

*Сафаров Азиз Рамизович, студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра ИСА*

*Прокошев Станислав Алексеевич, студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра ИСА*

## **ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПОПЕРЕЧНОЙ РАМЫ ЗДАНИЯ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ**

**Аннотация:** Предмет исследования: Изучение напряженно-деформированного состояния во времени поперечных рам здания при одинаковом динамическом нагружении, имеющих одинаковую расчетную схему, постоянную жесткость, но различающихся по конструкционному материалу.

**Цели:** Исследование влияния конструкционного материала поперечной рамы здания на значения собственных частот.

**Материалы и методы:** Расчет значений собственных частот проводится по теории «Строительной механики», с применением ВК SCAD++.

**Результаты:** При заданной внешней частоте равной 47.5 сек-1 от оборудования на раму получились следующие значения собственных частот: для стали – 180.6 сек-1 и 204 сек-1, а для железобетона – 68.8 сек-1 и 77.9 сек-1.

**Ключевые слова:** собственная частота, поперечная рама, строительная механика, расчетная схема, жесткость, динамическое нагружение.

**Abstract:** Subject of research: The study of the stress-strain state in time of transverse frames of a building with the same dynamic loading, having the same design scheme, constant stiffness, but differing in structural material.

**Objectives:** to Study the influence of the structural material of the cross frame of the building on the values of natural frequencies.

**Materials and methods:** the calculation of eigenfrequencies is based on the theory of "Construction mechanics", using the SCAD++VC.

**Results:** for a given external frequency equal to 47.5 sec<sup>-1</sup>, the following natural frequency values were obtained from the equipment on the frame: for steel – 180.6 sec<sup>-1</sup> and 204 sec<sup>-1</sup>, and for reinforced concrete – 68.8 sec<sup>-1</sup> and 77.9 sec<sup>-1</sup>.

**Keywords:** natural frequency, cross frame, construction mechanics, design scheme, stiffness, dynamic loading.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопрос изучения напряженно-деформированного состояния во времени строительных конструкций и элементов при действии динамических нагрузок является одним из наиболее сложных. Данное исследование направлено на развитие и помощь инженерам-конструкторам.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В данном исследовании приведен расчет поперечной рамы здания на динамическую нагрузку, основанный на существующей теории «Строительной механики» [1].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования было принято двухэтажное промышленное здание, состоящее из статически неопределимых рам, идущих с постоянным шагом (рис. 1). Следовательно, расчетная схема представляет собой плоскую статическую неопределимую раму (рис. 2). Будет рассмотрена одна и та же рама с одной динамической нагрузкой, с постоянной жесткостью, но различающаяся в исполнении конструкционного материала.

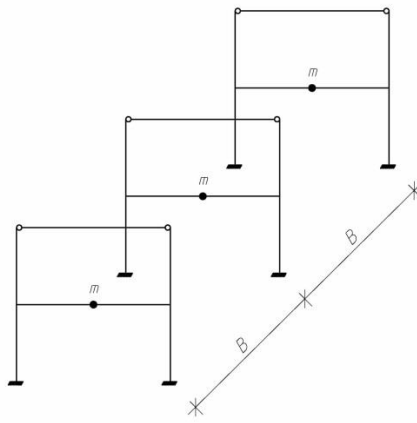


Рис. 1. Рассматриваемое промышленное здание

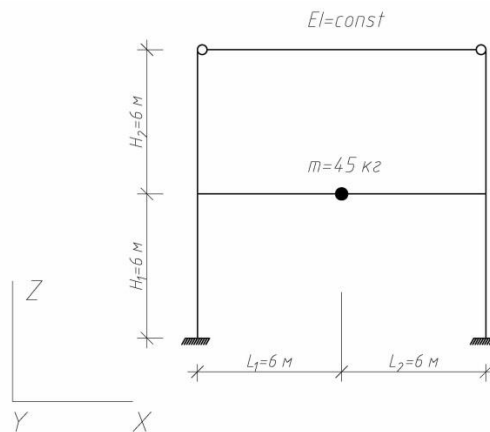


Рис. 2. Рассматриваемая рама

Для данной рамы будут рассчитаны значения собственных частот при заданной на нее динамической нагрузке. Анализируя заданную систему, можно сделать вывод о том, что для нее будут существовать две степени свободы. Собственные частоты определяются в целях проверки на условие резонанса рамы.

Для определения величин собственных частот записывается вековое уравнение движения системы при свободных колебаниях, имеющей две динамические степени свободы, согласно теории «Строительной механики» [1]. Для этого сначала записывается система уравнений (1) движения системы:

$$\begin{cases} (\delta_{11}m\omega^2 - 1)y_1 + \delta_{12}m\omega^2 y_2 = 0 \\ \delta_{21}m\omega^2 y_1 + (\delta_{22}m\omega^2 - 1)y_2 = 0 \end{cases}$$

(1)

Далее записывается определитель (2) системы:

$$A = \begin{vmatrix} \delta_{11}m\omega^2 - 1 & \delta_{12}m\omega^2 \\ \delta_{21}m\omega^2 & \delta_{22}m\omega^2 - 1 \end{vmatrix} = 0$$

(2)

Наконец уравнение (3) движения системы:

$$(\delta_{11}m\omega^2 - 1) \times (\delta_{22}m\omega^2 - 1) - (\delta_{12}m\omega^2) \times (\delta_{21}m\omega^2) = 0$$

(3)

Произведя замену  $\omega^2 = k$ , а также в силу теоремы о взаимности перемещений  $\delta_{12} = \delta_{21}$  получаем окончательное уравнение (4) движения системы при свободных колебаниях:

$$(\delta_{11}mk - 1) \times (\delta_{22}mk - 1) - (\delta_{12}mk)^2 = 0$$

(4)

Коэффициенты при свободных членах определяются по формулам (5, 6, 7) Максвелла-Мора:

$$\delta_{11} = \sum \int \frac{\overline{M_1^2}}{EI} dx,$$

(5)

$$\delta_{22} = \sum \int \frac{\overline{M_2^2}}{EI} dx,$$

(6)

$$\delta_{12} = \sum \int \frac{\overline{M_1} \times \overline{M_2}}{EI} dx$$

(7)

Одна из основных идей данного исследования – составить максимально равноправные условия для анализа, и в первую очередь на что стоит обратить внимание это жесткостные параметры рам [2, 3, 4]. Рассматриваться будут две рамы: стальная и железобетонная (табл. 1).

Табл. 1. Жесткостные параметры рассматриваемых рам

Материал рамы	Сечение	Е, Н/м <sup>2</sup>	I, м <sup>4</sup>	НТД
Сталь (сталь С345)	Двутавр 60Б4	206*109	0.0011	ГОСТ Р 57837-2017; СП 16.13330.2017
Железобетон (бетон В25)	Прямоугольное, с размерами 200х400 мм	30*109	0.0011	СП 63.13330.2012

В данном исследовании, как и в любом другом, присутствуют некоторые допущения:

- не учитываются силы инерции стержней, учитываются только силы инерции, возникающие от сосредоточенной массы (в рамках аналитического расчета допускается опускать учет сил инерции стержней, в силу систем дифференциальных уравнений в частных производных, что создает определенные сложности);

- жесткость в пределах всей системы постоянна (в реальном проектировании жесткости стоек и ригелей будут различаться);

- армирование железобетонной рамы не оговаривается (в теории армирование влияет на модуль упругости железобетонной конструкции, но для решения динамических задач допускается принимать начальный модуль упругости бетона, значение которого принимается, согласно нормам [5; 6; 7]).

Внешняя нагрузка (частота) представляет собой – оборудование, создающее динамические усилия. Анализируя существующий рынок и каталоги оборудования для различных промышленных предприятий, принимаем следующие его параметры: масса (m) – 45 кг и число оборотов в минуту – 2850 об/мин, соответственно частота – 47.5 сек<sup>-1</sup>.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения коэффициентов по формулам 5, 6, 7, необходимо раскрыть статическую неопределимость и построить единичные эпюры изгибающих моментов. Основная система метода сил представлена на рисунке 3.

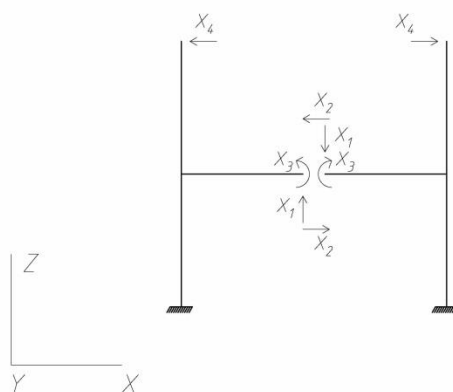


Рис. 3. Основная система метода сил для заданной рамы

В связи с большим числом неизвестных метода сил (4 неизвестных) единичные эпюры изгибающих моментов от действия единичных инерционных сил будут определяться в БК SCAD++ (рис. 4, 5).

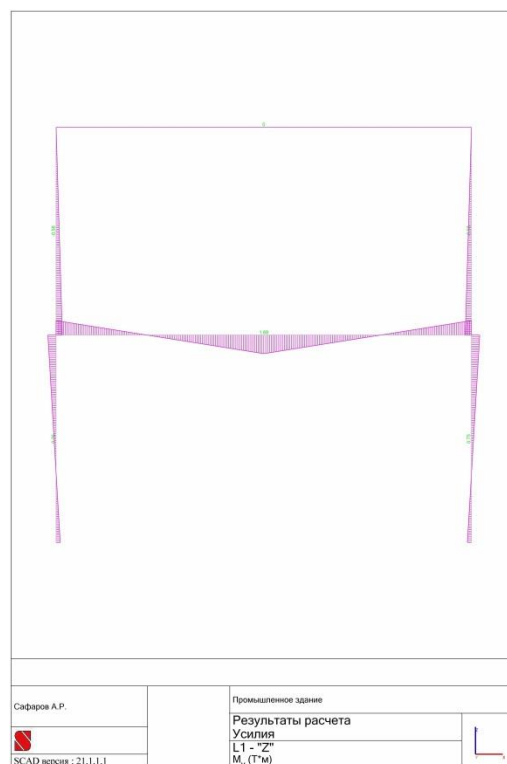
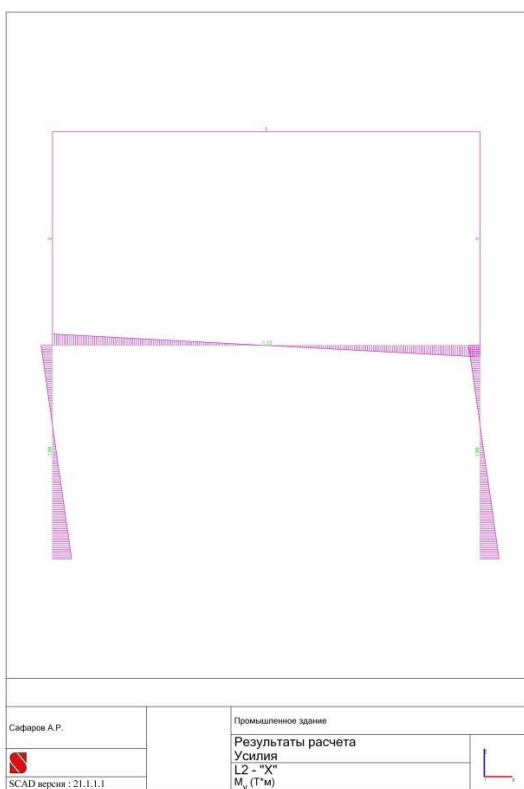


Рис. 4. Эпюра  $M_x$  от инерционной силы по X

Рис. 5. Эпюра  $M_z$  от инерционной силы по Z

Коэффициенты по формулам (5, 6, 7) получаются:

$$\delta_{11} = \frac{15.72}{EI}, \quad \delta_{22} = \frac{12.36}{EI}, \quad \delta_{12} = 0$$

Подставив вычисленные коэффициенты и массу оборудования в формулу (4), получаем квадратное уравнение (8) по которому и будут определяться собственные частоты:

$$\frac{37864659.4}{(EI)^2} k^2 - \frac{12395.9}{EI} k + 1 = 0 \quad (8)$$

Подставив соответствующие жесткостные параметры для каждого из вариантов, получаем результаты (табл. 2).

Табл. 2. Результаты расчета

Материал рамы	Первая собственная частота, сек-1	Вторая собственная частота, сек-1	Внешняя частота (оборудование), сек-1
Сталь (сталь С345)	180.6	204	47.5
Железобетон (бетон В25)	68.8	77.9	

## ВЫВОДЫ

1. По полученным результатам (табл. 2) нужно обратить внимание на диапазон собственных частот для железобетонной рамы, который находится крайне близко к внешней частоте от оборудования, в отличие от стальной рамы, которая имеет существенный запас. Следовательно, при данной расчетной ситуации применение железобетонной рамы не является безопасным, т.к. возможно явление резонанса.

2. По изложенной методике можно отметить, что увеличение жесткости конструкции приводит к увеличению собственной частоты.

## Библиографический список:

1. Старцева Л. В., Архипов В. Г., Семенов А. А. Строительная механика в примерах и задачах. Учебное издание. – М. : Изд-во АСВ, 2013. – 224 с.

2. ГОСТ Р 57837-2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия [Текст]. – Введ. 2018-05-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 35 с.

3. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\* [Текст]. – Введ. 2017-08-28. – М. : Стандартинформ, 2017. – 145 с.

4. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 [Текст]. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минстрой России, 2015. – 168 с.

5. СП 413.1325800.2018. Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования [Текст]. – Введ. 2019-05-08. – М. : Стандартинформ, 2019. – 36 с.

6. Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками / НИИОСП им. Н. М. Герсеванова (Пособие к СНиП II-19-79). – М. : Стройиздат, 1982. – 207 с.

7. Справочник по динамике сооружений. Под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – М. : Стройиздат, 1972. – 511 с.



