1
НОМЕР

ISSN 2304-9081
ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ
On-line версия журнала на сайте
http://www.elmag.uran.ru

БОНЦ

БЮЛЛЕТЕНЬ

ОРЕНБУРГСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА УрО РАН

Lycosa singoriensis (Laxmann, 1770)
Тарантул южнорусский
Шовкун Д.Ф.

2019

УЧРЕДИТЕЛЬ
ОРЕНБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР УрО РАН

© Коллектив авторов, 2019

УДК 69.04

А.М. Нестеренко, М.Ю. Нестеренко, Г.А. Столповский

ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ИЗГИБА НА ПРИМЕРЕ ДЕРЕВЯННОЙ СТОЙКИ

Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН (Отдел геоэкологии), Оренбург, Россия

В статье предложен подход к решению обратной задачи изгиба для вычисления фактической жёсткости стержневых элементов по податливости конструктивной системы. Теоретически показана обратная взаимосвязь отношений фактической к теоретической изгибной жёсткостей и фактической к теоретической кривизне стержня в требуемой точке. Вычисление фактической жёсткости предлагается проводить через измерение податливости в трёх соседних точках на требуемом для диагностики участке. Приводится экспериментальная проверка метода на примере деревянной стойки с жёстко защемлённым опорным узлом по системе ЦНИИСК. Фактическая жёсткость вычисляется для случая целой стойки и стойки с нарушениями контролируемого размера. С ростом размера нарушения наблюдается снижение значения изгибной жёсткости.

Ключевые слова: конструктивная система, несущая способность, изгибная жёсткость, деревянные конструкции, податливость.

A.M. Nesterenko, M.Yu. Nesterenko, G.A. Stolpovsky

APPROACH TO SOLUTION OF THE INVERSE BEND PROBLEM ON THE EXAMPLE OF WOODEN RACK

Orenburg Federal Research Center, UB RAS (Department of Geoecology), Orenburg, Russia

The article proposes an approach to solving the inverse problem of bending to calculate the actual stiffness of the core elements from the compliance of the constructive system. Theoretically, the inverse relationship is shown between the relationship of the actual to the theoretical flexural rigidity and the actual to the theoretical curvature of the rod at the desired point. It is proposed to calculate the actual stiffness through the measurement of susceptibility at three adjacent points on the required area for diagnostics. An experimental verification of the method is given on the example of a wooden rack with a rigidly clamped supporting node according to the ZNIISK system. The actual stiffness is calculated for the case of the whole rack and the rack with violations of a controlled size. With an increase in the size of the violation, a decrease in the value of flexural rigidity is observed.

Key words: structural system, bearing capacity, bending stiffness, wooden structures, compliance.

Введение

Диагностика и мониторинг технического состояния строительных объектов при их возведении и в период эксплуатации является одной из важнейших проблем строительной отрасли. Существует множество различных

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

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 отдельно взятой конструкции или всего сооружения в целом, но не позволяют получить локальную несущую способность (отдельного элемента или в требуемой точке конструктивной системы).

Снижение несущей способности конструктивной системы, как правило, происходит в рамках очагов, соответствующих максимальным напряжениям или местам дефектов и механических повреждений. Поэтому при проведении обследования наибольший интерес для строителя-эксперта вызывает возможность получения сведений о локальной несущей способности в требуемой точке или участке. Таким образом, требуется существенное повышение информативности инструментальной диагностики, в том числе, вибрационных методов.

Как известно, любые дефекты и повреждения сооружения сопровождаются непосредственным снижением изгибной жёсткости конструкций [1, 2, 8-10]. В качестве параметра несущей способности конструктивной системы изгибная жёсткость отражает как упругие характеристики материала, так и характеристики поперечного сечения, поэтому является оптимальным критерием оценки технического состояния.

Таким образом, целью исследования является описание подхода к решению обратной задачи изгиба для вычисления изгибной жёсткости поперечного сечения элементов конструктивной системы по податливости, и проверка его на экспериментальном объекте.

В качестве задач исследования можно указать:

1. Составить уравнения изогнутых осей двух стержней с разными изгибными жёсткостями при одинаковой внешней нагрузке; разработать алго-

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

ритм расчёта по изгибной жёсткости по измеренным деформациям.

2. Разработать подход к решению дифференциальных уравнений изогнутой оси стержня для вычисления кривизны по измеренным деформациям.

3. Провести экспериментальную проверку предложенного метода: испытать деревянную стойку с жёстким опорным узлом по системе ЦНИИСК.

4. С помощью прогибомеров определить линейные деформации стойки в трёх заданных точках от действия силы натяжения лебедки; вычислить фактические значения линейной и угловой податливости конструктивной системы деревянной стойки в заданных точках измерения.

5. Составить конечно-элементную модель деревянной стойки и вычислить теоретические значения податливости от действия единичной силы.

6. По рассмотренному методу вычислить фактическую изгибную жёсткость экспериментальной целой стойки, сравнить с теоретической.

7. Смоделировать конструктивные нарушения разных размеров, уменьшающие изгибную жёсткость; с помощью прогибомеров измерить деформации в заданных точках от действия заданной силы.

8. По рассмотренному методу вычислить фактическую изгибную жёсткость экспериментальной нарушенной стойки, сравнить с теоретической.

Основная часть

Моделирование конструктивной системы эксплуатируемого здания (сооружения) или строительных конструкций позволяет сравнить данные о фактических перемещениях от заданной нагрузки с перемещениями, заложенными в проект. Однако превышение деформаций фактических над проектными говорит лишь о наличии конструктивного нарушения в рассматриваемом направлении. Дефекты и повреждения могут находится в различных участках объекта, но при этом в каждом случае иметь одинаковое результирующее перемещение в точке измерения (рис. 1а-в). Таким образом, нет возможности локализовать ослабленную область и перейти к изгибной жёсткости поперечного сечения на требуемом участке конструктивной системы.

Для локализации подконтрольного участка есть возможность разделить конструктивную систему объекта на участки между точками измерения деформаций (рис. 1г). В данном случае необходимо сравнить кривые изгиба теоретические (модельные) и фактические (экспериментальные). Очевидно, что на участках совпадения характеристик поперечного сечения кривые будут идентичные; и наоборот, при расхождении характеристик кривые изгиба

будут отличаться, свидетельствуя о наличии нарушения (снижении модуля упругости или момента инерции) на рассматриваемом участке. Кривая изгиба оценивается через кривизну линии смещений в рамках участка между точками измерения. В большинстве случаев кривизна $1/\rho_ф$ фактическая будет существенно превышать $1/\rho_т$ теоретическую. При этом на участке без нарушений кривизна совпадает с теоретическим значением.

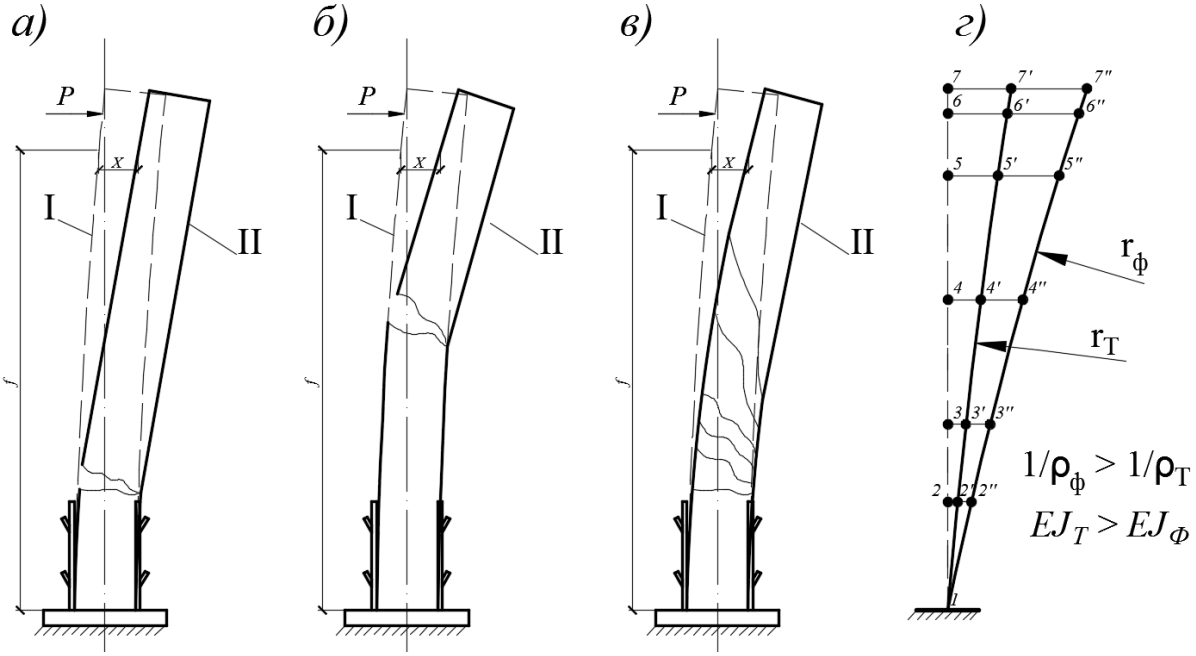

Рис. 1. а), б), в) Различное расположение нарушений в строительной конструкции при одинаковом перемещении в точке измерения; г) Схема деления конструкции на контрольные участки. Обозначения: I, II — Теоретическая и фактическая формы изгиба конструкции; *X* — перемещение в точке измерения; 1-7'' — точки, делящие конструкцию на участки; $r_ф$, $r_т$ — радиус кривизны фактической и теоретической.

Рассмотрим две формы изогнутых осей стержней: теоретической, построенной по проектным данным, и фактической, построенной по данным экспериментальных измерений перемещений (Рис. 2, а-б).

Форму изогнутой оси стержня (упругой линии) можно определить при помощи выражения [11]:

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

где — 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 [11]:

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

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

где $\dot{y}$ — угол θ наклона касательной между касательной к упругой линии и осью *z*;

$\ddot{y} = \frac{M}{EJ_x}$ — вторая производная по приращению *z* в точке.

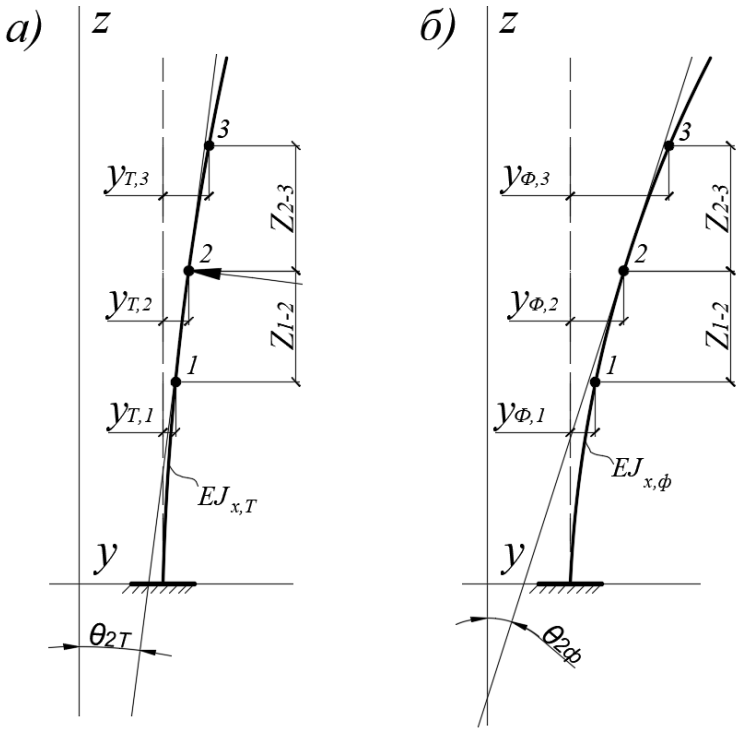

Рис. 2. Формы изогнутых стержней: а) теоретическая; б) фактическая.

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 (рис. 2 а):

$$\frac{1}{\rho_т} = \frac{M}{EJ_т};\ M = EJ_т \cdot 1/\rho_т, \quad (3)$$

где $1/\rho_т$ — кривизна теоретической кривой изгиба стержня; — изгибающий момент; $EJ_т$ — теоретическая изгибная жёсткость поперечного сечения стержня.

Для фактической формы изгиба (рис. 2б):

$$\frac{1}{\rho_ф} = \frac{M}{EJ_ф};\ M = EJ_ф \cdot 1/\rho_ф, \quad (4)$$

где $1/\rho_ф$ — кривизна теоретической кривой изгиба стержня; $EJ_ф$– фактическая изгибная жёсткость поперечного сечения стержня.

Приравняем правые части и составим отношения жёсткостей:

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

$$\frac{EJ_т}{EJ_ф} = \frac{1/\rho_ф}{1/\rho_т}. \quad (5)$$

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

Рассмотрим нахождение кривизны через дифференциальное уравнение (2) для рассматриваемых стержней (рис. 2) по измеренным перемещениям. Ввиду малости значений поперечных смещений по сравнению с расстоянием между точками пренебрежём данным изменением расстояния при изгибе. Тогда первые производные y'_1 и y'_2 в точке 1 и 2 уравнения смещений определяются как:

$$y'_1 = \frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}; \quad y'_2 = \frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}}. \quad (6)$$

Вторая производная в точке 1:

$$\ddot{y} = \frac{y'_2 - y'_1}{\frac{Z_{1-2}}{2} + \frac{Z_{2-3}}{2}} = \frac{2\frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}} - 2\frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}}{Z_{1-2} + Z_{2-3}}; \quad (7)$$

Тогда кривизна стержня в точке будет равна:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}} - 2\frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}}{Z_{1-2} + Z_{2-3}} = \frac{M}{EJ_x}, \quad (8)$$

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

Экспериментальная проверка метода

Для проверки предложенного метода расчёта локальной жёсткости было проведено испытание деревянной стойки с жёстко защемлённым опорным узлом по системе ЦНИИСК. Данный опорный узел подразумевает вклеивание стержней с резьбовым окончанием под углом 30º в тело стойки. Боковые стальные пластины крепятся к стойке закручиванием гаек к вклеенным стержням. Лабораторный образец был изготовлен в масштабе 1:2, при этом в качестве стойки был принят брус номинальным размером 100х200 мм (после строжки 95х197 мм). Высота стойки 1680 мм. Стержни из арматурной стали класса А400 диаметром d=10 мм. Геометрические и физические параметры стойки указаны в таблице 1.

Лабораторная установка (рис. 3) состоит из испытательного стенда,

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

выполненного в виде стальной рамы, исследуемой стойки, защемленной на стенде при помощи наклонно вклеенных стержней по системе ЦНИИСК, а также из силовых и регистрирующих приборов, применяемых соответственно на каждом из этапов эксперимента. Для реализации жесткого основания рама стенда предварительно усиливалась сварным двутавром, вваривaемым в пространство между элементами нижнего ригеля рамы стенда и объединенная с ними путем приварки к ребрам жесткости соответствующих элементов соединительных пластин.

Таблица 1. Геометрические и физические параметры стойки

Параметр	Значение
Длина стойки *l*, мм	1680
Ширина поперечного сечения *b*, мм	95
Высота поперечного сечения *h*, мм	197
Момент инерции *Jx* поперечного сечения, см^4	6052,59
Материал стойки	Древесина, сосна II сорта
Модуль упругости *E* материала, МПа	10000
Коэффициент Пуассона *v* материала	0,45

Теоретическая изгибная жёсткость поперечного сечения B_x составляет:

$$B_{x,\text{теор}} = EJ_x = 10000 \cdot 10^6 * 6052{,}59 \cdot 10^{-8} = 605259 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

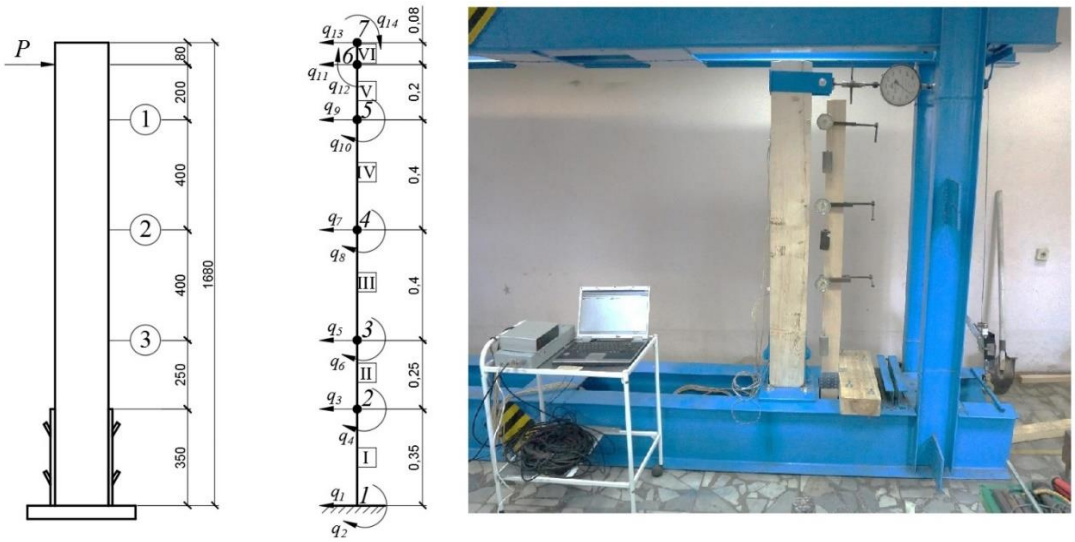

Рис. 3. Лабораторная установка, изображение и конечно-элементная схема деревянной стойки. Обозначения: 1, 2, 3 в круге – номера индикаторов; 1-7 – номера точек; *P* – направление и точка действия силы; q_{ij} – деформация по направлению *i* от действия силы по направлению *j*; I, II, III, IV, V, VI – номера конечных элементов.

При испытаниях нагрузка прикладывалась ступенчато, что объясняется особенностью работы храпового механизма лебёдки. Расчётные податливости

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

(табл. 2) определялись в упругой зоне работы стойки, для этого в выборку среднего арифметического включались значения, образующие максимально линейный график зависимости деформаций от нагрузки (рис. 4).

Таблица 2. Результаты измерения деформаций в точках 3, 4, 5 стойки

Нагрузка, кН	Нагрузка, Н	Деформации, мм	Деформации, м	Угол поворота, рад	Изгибающий момент, м*Н	Податливость линейная, м/Н	Податливость угловая, рад/(м*Н)	Расчётная линейная податливость, м/Н	Расчётная угловая податливость, рад/(м*Н)
5 точка стойки, 1 прогибомер									
0,6	568,8	1,9	0,002	0,002	113,8	3,4E-06	1,5E-05	6,1E-06	2,1E-05
1,2	1176,8	5,3	0,005	0,005	235,4	4,5E-06	1,9E-05		
1,8	1784,8	8,7	0,009	0,008	357,0	4,9E-06	2,1E-05		
2,3	2304,6	11,7	0,012	0,010	460,9	5,1E-06	2,2E-05		
2,6	2608,6	14,9	0,015	0,013	521,7	5,7E-06	2,5E-05		
3,1	3079,3	18,5	0,018	0,016	615,9	6,0E-06	2,6E-05		
3,4	3432,3	23,0	0,023	0,021	686,5	6,7E-06	3,1E-05		
4 точка стойки, 2 прогибомер									
0,6	568,8	1,3	0,001	0,002	341,3	2,2E-06	4,8E-06	4,0E-06	6,6E-06
1,2	1176,8	3,5	0,003	0,004	706,1	3,0E-06	6,3E-06		
1,8	1784,8	5,7	0,006	0,007	1071,0	3,2E-06	6,6E-06		
2,3	2304,6	7,6	0,008	0,009	1382,7	3,3E-06	6,8E-06		
2,6	2608,6	9,8	0,010	0,014	1565,1	3,8E-06	9,2E-06		
3,1	3079,3	12,2	0,012	0,017	1847,6	4,0E-06	9,3E-06		
3,4	3432,3	14,6	0,015	0,020	2059,4	4,3E-06	9,7E-06		
3 точка стойки, 3 прогибомер									
0,6	568,79	0,6	0,001	0,002	568,8	1,1E-06	2,9E-06	1,65E-06	4,0E-06
1,2	1176,8	1,7	0,002	0,004	1176,8	1,5E-06	3,8E-06		
1,8	1784,8	2,9	0,003	0,007	1784,8	1,6E-06	4,0E-06		
2,3	2304,6	3,8	0,004	0,009	2304,6	1,7E-06	4,1E-06		
2,6	2608,6	4,1	0,004	0,014	2608,6	1,6E-06	5,5E-06		
3,1	3079,3	5,4	0,005	0,017	3079,3	1,7E-06	5,6E-06		
3,4	3432,3	6,7	0,007	0,020	3432,3	1,9E-06	5,8E-06		

Далее для получения теоретических значений податливости в точках стойки была составлена конечно-элементная модель (рис. 5) с единичной нагрузкой в точке 6 действия силы от лебёдки.

Таким образом, модель отражает «идеальные» значения деформаций при заданных параметрах конструктивной системы. Результаты определения модельной и фактической податливости приведены в таблице 3.

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

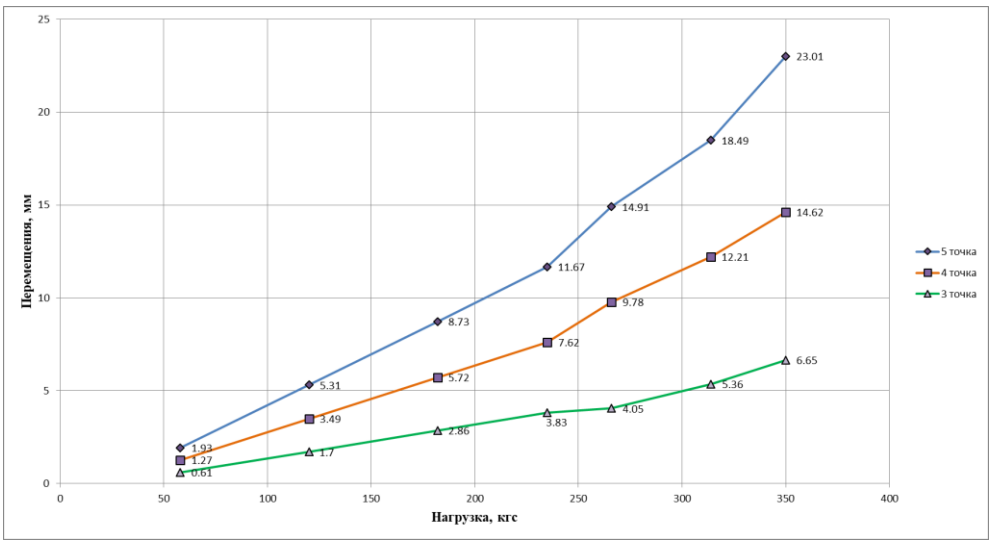

Рис. 4. График зависимости линейных перемещений в точках 3, 4, 5 от нагрузки *P*.

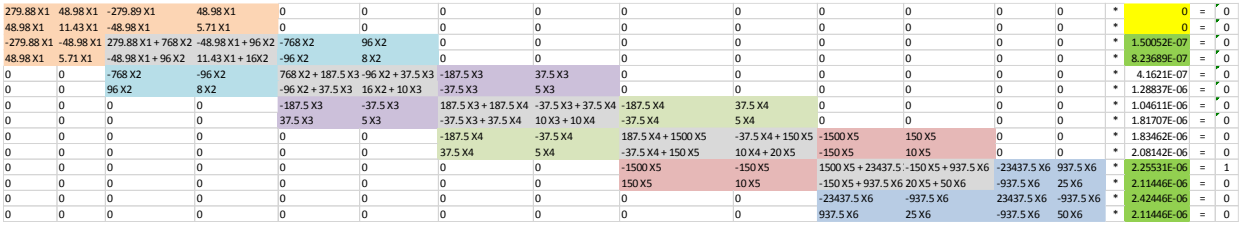

Рис. 5. КЭ-модель стойки. Обозначения: X1, X2, X3, X4, X5, X6 – изгибная жёсткость КЭ I, II, III, IV, V, VI соответственно.

Таблица 3. Результаты определения податливости конструктивной системы стойки от единичной нагрузки в точке 6

№ точки	№ направления перемещения	Податливости модельные при P=1 в точке 6, м/Н (рад/(м*Н)	Податливости фактические при P=1 в точке 6, м/Н (рад/(м*Н)
1	1	0	-
	2	0	-
2	3	1,50E-07	-
	4	8,24E-07	-
3	5	4,16E-07	1,65E-06
	6	1,29E-06	3,97E-06
4	7	1,05E-06	3,99E-06
	8	1,82E-06	6,62E-06
5	9	1,83E-06	6,14E-06
	10	2,08E-06	2,08E-05
6	11	2,26E-06	-
	12	2,11E-06	-
7	13	2,42E-06	-
	14	2,11E-06	-

Расчёт жёсткости целой стойки

По предложенному методу был произведён расчёт изгибной жёсткости

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

стойки на участке между точками 3-5. Согласно (5) теоретическую жёсткость необходимо разделить на отношение кривизны фактической к кривизне теоретической. Для этого вычислялась фактическая кривизна линии изгиба стойки по линейной податливости. Производные в точках 3, 4 вычислялись следующим образом:

$$\dot{y_3} = \frac{3{,}99\cdot10^{-6}-1{,}65\cdot10^{-6}}{0{,}4};\ \dot{y_4} = \frac{6{,}14\cdot10^{-6}-3{,}99\cdot10^{-6}}{0{,}4}$$

На остальных участках вычисления не производилась по причине отсутствия измерений (табл. 4).

Таблица 4. Результаты расчёта жёсткости целой стойки по участкам

Участок	Кривизна 1/ρт, теоретическая	Кривизна 1/ρф, фактическая	Отношение 1/ρф к 1/ρт	Изгибная жёсткость EJ_T, Нм^2, теоретическая	Изгибная жёсткость $EJ_Ф$, Нм^2, фактическая
1-3	2,11936E-06	-	-	605258,70	-
2-4	1,56911E-06	-	-	605258,70	-
3-5	9,91062E-07	1,18394E-06	1,194	605258,70	506780,58
4-6	4,40417E-07	-	-	605258,70	-
5-7	7,80357E-08	-	-	605258,70	-

По результатам расчёта фактическая изгибная жёсткость на участке 3-5 стойки на 16,7% ниже заявленной теоретической. Причиной снижения может быть не соответствующее стандарту значение модуля упругости *E* древесины, а также наличие некоторой упругой податливости заявленного жёсткого опорного узла.

Расчёт жёсткости стойки с нарушениями

Для определения чувствительности метода к конструктивным нарушениям в экспериментальной стойке были выполнены вырезы контролируемого размера с проведением аналогичные испытаний (рис. 6).

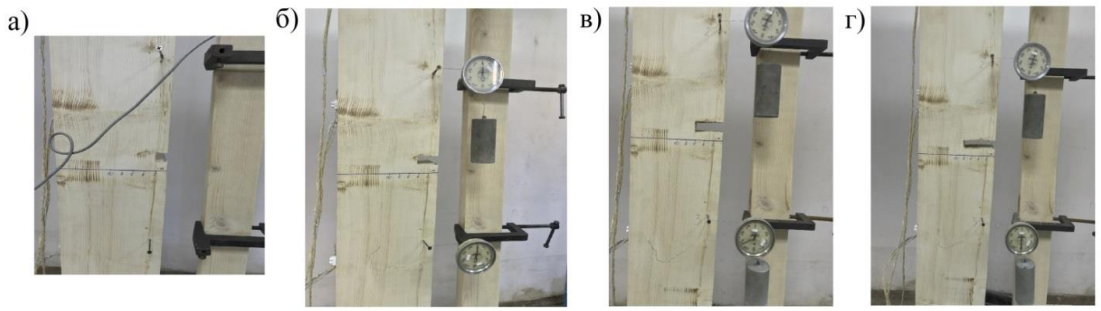

Рис. 6. Фото стойки с нарушениями в виде вырезов разных размеров: а) 2х2 см; б) 2х4 см; в) 2х6 см; г) 2х8 см.

Последовательно в стойке устраивались вырезы размером 2х2, 2х4, 2х6

и 2х8 см. Результаты расчётов жёсткости представлены в таблицах 5-8.

Таблица 5. Результаты расчёта жёсткости стойки с вырезом 2х2 см

Участок	Кривизна 1/ρт, теоретическая	Кривизна 1/ρф, фактическая	Отношение 1/ρф к 1/ρт	Изгибная жёсткость EJ_T, Нм^2, теоретическая	Изгибная жёсткость EJ, Нм^2, фактическая
1-3	2,11936E-06	-	-	605258,70	-
2-4	1,56911E-06	-	-	605258,70	-
3-5	9,91062E-07	1,38368E-06	1,396	605258,70	433517,12
4-6	4,40417E-07	-	-	605258,70	-
5-7	7,80357E-08	-	-	605258,70	-

Таблица 6. Результаты расчёта жёсткости стойки с вырезом 4х2 см

Участок	Кривизна 1/ρт, теоретическая	Кривизна 1/ρф, фактическая	Отношение 1/ρф к 1/ρт	Изгибная жёсткость EJ_T, Нм^2, теоретическая	Изгибная жёсткость EJ, Нм^2, фактическая
1-3	2,11936E-06	-	-	605258,70	-
2-4	1,56911E-06	-	-	605258,70	-
3-5	9,91062E-07	2,10208E-06	2,12	605258,70	285359,68
4-6	4,40417E-07	-	-	605258,70	-
5-7	7,80357E-08	-	-	605258,70	-

Таблица 7. Результаты расчёта жёсткости стойки с вырезом 6х2 см

Участок	Кривизна 1/ρт, теоретическая	Кривизна 1/ρф, фактическая	Отношение 1/ρф к 1/ρт	Изгибная жёсткость EJ_T, Нм^2, теоретическая	Изгибная жёсткость $EJ_Ф$, Нм^2, фактическая
1-3	2,11936E-06	-	-	605258,70	-
2-4	1,56911E-06	-	-	605258,70	-
3-5	9,91062E-07	2,82048E-06	2,85	605258,70	212676,15
4-6	4,40417E-07	-	-	605258,70	-
5-7	7,80357E-08	-	-	605258,70	-

Таблица 8. Результаты расчёта жёсткости стойки с вырезом 8х2 см

Участок	Кривизна 1/ρт, теоретическая	Кривизна 1/ρф, фактическая	Отношение 1/ρф к 1/ρт	Изгибная жёсткость EJ_T, Нм^2, теоретическая	Изгибная жёсткость EJ, Нм^2, фактическая
1-3	2,11936E-06	-	-	605258,70	-
2-4	1,56911E-06	-	-	605258,70	-
3-5	9,91062E-07	3,53888E-06	3,57	605258,70	169502,45
4-6	4,40417E-07	-	-	605258,70	-
5-7	7,80357E-08	-	-	605258,70	-

Заключение

Как ожидалось, расчётная фактическая изгибная жёсткость на участке 3-5 снижалась с ростом размеров нарушения. При вырезе 2х2 см фактическая

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

жёсткость стойки на 28,4% ниже теоретической; при вырезе 4х2 см – ниже на 52,9%; при вырезе 6х2 см – ниже на 64,9%; при вырезе 8х2 см – ниже на 72%.

Исходя из полученных результатов, предложенный метод может применяться для инструментальной диагностики конструктивных систем зданий и сооружений. Однако, как показывают исследования [2, 6], критерий оценки технического состояния (например, частота собственных колебаний) не всегда может оказаться чувствительным к реальным дефектам и повреждениям. Поэтому, требуется дальнейшая проверка чувствительности изменениям кривизны к наиболее распространённым дефектам и повреждениям конструкций из различного материала.

Перспектива развития предложенного метода заключается в применении вибрационных методов диагностики и использовании современного измерительного оборудования, способного регистрировать минимальные смещения при механических колебаниях. Анализ механических колебаний конструктивных систем убирает необходимость проведения статических испытаний, в большинстве случаев невозможных для эксплуатируемых сооружений. Однако для реализации данного метода требуется большая точность определения силового воздействия, а при анализе собственных свободных колебаний не представляется возможным выделить источник силового воздействия и точку его приложения. Необходимы динамические испытания с применением модульных вибростендов с контролируемым усилием по синусу, а также регистрация вынужденных колебаний с частотой, близкой к собственной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Столповский Г.А., Нестеренко А.М., Романюк П.В. Метод расчёта жёсткости строительных систем по динамическим параметрам. VII International Symposium APCSCE. Novosibirsk (Russia), 2018.
2. Коробко, В.И., Коробко А.В.Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии. М.: Изд-во АСВ, 2003. 285 с.
3. Нестеренко А.М., Столповский Г.А. Определение влияния армирования и предварительного напряжения на амплитудно-частотную характеристику железобетонной конструкции. Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2017. 3: 62-66.
4. Volkovas V., Petkevičius K., Eidukevičiūtė M., Akinci T.C. Diagnostics of construction defects in a building by using time-frequency analysis. MECHANIKA. 2012. 18(4): 432-437.
5. Volkovas V. The concept of buildings stability monitoring and damage diagnostics. Key Engineering Materials. 2013. 569-570: 238-245.
6. Жаданов В.И., Нестеренко А.М., Нестеренко М.Ю., Столповский Г.А. Исследование поглощающих свойств материала строительных конструкций на примере железобетонной перемычки. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. 9 (693): 76-86.

DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011

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): 130-135.
8. Котляревский В.А. Диагностика скрытых дефектов сейсмостойких сооружений по изменению частотного спектра. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. 4: 36-42.
9. Котляревский В.А., Сущев С.П., Ларионов В.И. Применение мобильных диагностических комплексов для оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса зданий и сооружений. Безопасность труда в промышленности. 2004. 3: 42-45.
10. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Глотов В.А. Комплекс инженерно-сейсмометрических методик для оценки состояния зданий и сооружений. Наука и безопасность. 2012. 5 (5): 40-61.
11. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Гл. ред. физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1970. 544с.

Поступила 14 февраля 2019 г.

(*Контактная информация:* **Нестеренко Алексей Михайлович** – ведущий инженер Отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН, аспирант Оренбургского государственного университета по направлению «Строительные конструкции. Здания и сооружения»; адрес: 460014, Оренбург, ул. Набережная, 29; E-mail: Alexnes@mail.ru);

Нестеренко Максим Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Отдела геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН; адрес: 460014, Оренбург, ул. Набережная, 29; E-mail: n_mu@mail.ru;

Столповский Георгий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции» Оренбургского государственного университета; адрес: 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13; E-mail: stolpovskij@mail.ru).

LITERATURE

1. Stolpovsky G.A., Nesterenko A.M., Romanyuk P.V. The method of calculating the rigidity of building systems by dynamic parameters. VII International Symposium APCSCE July, 1-8, 2018, Novosibirsk, Russia.
2. Korobko V.I., Korobko A.V. Quality control of building structures: Vibro-acoustic technologies. M .: Publishing house DIA, 2003. 285p.
3. Nesterenko A.M., Stolpovsky G.A. Determination of the effect of reinforcement and prestress on the amplitude-frequency characteristic of reinforced concrete structures. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technology. 2017. No. 3: 62-66.
4. Volkovas V., Petkevičius K., Eidukevičiūtė M., Akinci T.C. Building time using frequency-time analysis. MECHANIKA. 2012. 18 (4): 432-437.
5. Volkovas V. The concept of buildings. Key Engineering Materials, 2013. 569-570: 238-245.
6. Zhadanov V.I., Nesterenko A.M., Nesterenko M.Yu., Stolpovsky G.A. Investigation of the absorbing properties of the material of building structures on the example of a ferroconcrete bridge. Proceedings of higher educational institutions. Building. 2016. 9 (693): 76-86.
7. Korobko V.I., Kalashnikov M.O., Kalashnikova O.V. Control of stiffness of iron-tone jumpers using a dynamic criterion - non-linear distortion coefficient. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2015. No. 6 (314): 130-135.
8. Kotlyarevsky V.A. Diagnostics of latent defects of seismic structures to change the frequency spectrum. Seismic construction. Safety of buildings. 2014. No. 4: 36-42.
9. Kotlyarevsky V.A., Sushchev S.P., Larionov V.I. The use of mobile diagnostic systems for

assessing the strength, stability and residual life of buildings and structures. Industrial Safety. 2004. 3: 42-45.
10. Kapustyan N.K., Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Glotov V.A. Complex engineering seismometric methods for assessing the condition of buildings and structures. Science and safety. 2012. 5 (5): 40-61.
11. Feodosyev V.I. Resistance of materials. M.: Main edition of the physico-mathematical literature of the publishing house "Science", 1970. 544 p.

Образец ссылки на статью:

Нестеренко А.М., Нестеренко М.Ю., Столповский Г.А. Подход к решению обратной задачи изгиба на примере деревянной стойки. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2019. 1. 13с. [Электр. ресурс] (URL: http://elmag.uran.ru:9673/ magazine/ Numbers/2019-1/Articles/NAM-2019-1.pdf) **DOI: 10.24411/2304-9081-2019-11011.**