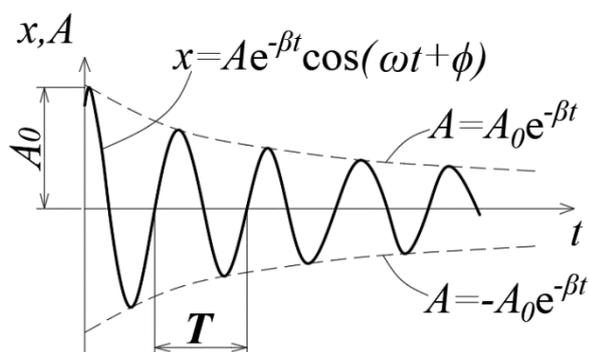


Рис. 2. График свободных затухающих колебаний:

$\beta = \text{const}$ – коэффициент затухания; $A = A_0 e^{-\beta t}$ – амплитуда затухающих колебаний; A_0 – начальная амплитуда; T – период затухающих колебаний

Fig. 2. Free damping vibrations:

$\beta = \text{const}$ – damping coefficient; $A = A_0 e^{-\beta t}$ – amplitude of damping vibrations; A_0 – initial amplitude; T – period of damped periodic vibrations

Логарифмический декремент затухания β в уравнении (1) вычисляется по формуле

$$\beta = \bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{0,2}{T} \ln \frac{x_j}{x_{j+5}} \right)_i, \quad (2)$$

где x_j – текущее пиковое значение перемещения, м; x_{j+5} – пятое по счету пиковое значение перемещения, отсчитываемое от x_j , м; n – количество пиковых значений перемещений, взятых для определения коэффициента затухания; T – период, с.

Коэффициент затухания вычисляется как среднее значение из нескольких логарифмических декрементов затухания, при этом учитывается отношение амплитуд колебаний, взятых с интервалом в пять периодов, что объясняет коэффициент 0,2 в формуле (2).

Важным параметром колебаний является коэффициент неупругой работы материала, влияющий на поведение системы в околорезонансных зонах. Данный параметр, являющийся константой материала и не зависящий от внутреннего напряжения образца, вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{2\beta}{\omega} = \frac{\beta T}{\pi}. \quad (3)$$

Третий этап экспериментальных исследований был проведен для оценки влияния продольной силы на демпфирующие свойства сталебетона при воздействии на образец многократных импульсов разной мощности. Схема установки для анализа динамического отклика представлена на рис. 3.

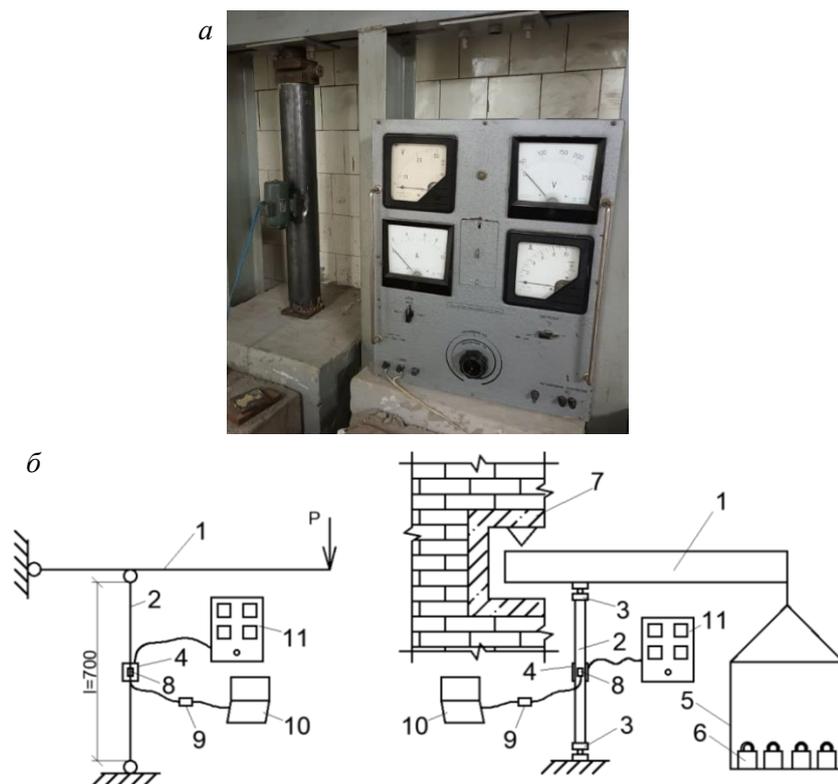


Рис. 3. Испытания сжатых образцов на определение собственных колебаний при изменении величины продольной силы:

a – общий вид установки; *б* – плоская схема и расчетная модель: 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – электродвигатель с эксцентричным диском; 5 – корзина; 6 – гири; 7 – усиленный ж/б пояс; 8 – блок акселерометра; 9 – модуль обработки сигнала акселерометра; 10 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации; 11 – распределительный щит с вольтметром

Fig. 3. Compressive tests of bars to determine natural vibrations at different longitudinal force: *a* – general view; *b* – plane view and calculation model: 1 – loading arm; 2 – test specimen; 3 – cylindrical support joint; 4 – electric motor with eccentric disk; 5 – basket; 6 – weights; 7 – reinforced concrete binding strake; 8 – accelerometer; 9 – accelerometer signal processing module; 10 – laptop for recording oscillograms and vibration measurements; 11 – switchboard with voltmeter

Используемая для экспериментального исследования установка устроена аналогично установке со второго этапа исследования на приложение одиночного импульса. Сжимающая нагрузка на образец 2 подавалась поэтапно путем прибавления количества гирь 6, укладываемых на корзину 5, подвешенную к концу двутавровой балки 1. На образец оказывалось поперечное воздействие с помощью электродвигателя с эксцентричным диском 4 с различной мощностью (80, 100, 120 Вт). После возмущения колебаний акселерометр 9, датчик которого прикреплен к середине стержня, регистрировал проекции кажущегося ускорения. В данном исследовании использовался трехосный акселерометр ТБА с массой около 50 г, что не оказало влияния на чистоту эксперимента.

В соответствии с программой эксперимента сжимающая нагрузка изменялась в диапазоне от 0 до 1000 кг. Измерения начинались с продольной силы, равной собственному весу корзинки 5, в каждом последующем измерении масса корзинки увеличивалась на 200 кг, что соответствует одному ряду гирь.

Под действием поперечной внешней силы $F_0 \cos \omega t$ образец начинает испытывать вынужденные колебания. При этом смещение колеблющейся точки после возбуждения описывается уравнением

$$x = A \cos(\omega t + \beta), \quad (4)$$

где A – начальная амплитуда колебаний, м; ω – круговая частота, рад/с; t – время, с; β – сдвиг фазы колебаний.

В данном случае амплитуда колебаний вычисляется по формуле

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \alpha^2 \omega^2}}, \quad (5)$$

где ω_0 – собственная круговая частота колебаний, рад/с; α – коэффициент сопротивления среды.

Сдвиг фазы колебаний удовлетворяет уравнению

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\alpha \omega}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (6)$$

где m – масса тела, кг.

Из формулы (5) следует, что амплитуда колебаний A зависит от частоты колебаний ω следующим образом: при значениях $\omega < \omega_0$ амплитуда возрастает при увеличении ω , при $\omega = \omega_0$ – достигает максимума и далее уменьшается. Острота резонанса будет тем более выраженной, чем меньше коэффициент сопротивления среды α . При малом значении коэффициента трения резонанс разрушает систему: при $\alpha = 0$ амплитуда колебаний на резонансной частоте стремится к бесконечности.

Результаты измерений динамических параметров образца, полученные при различных значениях приложенной продольной силы, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Динамические параметры образца

Table 1

Dynamic parameters

Сжимающая нагрузка, кг	Фактическая продольная сила на образце $N_{\text{факт}}$, кН	Частота собственных колебаний f , с ⁻¹		
		при мощности движка		
		80	100	120
Собственный вес корзинки с рычагом (около 17 кг)	1,3	14,051	8,225	3,529
200	6,8	14,019	10,176	5,275
400	12,8	21,463	18,396	9,733
600	18,7	29,060	16,366	11,799

Окончание табл. 1
End of table 1

Сжимающая нагрузка, кг	Фактическая продольная сила на образце $N_{\text{факт}}$, кН	Частота собственных колебаний f , с^{-1}		
		при мощности движка		
		80	100	120
800	24,6	20,740	15,787	12,846
1000	30,6	11,236	8,933	15,213

Результаты и обсуждение

В результате измерений, проведенных на втором этапе исследования при приложении одиночного импульса, были получены значения коэффициента затухания колебаний и коэффициента неупругой работы (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициента затухания и коэффициента неупругой работы

Table 2

Damping coefficient and inelastic behavior coefficient

Сжимающая продольная сила	$N_1 = 6,8$ кН (1 ряд)	$N_6 = 36,5$ кН (6 рядов)
Коэффициент затухания β	6,197	10,210
Коэффициент неупругой работы γ	0,139	0,129

Значение коэффициента затухания колебаний нелинейно возрастает. При этом разница в коэффициенте неупругой работы составляет не более 7 %, превышая аналогичные значения для железобетона ($\gamma_{\text{жб}} = 0,1$) на 30–40 % и для стали на 8–16 % при $\gamma_{\text{с}} = 0,12$ (рис. 4).

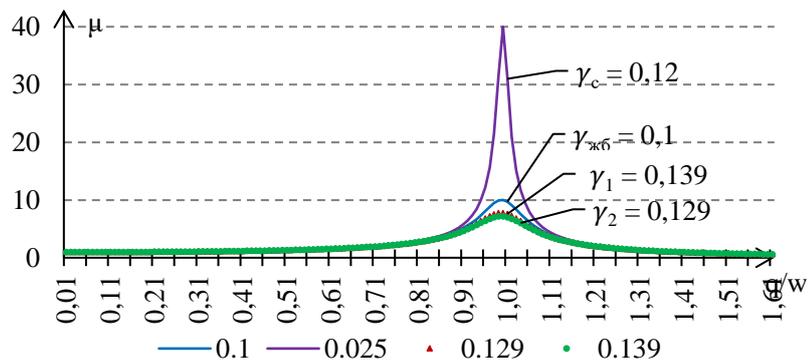


Рис. 4. График резонансных кривых различных материалов: ($\gamma_{\text{жб}}$ – коэффициент неупругой работы железобетона; $\gamma_{\text{с}}$ – коэффициент неупругой работы стали; γ_1 , γ_2 – коэффициент неупругой работы трубобетона)

Fig. 4. Resonance curves of different materials: ($\gamma_{\text{жб}}$ – inelastic behavior coefficient of reinforced concrete, $\gamma_{\text{с}}$ – inelastic coefficient of steel, γ_1 , γ_2 – inelastic coefficient of pipe concrete)

На основе обработки экспериментальных данных третьего этапа исследования, проведенного с использованием многократно повторяющихся импульсов, был построен график, иллюстрирующий зависимость частоты свободных колебаний образца от мощности, получаемой от электродвигателя с эксцентричным диском, при разной величине приложенной сжимающей продольной силы (рис. 5).

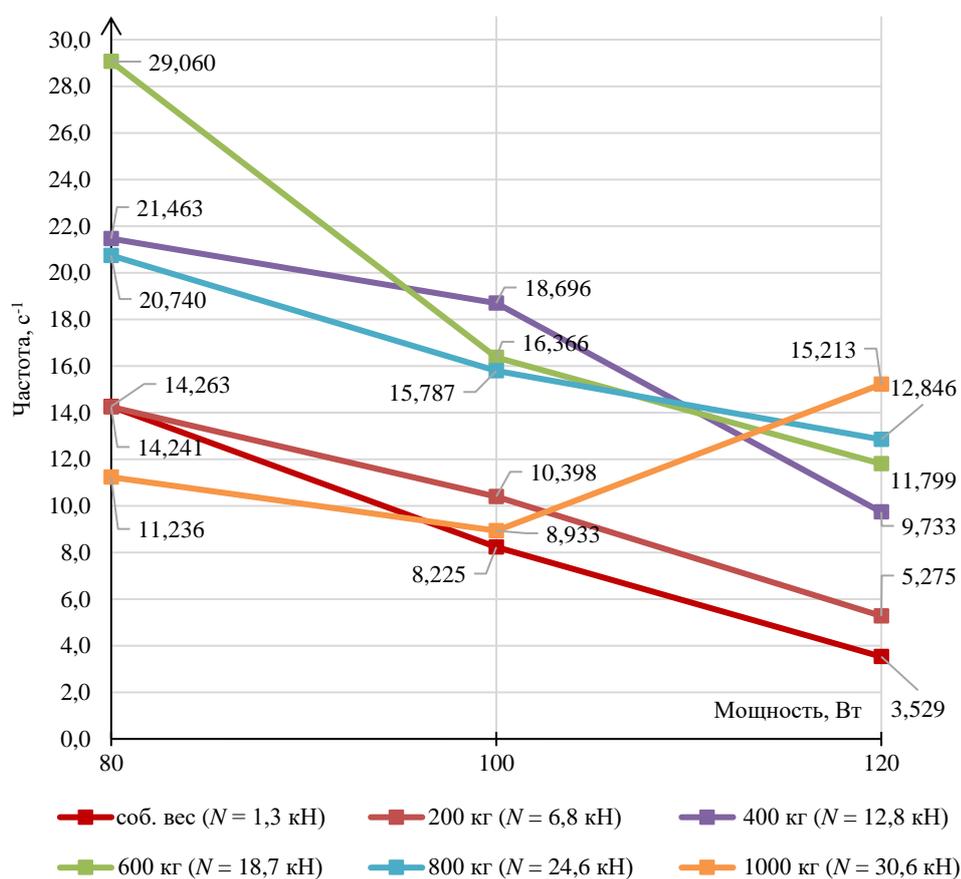


Рис. 5. Общий график зависимости частоты свободных колебаний образца от мощности при различной продольной силе

Fig. 5. Dependences between free vibrations and power at different longitudinal force

Из графика следует, что при локально фиксируемой продольной силе при повышении мощности частота колебаний образца уменьшается. Это может происходить из-за увеличения амплитуды колебаний образца (рис. 6). Данная зависимость не выполняется при величине сжимающей силы, равной массе корзины 1000 кг, соответствующей силе $N = 30,6$ кН, при наибольшей мощности частота колебаний образца увеличилась. Наибольшую частоту колебаний имеют образцы, нагруженные продольной силой, равной 400 и 600 кг ($N = 12,8$ и $18,7$ кН соответственно). При продольной силе, равной собственному весу корзины, и при массе корзинки 200 кг частота колебаний наименьшая.

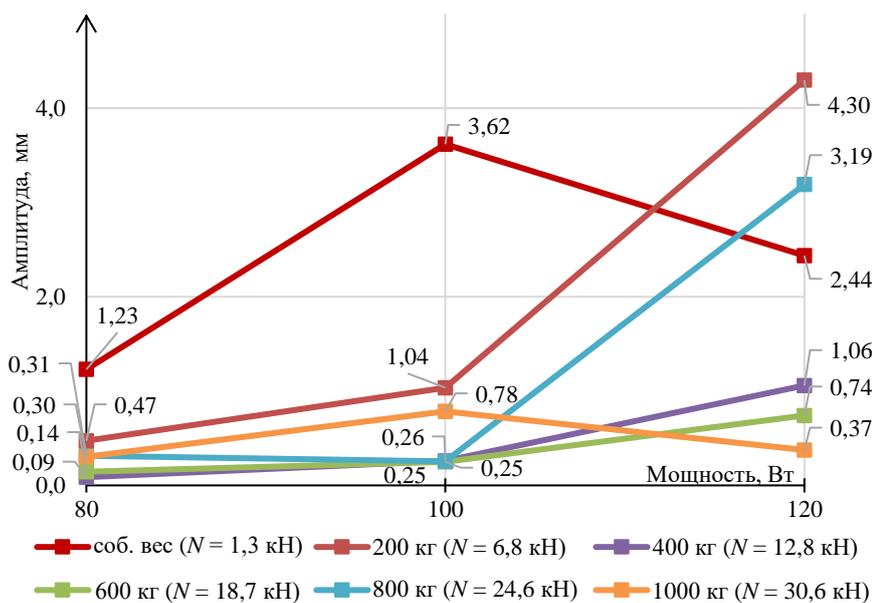


Рис. 6. Общий график зависимости амплитуды колебаний образца от мощности при различной продольной силе

Fig. 6. Dependences between vibration amplitude and power at different longitudinal force

Заклучение

В настоящей работе проведено исследование влияния продольной силы на поведение сталебетонных конструкций, из которого сделаны следующие выводы:

1. Внутреннее напряжение, вызванное сжимающей продольной силой, оказывает минимальное воздействие на коэффициент неупругой работы, следовательно, практически не влияет на демпфирующие свойства сталебетона.

2. Свойства демпфирования у сталебетонных конструкций значительно превосходят аналогичные показатели у стальных и железобетонных конструкций (на 8–16 и 30–40 % соответственно).

3. При действии многократно повторяющегося импульса поведение сталебетона зависит от соотношения частот внешних и собственных колебаний образца. При совпадении этих частот наблюдается явление резонанса, при котором амплитуда колебаний становится максимальной.

4. В данном исследовании эффект резонанса был достигнут при продольном усилии, равном 400 кг, и мощности источника вынужденных колебаний, равной 100 Вт. В последующих исследованиях планируется изучение влияния продольной силы на динамический отклик сталебетонного образца при воздействии источника колебаний различной мощности.

5. При локально фиксируемой продольной силе с увеличением мощности частота колебаний образца уменьшается при всех значениях продольной силы, кроме случая с максимальной силой сжатия, соответствующей массе 1000 кг ($N = 30,6$ кН). В данном случае частота колебаний стала больше при увеличении мощности прикладываемого импульса.

6. Максимальная частота колебания образца регистрируется при продольной силе, равной 400 и 600 кг ($f_{400} = 21,463 \text{ с}^{-1}$, $f_{600} = 29,06 \text{ с}^{-1}$), при мощности вынуждаемого импульса 80 Вт.

7. Максимальная амплитуда колебания образца $A = 4,3$ мм регистрируется при сжимающей силе, равной 200 кг, при мощности от электродвигателя с эксцентричным диском 120 Вт.

Способность сталебетона к демпфированию помогает уменьшить вибрации и поглотить энергию при динамических нагрузках. Это особенно важно для таких конструкций, как автомобильные и железнодорожные мосты, подкрановые конструкции, нефтяные и газовые платформы, которые подвержены сейсмическим и другим динамическим воздействиям. Исследования влияния динамических нагрузок на сталебетонные конструкции могут привести к разработке новых методов расчета и проектирования таких конструкций, что, в свою очередь, будет способствовать развитию инженерных решений с улучшенной эффективностью и безопасностью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонов И.Н. Исследование прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагрузках : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1974. 19 с.
2. Тихонов И.Н. Поведение железобетонных элементов при центральной сжатии однократной динамической нагрузкой до разрушения // Железобетонные конструкции : межвузовский сборник научных статей. Куйбышев, 1975. С. 144–152.
3. Копаница Д.Г., Моисеенко Р.П., Пляскин А.С. Собственные колебания сжатой сталебетонной колонны // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. Т. 371. № 5. С. 259–261.
4. Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Пляскин А.С., Устинов А.М., Каличкина А.С. Взаимосвязь напряженного состояния сжатой колонны и частоты собственных колебаний // Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2 частях. 2015. С. 294–300.
5. Копаница Д.Г., Белов Н.Н., Югов Н.Т., Ласковенко А.Г., Ласковенко Г.А., Пляскин А.С., Усманов А.У. Исследование прочности бетонных, фибробетонных и железобетонных плит на высокоскоростной удар модельным снарядом // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия : сборник докладов Международной научно-практической конференции. Москва : НИУ МГСУ, 2016. С. 186–192.
6. Пляскин А.С., Устинов А.М., Кошко Б.О. Экспериментальные исследования зависимости частоты собственных колебаний железобетонной колонны от величины сжимающей силы // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы VIII Международной научно-практической конференции. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2018. Ч. 1. С. 416–420.
7. Пузанков Ю.И. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при поперечной динамической нагрузке : специальность 05.23.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1979. 22 с.
8. Eibl J. Behavior of critical regions under hard impact // Concrete structures under impact and impulsive loading. Berlin (West), 1982. V. 1. P. 113–127.
9. Louw M.J., Maritz G., Loedolff M.J. The Behaviour of RC Columns under Impact Loading // The Civil Engineer in South Africa. 1992. P. 371–378.
10. Jun W., Yu C., Kai W. Residual strength of CHS short steel columns after lateral impact // Thin-walled structures. 2017. № 118. P. 23–36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.04.027

11. Каличкина А.С. Зависимость частоты собственных колебаний трубобетонной колонны от величины сжимающей силы // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики : материалы VII Международной научно-практической конференции. Томск : Изд-во ТГАСУ. 2017. Ч. 1. С. 350–352.
12. Хазов П.А., Помазов А.П. Прочность и продольный изгиб трубобетонных стержней при центральном сжатии // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 77–86.

REFERENCES

1. Tihonov I.N. Strength Analysis of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements under Dynamic Load. PhD Abstract. Moscow, 1974. 19 p. (In Russian)
2. Tihonov I.N. Behavior of Reinforced Concrete Elements under Axial Compression at Single Dynamic Load to Failure. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 1975; 144–152. (In Russian)
3. Kopanica D.G., Moiseenko R.P., Plyaskin A.S. Natural Vibrations of Compressed Steel-Concrete Column. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2017; 371 (5): 259–261. (In Russian)
4. Kopanica D.G., Kaparulin S.L., Plyaskin A.S., Ustinov A.M., Kalichkina A.S. Relationship Between Stress State of Compressed Column and Natural Vibration Frequency. In: *Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*, in 2 vol. 2015. Pp. 294–300. (In Russian)
5. Kopanica D.G., Belov N.N., Yugov N.T., Laskovenko A.G., Laskovenko G.A., Plyaskin A.S., Usmanov A.U. Strength Analysis of Concrete, Fiber-Concrete and Reinforced Concrete Slabs at High-Velocity Impact of Model Projectile. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Modern Problems of Accidental Exposure Calculation for Reinforced Concrete Structures and Buildings'*. Moscow, 2016. Pp. 186–192. (In Russian)
6. Plyaskin A.S., Ustinov A.M., Koshko B.O. Natural Vibration Frequency of Reinforced Concrete Column Depending on Compressive Force. In: *Proc. 7th All-Russ. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*, Vol. 1. Tomsk: TSUAB, 2018, Pp. 416–420. (In Russian)
7. Puzankov Yu.I. Strength and Deformability of Compressed Reinforced Concrete Elements under Transverse Dynamic Loading. PhD Abstract. Moscow, 1979. 22 p. (In Russian)
8. Eibl J. Behavior of Critical Regions under Hard Impact. *Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading*. Berlin (West), 1982; 1: 113–127.
9. Louw M.J., Maritz G., Loedolff M.J. The Behaviour of RC Columns under Impact Loading. *The Civil Engineer in South Africa*. 1992; 371–378.
10. Jun W., Yu C., Kai W. Residual Strength of CHS Short Steel Columns after Lateral Impact. *Thinwalled structures*. 2017; 118: 23–36. DOI: 10.1016/j.tws.2017.04.027
11. Kalichkina A.S. Dependence of Natural Vibration Frequency of Tubular Concrete Column on Compressive Force. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Investments, Construction, Real Estate as a Material Basis for Economy Modernization and Innovation'*. Vol. 1. Tomsk: TSUAB, 2017. Pp. 350–352. (In Russian)
12. Khazov P.A., Pomazov A.P. Strength and Longitudinal Bending of Tubular Concrete Bars under Axial Compression. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktzii*. 2023; 2 (73): 77–86. (In Russian)

Сведения об авторах

Ерофеев Владимир Иванович, докт. физ.-мат. наук, профессор, директор, Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85, erof.vi@yandex.ru

Хазов Павел Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, khazov.nngasu@mail.ru

Шкода Ирина Васильевна, аспирант, Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН, 603024, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, 85; ст. преподаватель, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

Торопов Александр Сергеевич, доцент, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, toropovdkzo@inbox.ru

Authors Details

Vladimir I. Erofeev, DSc, Professor, Director, Mechanical Engineering Research Institute RAS, Institute of Applied Physics RAS Affiliate, 85, Belinsky Str., 603024, Nizhny Novgorod, Russia, erof.vi@yandex.ru

Pavel A. Khazov, PhD, A/Professor, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhny Novgorod, Russia, khazov.nngasu@mail.ru

Irina V. Shkoda, Research Assistant, Mechanical Engineering Research Institute RAS, Institute of Applied Physics RAS Affiliate, 85, Belinsky Str., 603024, Nizhny Novgorod, Russia; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhny Novgorod, Russia, ShkodaIrinaVasil@yandex.ru

Aleksandr S. Toropov, A/Professor, Nizhnii Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya Str., 603000, Nizhnii Novgorod, Russia, toropovdkzo@inbox.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.05.2024
Одобрена после рецензирования 30.08.2024
Принята к публикации 21.11.2024

Submitted for publication 14.05.2024
Approved after review 30.08.2024
Accepted for publication 21.11.2024