

А.М. НЕСТЕРЕНКО¹, Г.А. СТОЛПОВСКИЙ², М.Ю. НЕСТЕРЕНКО¹,
П.В. РОМАНЮК³, М.В. БРОВИКОВ⁴

¹Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Отдел геоэкологии, г. Оренбург, Россия,

²ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия,

³Сибирский федеральный университет Красноярск, Россия,

⁴ООО «МИК-инжиниринг», г. Москва, Россия

ОЦЕНКА ЖЁСТКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ РАМЫ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация. В статье приводится методика оценки изгибной жёсткости методом динамическим испытаниям на примере опытной металлической рамы. Источником вынужденных колебаний при динамических испытаниях был модульный вибростенд в виде механического осциллятора со ступенчатой регулировкой частоты. Показаны результаты определения частот собственных колебаний рамы, частоты вынужденных колебаний вибростенда и логарифмического декремента затухания. Вычислялась динамическая сила и коэффициент динамичности. Оценка жёсткости элементов рамы проводилась в сопоставлении с её теоретическим значением, заданным в конечно-элементной модели. Модель составлена в расчётном комплексе ЛИРА-САПР 2013. Для элементов рамы производился расчёт кривизны формы изгиба по экспериментальным и модельным данным. Жёсткость элементов в среднем оказалась на 8,81% меньше теоретической. Предложенный подход позволяет реализовать неразрушающий контроль изгибной жёсткости конструкции на участке измерений.

Ключевые слова: динамические испытания, колебания, жёсткость на изгиб, металлические конструкции, техническое состояние.

A.M. NESTERENKO¹, G.A. STOLPOVSKIY², M.YU. NESTERENKO¹,
P.V. ROMANYUK³, M.V. BROVIKOV⁴

¹Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Department of Geoecology, Orenburg, Russia,

²Orenburg State University, Orenburg, Russia,

³Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia,

⁴MIK-Engineering LLC, Moscow, Russia.

STIFFNESS EVALUATION OF A METAL FRAME BY THE METHOD OF DYNAMIC TESTS

Abstract. The article presents the method for assessing bending stiffness by dynamic testing using an example of the experienced metal frame. The source of forced oscillations during dynamic tests was a modal vibration exciter in the form of a mechanical oscillator with stepwise frequency control. The results of determining the natural frequencies of the frame, the frequency of forced oscillations of the exciter and logarithmic damping decrement are shown. Dynamic force and dynamic coefficient were calculated. Stiffness evaluation of the frame elements was carried out in comparison with its theoretical value specified in the finite element model. The model was compiled in the LIRA-SAPR design software 2013. For the frame elements, the curvature of a bend shape was calculated from experimental and model data. The experimental stiffness of elements on average was 8.81% less than the theoretical. The proposed approach allows realizing non-destructive testing of a bending stiffness of a structure at the measurement site.

Keywords: dynamic tests, oscillations, bending stiffness, metal structures, technical condition.

Введение

Диагностика и мониторинг технического состояния строительных объектов при их возведении и в период эксплуатации является одной из важнейших задач строительной отрасли. Существует множество различных методов контроля качества строительных конструкций зданий и сооружений. Разрушающие и неразрушающие методы, как правило, позволяют определять лишь отдельные физико-механические характеристики конструкций, каждая из которых не даёт оценки фактической несущей способности системы.

Среди неразрушающих методов интенсивно развиваются вибрационные и сейсмометрические методы, которые позволяют анализировать работу конструктивной системы под нагрузкой, при этом, не доводя её до разрушения. Критерием оценки технического состояния в этих методах являются частоты собственных колебаний [1-5], логарифмический декремент затухания [6], коэффициенты нелинейных искажений и амплитудной модуляции [7]. Данные критерии с различной точностью дают общую интегральную оценку состояния всего сооружения в целом, но не направлены на контроль отдельно взятой конструкции эксплуатируемого сооружения. Актуальным является решение обратной задачи изгиба по вычислению изгибной жёсткости участка контроля по данным динамических испытаний. В результате решения получим изгибную жёсткость на участке контроля выбранной конструкции эксплуатируемого сооружения. Сравнив с исходным (проектным) значением, можно оценить остаточный ресурс и, следовательно, техническое состояние.

Цель исследования — разработать методику оценки жёсткости пространственных металлических сооружений, основанную на решении обратной задачи изгиба и проведении динамических испытаний.

В качестве основной задачи исследования выделяется оценка фактической изгибной жёсткости элементов металлической рамы. Как известно, изгибная жёсткость поперечного сечения строительных конструкций влияет на прогибы и перемещения в узлах. Проведение испытаний с измерением фактических перемещений в точках конструкции при заданной статической или динамической нагрузке является низко информативным. Результирующие перемещения зависят существенным образом от податливости узлов, дефектов монтажа, повреждений в ходе эксплуатации. Исключить подобные факторы возможно, если произвести расчёт кривизны формы изгиба элементов конструктивной системы. Как показывают опыты [8], форма изгиба стержня на заданном участке зависит лишь от внешней нагрузки и жёсткости сечения.

Статические опыты для эксплуатируемых конструкций либо крайне трудоёмки, либо невозможны, поэтому актуальна вторая задача, связанная с применением динамических испытаний. Измерение деформаций при механических колебаниях может решить данную проблему и позволит оценить фактическую работу материала конструкции в упругой области.

Модели и методы

Экспериментальная установка состоит из опытной пространственной металлической рамы, модульного вибростенда в виде механического осциллятора и системы регистрации механических колебаний (рисунок 1 а).

Рама предназначена для испытаний строительных конструкций. Элементы рамы: ригели из двутавра 35Б1, стойки из швеллеров 120У, диафрагмы жёсткости из листовой стали толщиной 8 мм и 12 мм.

Модульный вибростенд представляет собой электродрель с заземлённым в патроне сварным эксцентриком. Электродрель позволяет эксцентрику вращаться с постоянной частотой. При этом используется минимальная частота вращения. На эксцентрике нарезана резьба, что позволяет увеличить его массу за счёт накручивания гаек. Электродрель закреплена в специально изготовленном сварном корпусе. Вибростенд крепится к диафрагме жёсткости между верхними ригелями рамы (рисунок 1 б).

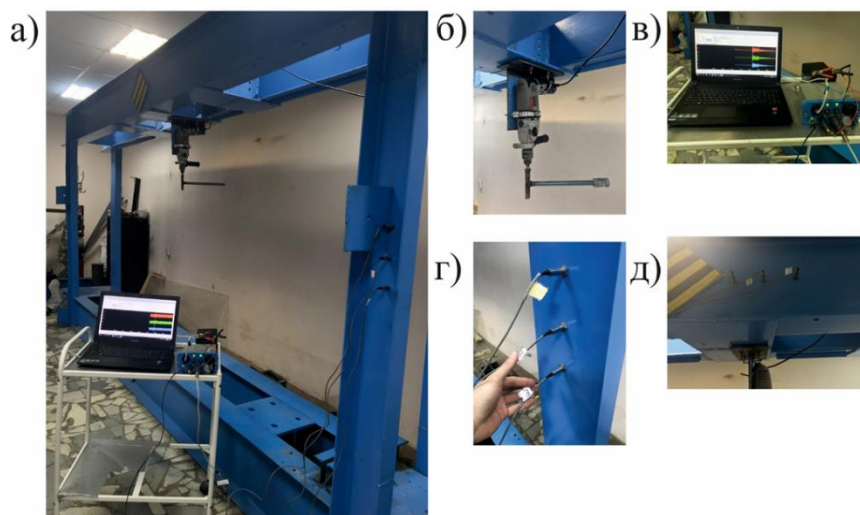


Рисунок 1 – Экспериментальная установка: а) общий вид испытуемой рамы; б) модульный вибростенд; в) система регистрации; г) размещение датчиков колебаний на стойке рамы; д) размещение датчиков колебаний на ригеле рамы

Система регистрации состоит из ёмкостных акселерометров BC 201 (ZETlab) и регистратора Vaikal-8 (Р-сенсорс) (рисунок 1 в). Система регистрирует механические колебания в виде последовательности значений линейного ускорения в мм/с²; акселерограммы подвергаются интегрированию для получения значений линейного смещения в миллиметрах. Датчики колебаний располагались на каждой стойке и верхних ригелях рамы; крепление акселерометров осуществлялось с помощью специальных магнитов на расстоянии 100 мм друг от друга в 3-х соседних точках. Основная характеристика системы регистрации показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика системы регистрации

Характеристика	Единица измерения	Значение
Частотный диапазон акселерометров BC 201	Гц	0,1-500
Минимальное значение измеряемого виброускорения	мм/с ²	20
Относительная погрешность измерения виброускорения	%	5
Разрядность АЦП регистратора	ед.	24
Полоса частот	Гц	0-1680
Заданная частота дискретизации	выб/сек	1000
Заданный коэффициент усиления	ед.	1

Построение модели конструктивной системы испытуемой рамы выполнено в расчётном комплексе ЛИРА САПР 2013 с заданием поперечных сечений и теоретических значений жёсткости (рисунок 2). Узлы соединения элементов модели приняты жёсткими; связи опорных нижних ригелей также жёсткие. Марка стали всех элементов рамы согласно обработке данных с твердомера является С345. Были заданы условные оси, вдоль которых производилась регистрация вибрации. Расчётная схема рамы представлена на рисунок 3.

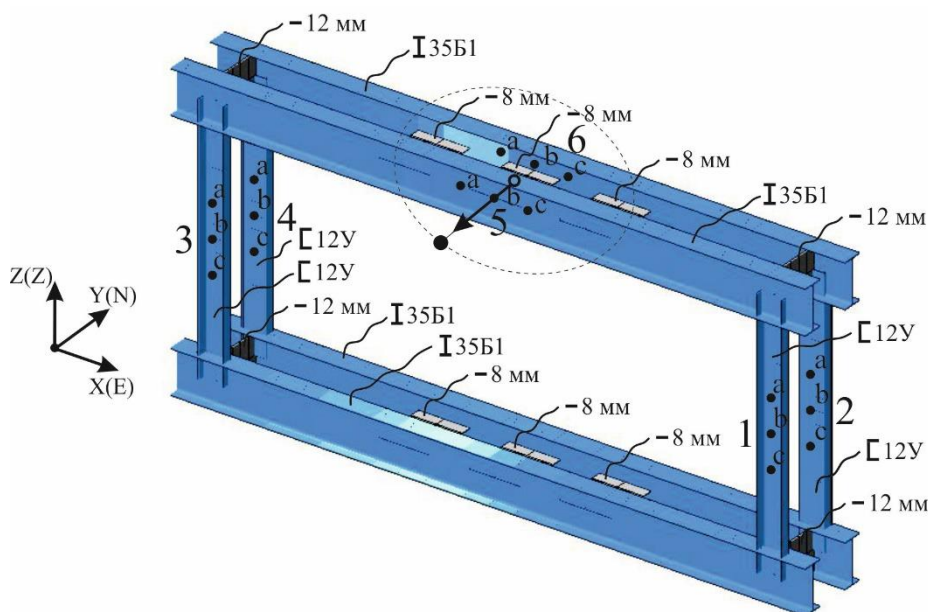


Рисунок 2 – Модель испытуемой рамы с указанными сечениями; принятые оси измерений (слева); траектория движения эксцентрика (штриховая линия); a, b, c – точки измерения колебаний

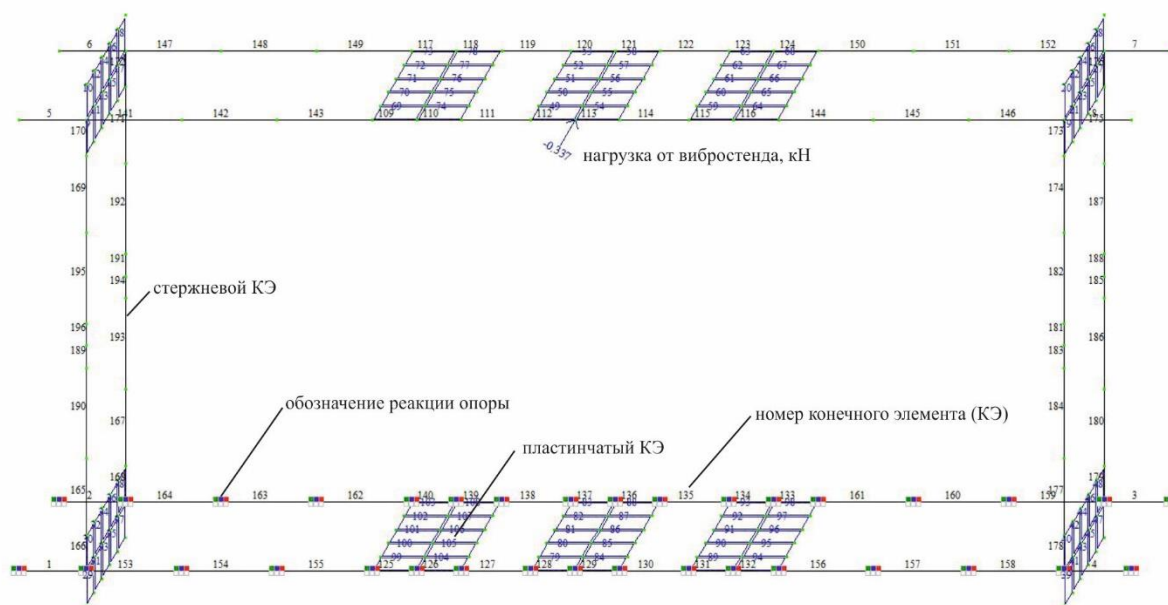


Рисунок 3 – Расчётная схема рамы

Алгоритм динамических испытаний состоит из 2 этапов.

На 1 этапе определяются частоты собственных колебаний рамы и логарифмические декременты колебаний. Для этого рама выводится из равновесия серией ударов кувалдой, что возбуждает механические колебания [9]. Датчики колебаний при этом устанавливаются в центре рамы на диафрагме жёсткости между верхними ригелями. Подобное расположение акселерометров позволяет фиксировать наиболее интенсивные движения в верхних точках объекта [9,12,15].

Частоты определяются по известным методикам [9-13] через выделение пиков на амплитудном спектре участков виброграмм, содержащих «удары» (рисунок 4 б). Критерии выбора частот: повторение значений на всех участках, несовпадение значения с отношением 50/N (N — целое число) для исключения влияния работы электрических машин. Логарифми-

ческий декремент колебаний (л.д.к.) определяется как натуральный логарифм отношения двух соседних критических (с нулевой производной) точек на виброграмме (рисунок 5 а) [6]. Для этого запись фильтруется полосовым фильтром Баттерворта шириной $\Delta f=1/\tau$ (τ — длительность участка записи, с) с центральной собственной частотой. За истинное принимается среднее квадратичное значение (СКЗ).

На 2 этапе производится регистрация вынужденных колебаний, возбуждаемых модульным вибростендом (рисунок 5 б). Длительность воздействия составляет 10 секунд с момента установления постоянной частоты вращения осциллятора. Производится серия пусков осциллятора с поочерёдной регистрацией колебаний на каждой стойке вдоль осей N, E; на переднем и заднем ригелях вдоль оси N.

Обработка виброграмм производилась в программной среде Windows Seismic Grafer (WSG).

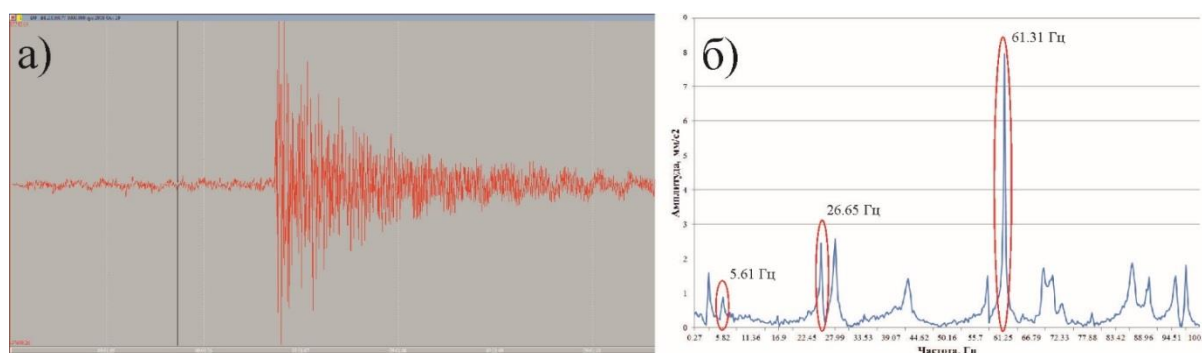


Рисунок 4 – Запись «удара»: а) виброграмма, б) амплитудный спектр

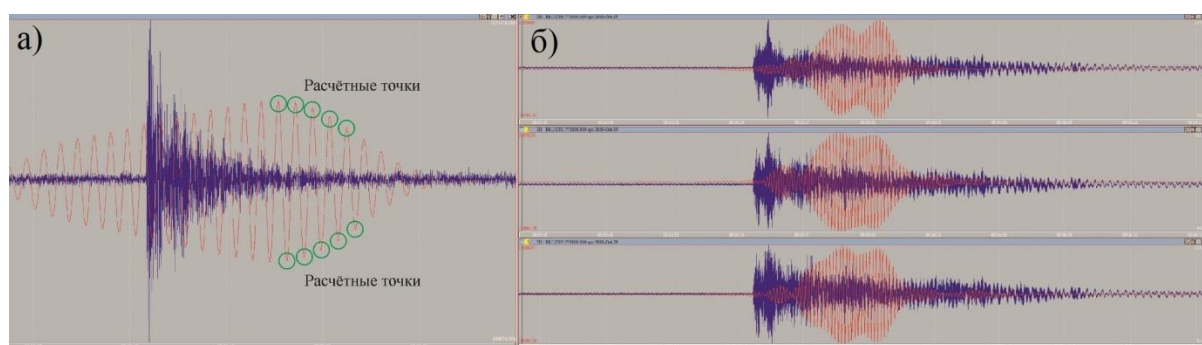


Рисунок 5 – Запись работы вибростенда: а) исходная виброграмма (синяя) и отфильтрованная (красная) с расчётными точками для вычисления декремента колебаний, б) запись в трёх контрольных точках

Оценку экспериментальной изгибной жёсткости элементов рамы предлагается проводить в сопоставлении с её теоретическим значением, заданным как идеальное (проектное) в конечно-элементной модели [8]. Для этого производится расчёт кривизны формы изгиба стержней расчётной схемы рамы по экспериментальным и модельным данным. Предполагается [8,14], что кривизна формы изгиба стержня на контрольном участке зависит от внешней нагрузки на конструктивную систему и от изгибной жёсткости в пределах участка. Задавая в теоретической модели нагрузку, фактически приложенную при испытаниях, можно принять, что отклонение значения кривизны происходит только за счёт изменения изгибной жёсткости.

Рассмотрим две формы изогнутых осей стержней: теоретической, построенной по проектным данным, и фактической, построенной по данным экспериментальных измерений

перемещений (рисунок 6, а-б) [8]. Форму изогнутой оси стержня (упругой линии) можно определить при помощи известного выражения:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ_x}, \quad (1)$$

где $1/\rho$ — кривизна стержня в точке; M — изгибающий момент от внешней нагрузки; EJ_x — изгибная жёсткость поперечного сечения.

В неподвижной системе координат YZ дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня [14]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\ddot{y}}{(1 + \dot{y}^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где \dot{y} - угол θ наклона касательной между касательной к упругой линии и осью z ;
 $\ddot{y} = M/EJ_x$ - вторая производная по приращению z в точке.

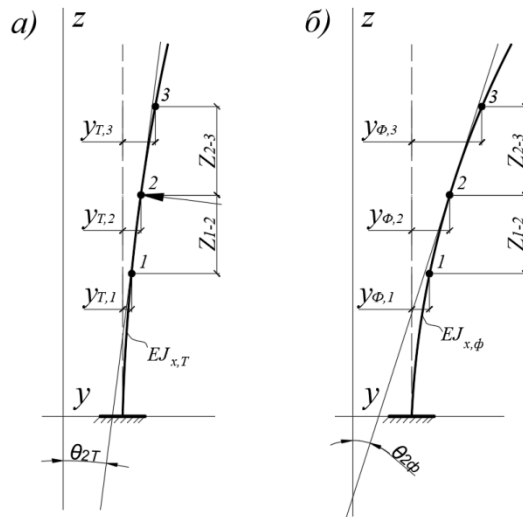


Рисунок 6 – Формы изогнутых стержней: а) теоретическая, б) фактическая

Рассмотрим случай разных форм изогнутых теоретической и фактической осей стержней при одинаковом изгибающем моменте от внешней нагрузки. В данном случае отличие форм происходит за счёт изменения изгибных жёсткостей. Для теоретической формы изогнутого стержня имеем [8]:

$$\frac{1}{\rho_T} = \frac{M}{EJ_T}; \quad M = EJ_T \cdot \frac{1}{\rho_T}, \quad (3)$$

где $\frac{1}{\rho_T}$ — кривизна теоретической кривой изгиба стержня; M — изгибающий момент; EJ_T — теоретическая изгибная жёсткость поперечного сечения стержня.

Для фактической формы изгиба [8]:

$$\frac{1}{\rho_\phi} = \frac{M}{EJ_\phi}; \quad M = EJ_\phi \cdot 1/\rho_\phi, \quad (4)$$

где $(1/\rho_\phi)$ — кривизна теоретической кривой изгиба стержня; EJ_ϕ — фактическая изгибная жёсткость поперечного сечения стержня.

Приравняем правые части и составим отношения жёсткостей [8]:

$$\frac{EJ_T}{EJ_\Phi} = \frac{1/\rho_\Phi}{1/\rho_T}. \quad (5)$$

Таким образом, отношение изгибных жёсткостей теоретического и фактического стержней обратно пропорционально отношению их кривизны. Вычислив фактическую кривизну формы изгиба стержня, есть возможность перейти к фактической изгибной жёсткости поперечного сечения на рассматриваемом участке.

Решение дифференциального уравнения (2) для рассматриваемых стержней по измеренным перемещениям дает значение кривизны $1/\rho$. Ввиду малости значений поперечных смещений по сравнению с расстоянием между точками изменением расстояния при изгибе можно пренебречь. Тогда первые производные y_1' и y_2' в точке 1 и 2 уравнения смещений определяются как [8]:

$$y_1' = \frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}; \quad y_2' = \frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}}. \quad (6)$$

Вторая производная в точке 1 [8]:

$$\ddot{y} = \frac{y_2' - y_1'}{\frac{Z_{1-2}}{2} + \frac{Z_{2-3}}{2}} = \frac{2 \cdot \frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}} - 2 \cdot \frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}}{Z_{1-2} + Z_{2-3}}. \quad (7)$$

Тогда кривизна стержня в точке будет равна [8]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2 \cdot \frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}} - 2 \cdot \frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}}{Z_{1-2} + Z_{2-3}} = \frac{M}{EJ_x \cdot \left(1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (8)$$

Таким образом, для вычисления кривизны на требуемом участке конструкции необходимо измерить смещения в трёх точках участка контроля.

Для получения значений смещения производится интегрирование численного ряда акселерограммы. Затем вычисляется СКЗ полученного графика смещений, значение которого принимается за смещение при нагрузке от вибростенда.

Нагрузка от вибростенда является динамической, поэтому для удобства построения модели нагрузка пересчитывается в соответствующую статическую через коэффициент динамичности. Согласно известной формуле коэффициент динамичности:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{p^2}{\omega^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \left(\frac{p}{\omega}\right)^2}} \quad (9)$$

где ω — частота собственных колебаний; p — частота вынужденных колебаний; δ — логарифмический декремент затухания. Для расчёта коэффициента динамичности можно взять одну из частот собственных колебаний, по которой происходят колебания в точках контроля.

Динамическая сила определяется, исходя из угловой скорости вращения ω осциллятора вибростенда и массы эксцентрика $m_{\text{экс}}$:

$$P_d = m_{\text{экс}} \cdot a_n = m_{\text{экс}} \cdot \omega^2 \cdot R, \quad (10)$$

где a_n — нормальное ускорение при вращении эксцентрика; R — радиус вращения.

Результаты исследования и их анализ

Сопоставление теоретических (модельных) и экспериментальных частот собственных колебаний приведено в табл. 2.

Таблица 2 – Сопоставление теоретических и экспериментальных частот

Номер частоты	Теоретическая, Гц (рад/с)	Экспериментальная, Гц (Рад/с)
1	8.81 (55.33)	5.61 (35.23)
2	13.56 (85.16)	11.53 (72.41)
3	28.07 (176.28)	26.65 (167.36)
4	35.73 (224.38)	31.09 (195.25)
5	63.31 (397.59)	59.96 (376.55)

Частота вынужденных колебаний $p_{\text{вын}} = 6.67$ Гц (41.89 рад/с).

Логарифмический декремент колебаний на собственной частоте: $\delta_{5.61} = 0.183$.

Динамическая сила $P_d = 141.35$ Н.

Коэффициент динамичности $\beta = 2.334$.

Статистическая сила, соответствия динамическим перемещениям $P_{\text{ст}} = 336.98$ Н.

Измерения колебаний производились на трёх точках (а, b, с) участков контроля:

- участок 1 — правая передняя стойка;
- участок 2 — правая задняя стойка;
- участок 3 — левая передняя стойка;
- участок 4 — левая задняя стойка;
- участок 5 — передний ригель;
- участок 6 — задний ригель.

Изгибные жёсткости по эксперименту оказались стабильно меньше теоретических значений. Средняя разница составила 8.81 %. На контрольных участках нет явных признаков дефектов и повреждений. Полученная разница может быть объяснена занижением фактических прочностных свойств стали по сравнению с их нормативными значениями (марка стали определялась по твердости по шкале Бринелля) и погрешностью измерений.

Таблица 3 – Результаты вычисления изгибной жесткости элементов рамы на контрольных участках

Номер участка	Кривизна, модель, 1/м	Кривизна, эксп-т., 1/м	Жесткость EI, модель, Н·м ²	Отношение $\delta_{\text{экс}}/\delta_{\text{мод}}$	Жесткость EI, эксп-т., Н·м ²
<i>Правая передняя</i>					
1, N	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$2.8 \cdot 10^{-7}$	3 131 200	1.120	2 795 714
1, E	$4.0 \cdot 10^{-8}$	$5.0 \cdot 10^{-8}$	232 780	1.250	186 224
<i>Правая задняя</i>					
2, N	$6.85 \cdot 10^{-7}$	$7.3 \cdot 10^{-7}$	3 131 200	1.066	2 938 181
2, E	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	232 780	1.077	216 153
<i>Левая передняя</i>					
3, N	$6.9 \cdot 10^{-7}$	$7.2 \cdot 10^{-7}$	3 131 200	1.043	3 000 733
3, E	$1.276 \cdot 10^{-7}$	$1.37 \cdot 10^{-6}$	232 780	1.074	216 808
<i>Левая задняя</i>					
4, N	$6.9 \cdot 10^{-7}$	$7.2 \cdot 10^{-7}$	3 131 200	1.043	3 000 734
4, E	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$1.41 \cdot 10^{-7}$	232 780	1.085	214 620

Окончание таблицы 3

<i>Передний ригель</i>					
5, N	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.42 \cdot 10^{-6}$	109 098 000	1.092	99 878 451
<i>Задний ригель</i>					
6, N	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.34 \cdot 10^{-6}$	109 098 000	1.031	105 841 345

Преимущество подхода заключается в возможности исключить из расчёта жёсткости любые перемещения конструктивной системы вне участка контроля. Таким образом, можно получить поэлементный остаточный ресурс сооружения и оценить его техническое состояние. Подход позволил создать метод неразрушающего контроля жёсткости элементов, актуальный для поверочных расчётов или проектов усиления эксплуатируемых объектов. Точность предложенного метода существенным образом зависит от применяемого виброизмерительного оборудования и расстояния между контрольными точками. Уменьшение контрольного участка и расстояния между датчиками колебаний требует увеличения чувствительности и снижения относительной погрешности измерений.

Выводы

1. Предложен подход к оценке жёсткости пространственных металлических сооружений, основанный на проведении динамических испытаний.
2. Рассмотренный метод динамических испытаний позволяет получить тарированную динамическую нагрузку и постоянную частоту вынужденных колебаний, что необходимо для решения обратной задачи изгиба. Точность метода зависит от чувствительности приборов и расстояния между контрольными точками.
3. Решение обратной задачи изгиба через кривизну элементов конструктивной системы позволяет исключить факторы, влияющие на результирующие перемещения в точках системы.
4. По разнице экспериментальной и теоретической жёсткости можно оценить техническое состояние, как отдельных участков, так и сооружения в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столповский Г.А., Нестеренко А.М., Романюк П.В. Resonant frequency of wooden column considering support unit's flexibility // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 456 (2018) 012128. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012128.
2. Коробко В.И., Коробко А.В. Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии. М.: Изд-во АСВ, 2003. 285 с.
3. Kamgar R., Rahgozar R. A simple approximate method for free vibration analysis of framed tube structures // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2013. Vol. 22. No 2. Pp. 217-234.
4. Volkovas V., Petkevičius K., Eidukevičiūtė M., Akinci T.C. Diagnostics of construction defects in a building by using time-frequency analysis. // МЕХАНИКА. 2012. Vol.18(4). Pp.432-437.
5. Volkovas V. The concept of buildings stability monitoring and damage diagnostics. // Key Engineering Materials, 2013. Key Engineering Materials Vol.569-570. Pp.238-245.
6. Исследование поглощающих свойств материала строительных конструкций на примере железобетонной перемычки / В.И. Жаданов, А.М. Нестеренко, М.Ю. Нестеренко, Г.А. Столповский // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 9 (693).С. 76-86.
7. Коробко В.И., Калашников М.О., Калашникова О.В. Контроль жесткости железобетонных перемычек с использованием динамического критерия — коэффициента нелинейных искажений // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 6 (314). С. 130-135.
8. Нестеренко А.М., Нестеренко М.Ю., Бухвалова А.В. Подход к решению обратной задачи изгиба на примере деревянной стойки // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2019. №1. С.1-14.

9. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К. Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. ISBN 5-7691-1835-0.
10. Сейсмометрический мониторинг технического состояния несущих строительных конструкций зданий и сооружений по динамическим характеристикам / И.П. Золотухин, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров., Д.Б. Короленько, В.Д. Нескородев // Вычислительные технологии. Том 18. Спец. выпуск, 2013. 8 с.
11. Tyukalov Yu. Ya. Opredelenie chastot svobodnykh kolebaniy metodom konechnykh elementov v napryazheniyakh / Magazine of Civil Engineering. 2016. № 7 (67). С. 39-54.
12. Комплекс инженерно-сейсмометрических методик для оценки состояния зданий и сооружений / Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина, В.А. Глотов // Наука и безопасность. 2012. №5 (5). С. 40-61.
13. Котляревский В.А. Диагностика скрытых дефектов сейсмостойких сооружений по изменению частотного спектра // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 4. С. 36-42.
14. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений: Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1979. 320 с. Перевод изд.: Dynamics of Structures/Ray W. Clough, Joseph Penzien. New York, 1975.
15. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населённых пунктов и больших строительных площадок / Центр геофизических исследований Владикавказского ИЦ РАН. М.: Наука, 2009. 350 с. — ISBN 978-5-02-034128-9 (в пер.).

REFERENCES

1. Stolpovskiy G.A., Nesterenko A.M., Romanyuk P.V. Resonant frequency of wooden column considering support unit's flexibility // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 456 (2018) 012128. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012128.
2. Korobko V.I., Korobko A.V. Kontrol` kachestva stroitel`nykh konstruksiy: Vibroakusticheskie tekhnologii. M.: Izd-vo ASV, 2003. 285 s.
3. Kamgar R., Rahgozar R. A simple approximate method for free vibration analysis of framed tube structures // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2013. Vol. 22. No 2. Pp. 217-234.
4. Volkovas V., Petkevičius K., Eidukevičius M., Akinci T.C. Diagnostics of construction defects in a building by using time-frequency analysis. // МЕХАНИКА. 2012. Vol.18(4). Pp.432-437.
5. Volkovas V. The concept of buildings stability monitoring and damage diagnostics. // Key Engineering Materials, 2013. Key Engineering Materials Vol.569-570. Pp.238-245.
6. Issledovanie pogloshchayushchikh svoystv materiala stroitel`nykh konstruksiy na primere zhelezobetonnoy peremychki / V.I. ZHadanov, A.M. Nesterenko, M.YU. Nesterenko, G.A. Stolpovskiy // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel`stvo. 2016. № 9 (693).S. 76-86.
7. Korobko V.I., Kalashnikov M.O., Kalashnikova O.V. Kontrol` zhestkosti zhelezobetonnykh peremychek s ispol`zovaniem dinamicheskogo kriteriya - koeffitsienta nelineynykh iskazheniy // Fundamental`nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2015. № 6 (314). S. 130-135.
8. Nesterenko A.M., Nesterenko M.YU., Bukhvalova A.V. Podkhod k resheniyu obratnoy zadachi izgiba na primere derevyannoy stoyki // Byulleten` Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN. 2019. №1. S.1-14.
9. YUdakhin F.N., Kapustyan N.K. Antonovskaya G.N. Inzhenerno-seysmicheskie issledovaniya geologicheskoy sredy i stroitel`nykh konstruksiy s ispol`zovaniem vetrovykh kolebaniy zdaniy. Ekaterinburg: UrO RAN, 2007. ISBN 5-7691-1835-0.
10. Seysmometricheskyy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh stroitel`nykh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy po dinamicheskim kharakteristikam / I.P. Zolotukhin, A.P. Kuz`menko, V.S. Saburov., D.B. Korolennykh, V.D. Neskorodov // Vychislitel`nye tekhnologii. Tom 18. Spets. vypusk, 2013. 8 s.
11. Tyukalov Yu. Ya. Opredelenie chastot svobodnykh kolebaniy metodom konechnykh elementov v napryazheniyakh / Magazine of Civil Engineering. 2016. № 7 (67). S. 39-54.
12. Kompleks inzhenerno-seysmometricheskikh metodik dlya otsenki sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy / N.K. Kapustyan, G.N. Antonovskaya, I.M. Basakina, V.A. Glotov // Nauka i bezopasnost`. 2012. №5 (5). S. 40-61.
13. Kotlyarevskiy V.A. Diagnostika skrytykh defektov seysmostoykikh sooruzheniy po izmeneniyu chastotnogo spektra // Seysmostoykoe stroitel`stvo. Bezopasnost` sooruzheniy. 2014. № 4. S. 36-42.
14. Klaf R., Penzien Dzh. Dinamika sooruzheniy: Per. s angl. M.: Sroyizdat, 1979. 320 s. Perevod izd.: Dynamics of Structures/Ray W. Clough, Joseph Penzien. New York, 1975.
15. Zaalishvili V.B. Seysmicheskoe mikrorayonirovanie territoriy gorodov, naselionnykh punktov i bol`shikh stroitel`nykh ploshchadok / Tsentr geofizicheskikh issledovaniy Vladikavkazskogo NTS RAN. M.: Nauka, 2009. 350 s. - ISBN 978-5-02-034128-9 (v per.).

Информация об авторах:

Нестеренко Алексей Михайлович

Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Отдел геоэкологии, г. Оренбург, Россия, научный сотрудник, аспирант ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

E-mail: alexnes@mail.ru

Столповский Георгий Александрович

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры строительных конструкций.

E-mail: stolpovskij@mail.ru

Нестеренко Максим Юрьевич

Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Оренбург, Россия, доктор. техн. наук, доц., заведующий Отделом геоэкологии.

E-mail: n_mu@mail.ru

Романюк Павел Витальевич

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, аспирант.

E-mail: alexnes@mail.ru

Бровиков Михаил Викторович

ООО «МИК-инжиниринг» не написано, г. Москва, Россия, заместитель генерального директора.

E-mail: brovikovm@gmail.com

Information about authors:

Nesterenko Alexey M.

Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Department of Geoecology, Orenburg, Russia, researcher, postgraduate student of Orenburg State University, Orenburg, Russia.

E-mail: alexnes@mail.ru

Stolpovskiy Georgiy A.

Orenburg State University, Orenburg, Russia, candidate in tech. sc., associated prof. of the Building Structures dep.

E-mail: stolpovskij@mail.ru

Nesterenko Maxim Yu.

Orenburg Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Department of Geoecology, Orenburg, Russia, doctor of geol. sc., associated prof., Head of Geoecology dep.

E-mail: n_mu@mail.ru

Romanyuk Pavel V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, postgraduate student.

E-mail: romanyukpav@mail.ru

Brovikov Mikhail V.

MIK-Engineering LLC, deputy CEO.

E-mail: brovikovm@gmail.com