

3
НОМЕР

БОНЦ

ISSN 2304-9081

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

<http://www.elmag.uran.ru>

БЮЛЛЕТЕНЬ

ОРЕНБУРГСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРО РАН

Vulpes corsac Linnaeus, 1768

Корсак

Паженков А.С.



2021

УЧРЕДИТЕЛЬ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОРЕНБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

© А.М. Нестеренко, М.Ю. Нестеренко, 2021

УДК 69.04

А.М. Нестеренко, М.Ю. Нестеренко

КРИВИЗНА ФОРМЫ ИЗГИБА КАК ДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Оренбургский научный центр УрО РАН (Отдел геоэкологии), Оренбург, Россия

В статье описывается параметр конструктивной системы – кривизна формы изгиба как динамический критерий оценки технического состояния. Исследование вызвано проблемой свойства изменения перемещений в конструктивной системе из-за перемены жёсткости поперечного сечения в одной из её точек вследствие дефекта или повреждения. Предыдущие исследования различных динамических критериев контроля сооружений выявили нехватку точности. Анализ динамической работы конструктивной системы лишь по внутреннему отклику ограничен разнообразием внешних силовых факторов, определение которых затруднено. Вследствие этого, актуально развитие методов испытаний сооружений с контрольной силой воздействия. В работе приводятся результаты апробации кривизны формы изгиба при статических и динамических испытаниях. Выявлена необходимость учета жесткости узлов сопряжения конструкций, а также высокая зависимость относительной погрешности способа от величины динамической силы вибростенда и расстояния между регистрационными датчиками.

Ключевые слова: конструктивная система, техническое состояние, изгиб, кривизна, динамические испытания.

A.M. Nesterenko, M.Yu. Nesterenko

BENDING SHAPE CURVATURE AS A DYNAMIC CRITERION FOR THE STRUCTURAL HEALTH CONTROL

Orenburg Scientific Center, UrB RAS (Department of Geoecology), Orenburg, Russia

The paper describes a constructive system parameter - Bending shape curvature, as a dynamic criterion for assessing the technical state of structures. Previous studies of various dynamic criteria for structural health control have revealed a lack of accuracy. Analysis of a constructive system dynamic work based on internal response only is limited by a variety of external force factors, the determination of which is difficult. A constructive system can be deformed due to a change in cross-section stiffness at one of its elements because of a defect or damage and that affects displacements at its control points. It makes it difficult to determine bending stiffness only by constructive system displacements. As a result, the development of structure test methods with a control impact force is relevant. The article presents the methods of calculating bending shape curvature over controlled displacements. It is suggested to use an artificial impact on a structural system for getting the elements response to the bending moment. The advantage of bending shape curvature calculating for assessing the stiffness of a structure system is explained. It is shown the results of defect size influence on bending shape curvature during static tests and stiffness assessment results of the metal frame during dynamic tests. The necessity of taking into account the stiffness of structures joints has been revealed, as well as a high dependence of method's relative error on the value of dynamic shaker force and the distance between registration sensors.

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

Введение

На протяжении развития строительной отрасли проходят дискуссии о необходимости проведения различных испытаний зданий, сооружений и их строительных конструкций. Существует мнение, что для оценки технического состояния строительного объекта хватает визуального обследования и точечных замеров методами неразрушающего контроля [1-2]. Однако, большое количество аварий как на только что возведённых зданиях, так и на эксплуатируемых, говорит о недостаточности данных мероприятий. Испытания на текущую несущую способность позволили бы снизить их количество. Сейчас наблюдается общемировая тенденция повышения материальной эффективности строительства за счет современных средств проектирования и расчета, что позволяет существенно снизить запасы по прочности и жёсткости [3]. Это понижает стоимость строительства, но приводит к возрастанию цены ошибки монтажных работ и экспертного контроля. Таким образом, проведение экспертных испытаний является необходимым и актуальным, что повысит надёжность и эффективность строительства зданий и сооружений.

Определение динамических критериев оценки технического состояния сооружений является актуальной и сложной задачей, так как при различных условиях действует большое количество факторов, влияющих на динамику системы [4]. В последнее время появляется большое количество работ, посвященных динамике конструкций в отдельности и всего сооружения в целом. Критерием оценки технического состояния в этих методах являются частоты собственных колебаний [5,6,7,9,13], логарифмический декремент затухания, коэффициенты нелинейных искажений и амплитудной модуляции [6-10]. Данные критерии с различной точностью дают общую интегральную оценку состояния всего сооружения в целом, но не направлены на контроль отдельно взятой конструкции эксплуатируемого сооружения. Проблемным вопросом остаётся низкая точность и разрешающая способность динамических методов.

При динамических испытаниях могут быть определены параметры системы, отражающие её внутренние свойства: резонансная частота, декремент затухания, амплитуды. Амплитуда, или перемещение, не позволяет вычислить жёсткость, как отдельной конструкции в системе, так и контрольного участка этой конструкции. Для повышения точности определения жесткости на требуемом участке элемента конструктивной системы предлагается в ка-

честве динамического критерия рассмотреть кривизну формы изгиба. Данный параметр можно использовать в методе сопоставления, вычисляя его для эталонной системы по априорным проектным данным и для фактической системы по измеренным данным. Основная трудность связана с получением отклика на изгиб конструктивных элементов обследуемого сооружения. Для этого удобно использовать динамические испытания [11], в ходе которых конструктивная система выводится из равновесия при помощи модульного вибростенда. При этом кривизна изгиба рассматривается в рамках участка определенного размера, который определяется исходя из характеристик систем возбуждения и регистрации механических колебаний.

Целью исследования является выявление особенностей применения кривизны формы изгиба при статических и динамических испытаниях строительного объекта.

В работе решались следующие задачи:

1. Определить актуальность динамических испытаний перед статическими.
2. Определить существующие критерии оценки технического состояния строительного объекта при динамических испытаниях.
3. Провести апробацию способа оценки жесткости по кривизне формы изгиба при статических испытаниях с имитацией конструктивного дефекта.
4. Провести апробацию способа оценки жесткости по кривизне формы изгиба при динамических испытаниях.

1. Актуальность динамических испытаний.

Динамические испытания можно определить, как эксперименты над строительными конструкциями или конструктивными системами зданий и сооружений, связанные с имитацией рабочей изменяющейся во времени нагрузки [12]. Основными техническими устройствами динамических испытаний являются система возбуждения вынужденных колебаний и система регистрации (рис. 1).

По нашему опыту, основные преимущества динамических испытаний перед статическими являются:

1. Компактность динамических установок. Благодаря динамическому эффекту статический вес эксцентрика установки может быть существенно ниже веса нагружающих элементов при статических испытаниях. Современные модульные электродинамические вибростенды, в зависимости от испол-

нения, имеют максимальную синусоидальную силу 75-2700 N при относительно небольшой массе 0.1-3.4 кг внутреннего движущегося элемента.

2. Широкие возможности по задаваемым схемам загрузки. Вследствие своей компактности модульные вибростенды могут быть установлены в различных требуемых направлениях, позволяя задать опытную динамическую нагрузку.

3. Удобство транспортировки динамических технических устройств.

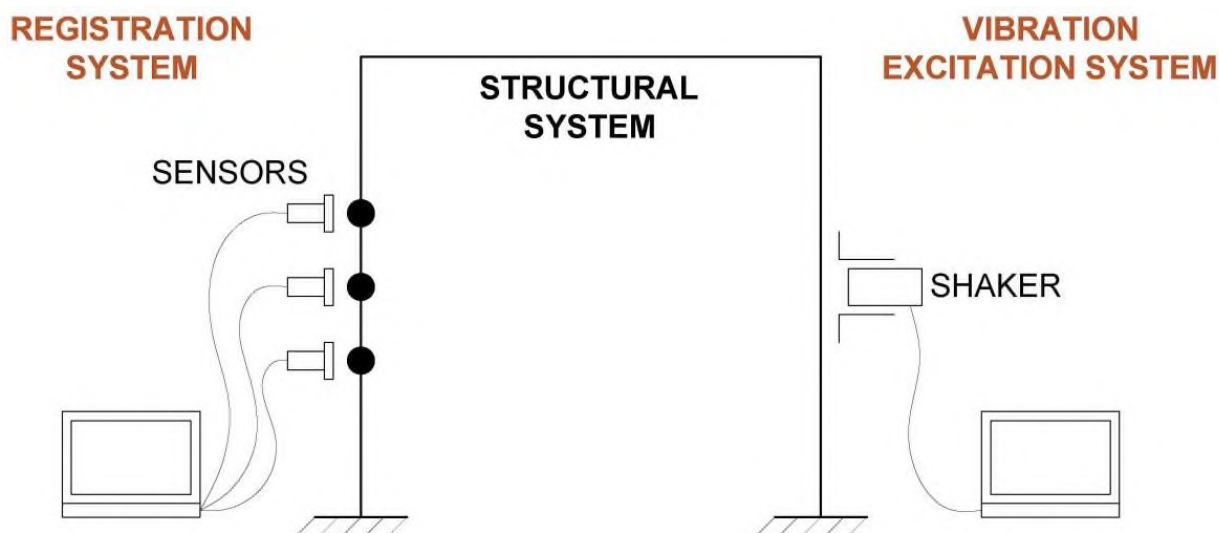


Рис. 1. Концептуальная схема динамических тестов.

Недостатки динамических испытаний перед статическими:

1. Меньшая по сравнению со статическими испытаниями точность измерений. Для регистрации механических колебаний в точках контроля используются вибрационные датчики (ёмкостные или пьезоэлектрические акселерометры, электромеханические велосиметры и др.). У данных приборов относительная погрешность измерения амплитуды составляет в среднем 5 %, тогда как погрешность статических прогибомеров, — 0.1 %. Стоит отметить, что технологии и производство виброизмерительного и сейсмометрического оборудования стремительно развиваются с постоянным улучшением точности измерений.

2. Меньшая по сравнению со статическими испытаниями точность имитации нагрузки. Относительная погрешность синусоидальной силы модульных вибростендов составляет около 3 %, что выше статических аналогов.

Таким образом, динамические испытания имеют определённые преимущества перед статическими. В частности, на эксплуатируемых и возво-

димых сооружениях трудоёмко, а часто, невозможно провести статические испытания с соответствующими измерениями.

2. Критерии оценки технического состояния при динамических испытаниях.

Известен ряд динамических параметров конструктивной системы. Наиболее исследованный, с точки зрения контроля, параметр – частота колебаний. Имеется большое количество исследований [6, 7, 9, 10, 13], направленных на анализ частот колебаний зданий и сооружений во взаимосвязи с их жёсткостью и надёжностью. Эти исследования говорят об удобстве определения интегральной целостности и несущей способности сооружения по частотному анализу. Особенно удобно проводить мониторинг технического состояния, поскольку мероприятия по определению частоты собственных колебаний мало трудоёмки. Однако, с точки зрения детального анализа каждого отдельного элемента или узла конструктивной системы здания или сооружения, частотный анализ не эффективен. Прежде всего, из-за взаимосвязи всех конструкций в одной единой системе. Поэтому резонансные частоты являются лишь результатом общей работы всех строительных конструкций. По этой причине, в нашей работе мы акцентируем внимание именно на конструктивной системе здания или сооружения и её динамических параметрах. При этом для поэлементной диагностики конструкций и узлов необходимо анализировать формы колебаний и, соответственно, их амплитуды в разных точках сооружения.

В строительных конструкциях, как правило, происходят поперечные колебания, которые связаны с изгибными деформациями. Форма изгиба зависит от жёсткости конструкции и, следовательно, от наличия или отсутствия дефектов и повреждений. При одинаковых граничных условиях и нагрузках, то есть при одинаковых эпюрах изгибающего момента, две целых конструкции будут иметь одинаковую кривизну изогнутой оси, тогда как пара дефектной и целой конструкций покажет различную кривизну оси. Дефекты и повреждения конструкций существенно влияют на их изгибную жёсткость поперечного сечения. Определив жёсткость на заданном участке конструкции сооружения, можно сделать вывод о её фактической несущей способности, остаточном ресурсе и техническом состоянии.

Оценка жёсткости системы может быть выполнена на основе анализа амплитуд на определённых формах колебаний [14]. Информация о переме-

щении элемента конструктивной системы в одной точке не достаточна для оценки жёсткости. На результирующие перемещения в точке контроля влияют перемещения соседних точек по длине элемента (рис. 2(а)). Соответственно, изменение жёсткости поперечного сечения в одной точке приводит к изменению перемещений во всех точках конструкции. Исключить данный фактор можно расчётом кривизны формы изгиба конструкции. Численные и натурные эксперименты подтверждают следующее: кривизна участка изгибаемого элемента конструктивной системы не зависит от жёсткости соседних участков по длине [14]. В ходе наших исследований были рассмотрены свойства изгиба стержней и пластин, как наиболее распространённых элементарных конструктивных элементов.

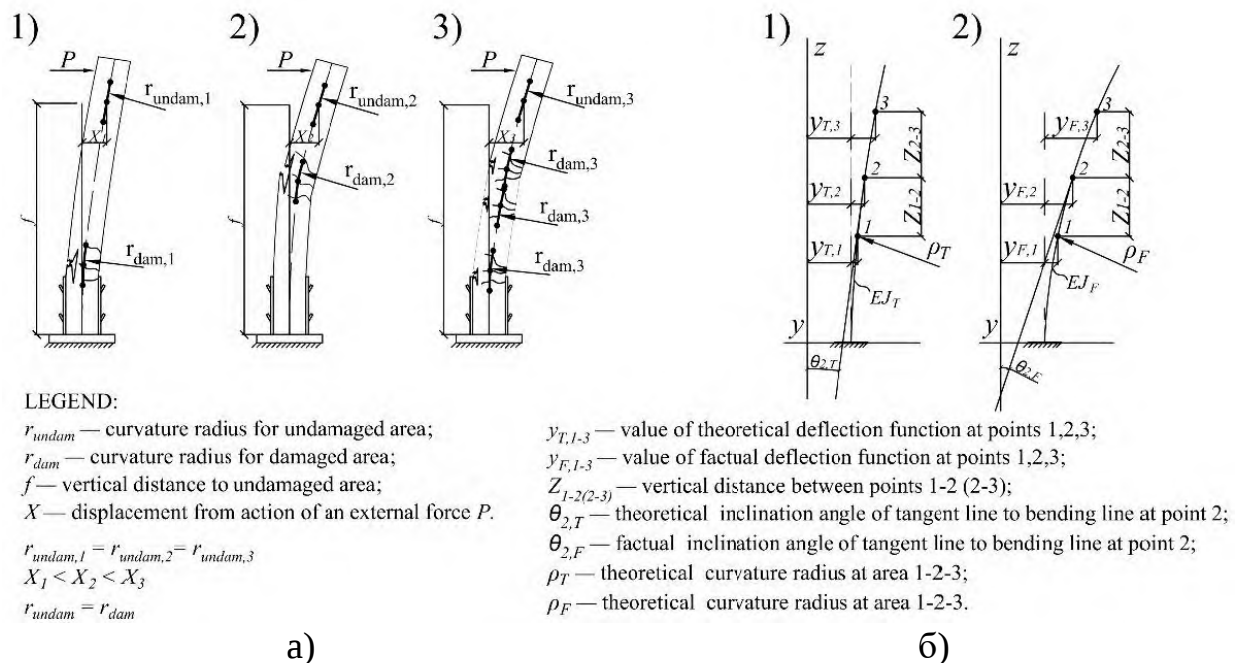


Рис. 2. Влияние зон пониженной жёсткости на перемещения и кривизну изгибаемого элемента: 1) повреждение внизу элемента; 2) повреждение в середине элемента; 3) несколько повреждений; б) Формы изогнутых стержней: 1) теоретическая; 2) фактическая.

Для балочных конструкций подходит модель балки Бернулли-Эйлера (Рис. 2, б) и известное дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M}{EJ_x} \quad (1)$$

где $\frac{dy}{dz}$ — угол θ наклона касательной между касательной к упругой линии и осью z ;

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M}{EJ_x}$$

— вторая производная по приращению z в точке.

Используя метод сопоставления, можно сравнить результаты решения данного уравнения для теоретической и фактической форм изгиба или колебаний. При одинаковом изгибающем моменте от внешней нагрузки формы изогнутой оси стержней будут отличаться только за счёт изменения изгибной жёсткости (2) [14].

$$\frac{B_T}{B_\Phi} = \frac{EJ_T}{EJ_\Phi} = \frac{\frac{1}{\rho_\Phi}}{\frac{1}{\rho_T}} = \frac{\rho_T}{\rho_\Phi}, \quad (2)$$

Таким образом, отношение изгибных жёсткостей теоретического и фактического стержней прямо пропорционально отношению их радиусов кривизны. Для получения значения радиуса кривизны необходимо решить дифференциальное уравнение (1) в амплитудах колебаний. Для этого, определим производные функции перемещения точек стержня по его длине (рис. 2, б). Ввиду малости значений поперечных смещений по сравнению с расстоянием между точками изменением расстояния при изгибе можно пренебречь.

Тогда первые производные $\frac{dy_1}{dz}$ и $\frac{dy_2}{dz}$ в точках 1 и 2 уравнения смещений определяются:

$$\frac{dy_1}{dz} = \frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}; \quad \frac{dy_2}{dz} = \frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}}, \quad (3)$$

где $\frac{dy_1}{dz}$ — угол θ наклона касательной к упругой линии в точке 1;

$\frac{dy_2}{dz}$ — угол θ наклона касательной к упругой линии в точке 2;

y_1 — значение функции прогиба в точке 1 в зависимости от смещения вдоль оси Z ;

y_2 — значение функции прогиба в точке 2 в зависимости от смещения вдоль оси Z ;

y_3 — значение функции прогиба в точке 3.

Вторая производная в точке 1:

$$\frac{d^2y_1}{dz^2} = \frac{\frac{dy_2}{dz} - \frac{dy_1}{dz}}{\frac{Z_{1-2}}{2} + \frac{Z_{2-3}}{2}} = \frac{2 \cdot \frac{y_3 - y_2}{Z_{3-2}} - 2 \cdot \frac{y_2 - y_1}{Z_{1-2}}}{Z_{1-2} + Z_{2-3}}; \quad (4)$$

Тогда кривизна изгиба стержня в точке 1 будет равна:

$$\kappa_1 = \frac{1}{\rho_1} \quad (5)$$

Таким образом, для вычисления кривизны на требуемом участке конструкции необходимо измерить перемещения в трёх точках участка контроля. В свою очередь, для расчёта кривизны изгиба в точке 2, нужно измерить перемещения и вычислить производные для следующей соседней точки 3.

Для случая изучения кривизны изгиба пластин принимается система координат, при которой начало координат и оси x и y лежат в недеформированной срединной плоскости пластины, а ось z направлена перпендикулярно к срединной плоскости. То есть деформация пластин рассматривается вдоль двух осей, а величина характеризуется соответствующими прогибами. Срединная плоскость ее превращается в изогнутую поверхность с главными радиусами кривизны ρ_1 (в сечении плоскостью, параллельной плоскости XoZ) и ρ_2 (в сечении плоскостью, параллельной плоскости YoZ). Соответствующие главные кривизны срединной поверхности:

$$\kappa_1 = \frac{1}{\rho_1} \quad \text{и} \quad \kappa_2 = \frac{1}{\rho_2} \quad (6)$$

Соответственно, радиусы кривизны:

$$\rho_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \text{и} \quad \rho_2 = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (7)$$

Рассмотрим решение данных дифференциальных уравнений для случая измеренных перемещений в трёх соседних точках (рис. 3). Первые производные функции прогиба пластины $w = f(x, y)$ по ∂x в точках $(x_1; y_2)$ и $(x_2; y_2)$ будут равны:

$$\frac{\partial w}{\partial x_1} = \frac{W(x_2; y_2) - W(x_1; y_2)}{Z(x_2 - x_1)} \quad \text{и} \quad \frac{\partial w}{\partial x_2} = \frac{W(x_3; y_2) - W(x_2; y_2)}{Z(x_3 - x_2)}, \quad (8)$$

где $W(x_2; y_2)$ — значение прогиба пластины в точке $(x_2; y_2)$;

$W(x_1; y_2)$ — значение прогиба пластины в точке $(x_1; y_2)$;

$Z(x_2 - x_1)$ — расстояние между точками $(x_2; y_2)$ и $(x_1; y_2)$;

$W(x_3; y_2)$ — значение прогиба пластины в точке $(x_3; y_2)$;

$Z(x_3 - x_2)$ — расстояние между точками $(x_3; y_2)$ и $(x_2; y_2)$.

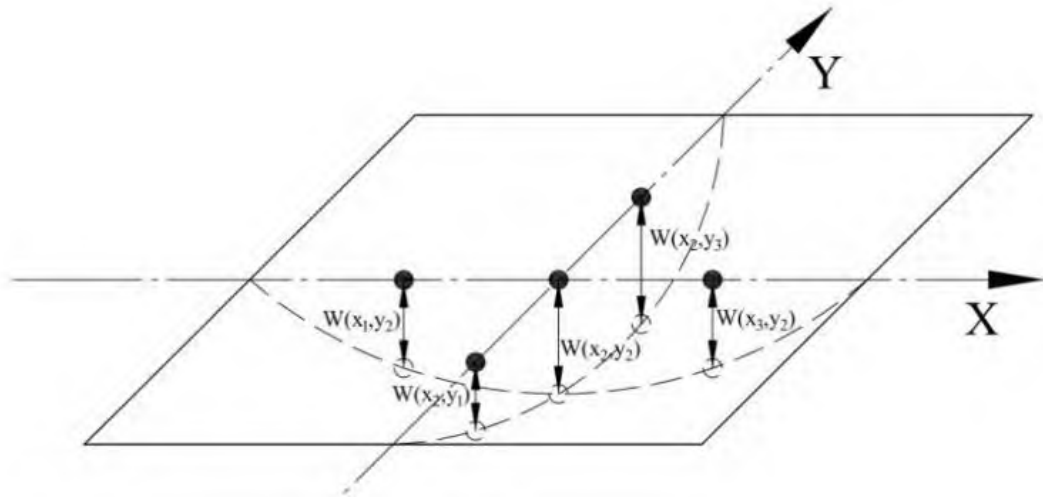


Рис. 3. Схема измерения радиуса кривизны изгиба пластины в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Первые производные функции прогиба пластины $w = f(x, y)$ по ∂y в точках $(x_2; y_1)$ и $(x_2; y_2)$ будут равны:

$$\frac{\partial w}{\partial y_1} = \frac{W(x_2; y_2) - W(x_2; y_1)}{Z(y_2 - y_1)} \quad \text{и} \quad \frac{\partial w}{\partial y_2} = \frac{W(x_2; y_3) - W(x_2; y_2)}{Z(y_3 - y_2)} \quad (9)$$

где $W(x_2; y_1)$ — значение прогиба пластины в точке $(x_2; y_1)$;

$Z(y_2 - y_1)$ — расстояние между точками $(x_2; y_2)$ и $(x_2; y_1)$;

$W(x_2; y_3)$ — значение прогиба пластины в точке $(x_2; y_3)$;

$Z(y_3 - y_2)$ — расстояние между точками $(x_2; y_3)$ и $(x_2; y_2)$.

Далее вторая производная функции прогиба пластины $w = f(x, y)$ по ∂y в точке $(x_1; y_2)$:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} = \frac{\frac{\partial w}{\partial x_2} - \frac{\partial w}{\partial x_1}}{Z(x_2 - x_1)} \quad (10)$$

Вторая производная функции прогиба пластины $w = f(x, y)$ по ∂y в точке $(x_2; y_1)$:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y_1^2} = \frac{\frac{\partial w}{\partial y_2} - \frac{\partial w}{\partial y_1}}{Z(y_2 - y_1)} \quad (11)$$

Тогда радиусы кривизны пластины по осям X и Y будут иметь вид:

$$\rho_1 = -\frac{\partial x^2}{\partial^2 w} = \frac{Z(x_2 - x_1)}{\frac{\partial w}{\partial x_2} - \frac{\partial w}{\partial x_1}} \quad (12)$$

$$\rho_2 = -\frac{\partial y^2}{\partial^2 w} = \frac{Z(y_2 - y_1)}{\frac{\partial w}{\partial y_2} - \frac{\partial w}{\partial y_1}} \quad (13)$$

Согласно описанной выше для стержней методике радиусы кривизны пластин вычисляются для их теоретического и фактического состояний. Далее составляется их отношение для расчёта фактической изгибной жёсткости поперечного сечения пластины в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При одинаковом изгибающем моменте от внешней нагрузки формы изогнутых осей пластин, построенных по теоретическим и экспериментальным данным, будут отличаться только за счёт изменения изгибной жёсткости. Тогда отношение жёсткостей будет иметь вид:

$$\frac{B_{T,x}}{B_{Ф,x}} = \frac{\rho_{T,x}}{\rho_{Ф,x}} \text{ и } \frac{B_{T,y}}{B_{Ф,y}} = \frac{\rho_{T,y}}{\rho_{Ф,y}} \quad (14)$$

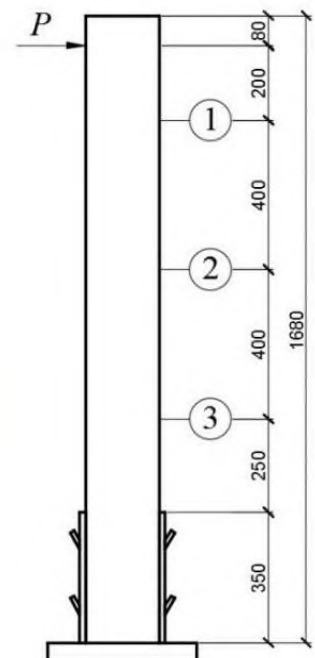
Стоит отметить, что при таком способе определения жесткости конструктивных элементов требуется учитывать фактическую жесткость узлов их сопряжения.

3. Апробация способа оценки жесткости по кривизне формы изгиба при статических испытаниях с имитацией конструктивного дефекта.

Для апробации кривизны формы изгиба и оценки его чувствительности по определению жёсткости конструктивной системы проводился эксперимент со статическими испытаниями деревянной стойки и жестко защемленного узла (рис. 4, а) [14].



а)



б)

Рис. 4. Лабораторная установка: фото (а) и схема деревянной стойки (б).

Обозначения: 1, 2, 3 - контрольные точки; P - направление и точка приложения силы.

Имитировался конструктивный дефект с контролем его размера (вырезы 20x20, 20x40, 20x60, 20x80 мм). Измерения перемещений от нагрузки, создаваемой лебёдкой с храповым механизмом, производились в трёх соседних точках в стойки на расстоянии 400 мм друг от друга при помощи прогибометров в виде индикаторов часового типа, которые располагались и ограничивали контрольный участок (рис. 4, б). По измерениям вычислялась кривизна изгиба. Также, для сравнения результатов, испытания стойки моделировались в расчетном комплексе LIRA SAPR с имитацией параметров опыта [14].

По результатам эксперимента установлено: с ростом нагрузки уменьшается радиус кривизны и, следовательно, увеличивается изгиб. Форма всех кривых – гипербола. Наибольший радиус кривизны показала модельная стойка в расчетном комплексе на всех этапах нагружения (рис. 5, черная линия).

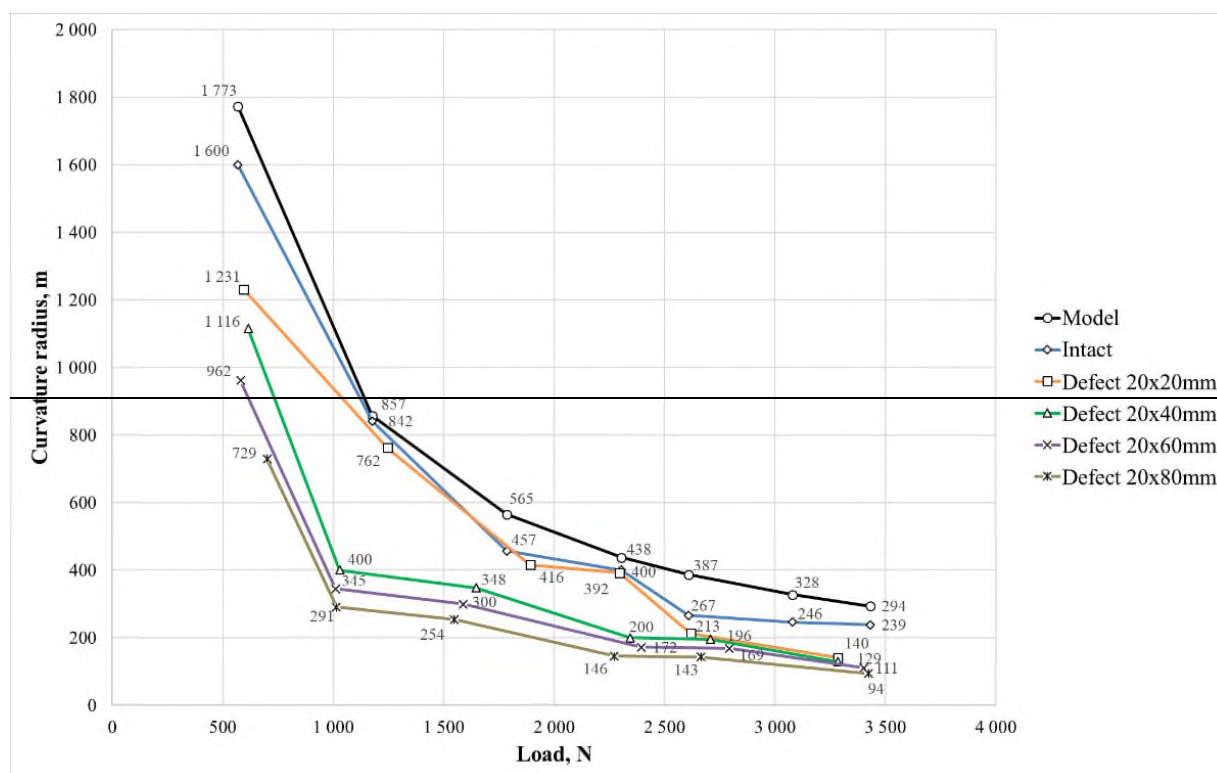


Рис. 5. Радиус кривизны изгиба стойки при различных размерах дефектной зоны.

График радиуса для целой стойки (рис. 5, синяя линия) близок по значениям к модельному. Наменьшее значение радиуса показала стойка с нарушением 20x80 мм. То есть элемент с наименьшей жёсткостью на контрольном участке показал наибольшую деформативность. Важно отметить, что с ростом величины дефекта, кривизна изгиба на соседнем

целом участке остается в изначальных значениях на каждом этапе нагружения. Графики радиуса кривизны при всех размерах дефекта остаются близко расположенными и похожими по форме, значения радиуса существенно не уменьшаются (рис. 6).

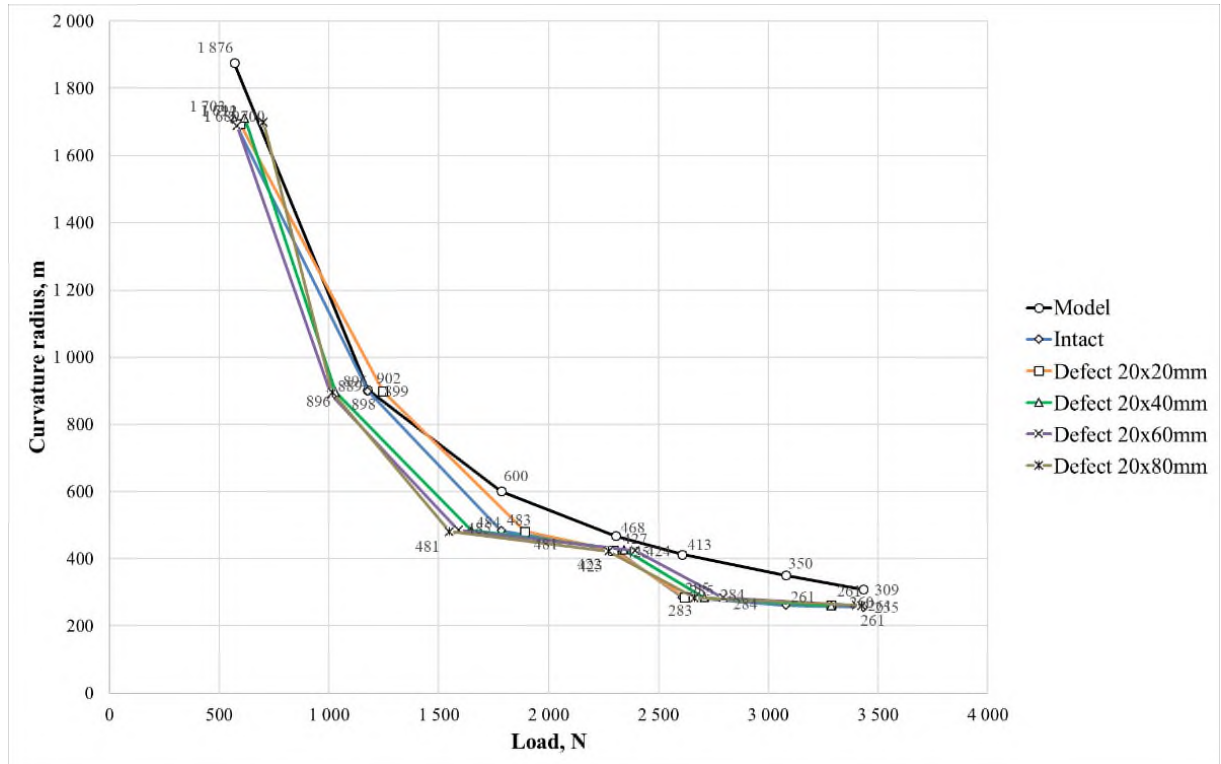


Рис. 6. Радиус кривизны изгиба на соседней к дефекту зоне.

При обработке результатов не учитывалось возможное снижение модуля деформации древесины стойки. В указанных условиях погрешность определения жесткости относительно расчетных значений с учетом величины дефекта составила 12%. Таким образом, точность способа при статических испытаниях составляет 88% [14].

4. Апробация способа оценки жесткости по кривизне формы изгиба при динамических испытаниях.

Как было сказано выше, динамические испытания имеют существенные преимущества перед статическими в случае обследования сооружения в целом. Поэтому важно оценить точность предложенного способа определения жесткости при динамических испытаниях.

В ходе реализации динамических испытаний требуется подбор испытательного оборудования с учетом обследуемого объекта [15]. Как правило, оборудование для динамических испытаний состоит из системы

регистрации и системы возбуждения механических колебаний. Основные параметры этих систем [15]:

1. Регистрирующая способность. При проведении динамических испытаний наиболее важная характеристика — минимальная регистрируемая амплитуда колебаний (мм, м/с, м/с²), или порог чувствительности R_{lim} [15]. Механические вынужденные колебания определяются мощностью динамической установки N_{dyn} (Н). Соответственно, чем выше мощность установки, тем ниже требуемый порог чувствительности. Моделирование конструктивной системы диагностируемого сооружения позволяет предварительно оценить ожидаемую амплитуду при заданной мощности вибростенда. Мощность N_{dyn} может быть ограничена минимальной N_{dyn}^{min} и максимальной допускаемой N_{dyn}^{max} динамической силой установки. N_{dyn}^{min} определяется уровнем естественного сейсмического и вибрационного шума. N_{dyn}^{max} не должна превышать проектную нагрузку с учётом динамического эффекта установки. Условие подбора мощности [15]:

$$N_{dyn}^{min} < N_{dyn} < N_{dyn}^{max} \quad (15)$$

$$N_{dyn}^{max} = \beta \cdot N_{pr} \quad (16)$$

где N_{pr} - проектное значение внешней нагрузки на конструктивную систему сооружения в заданном направлении; β - коэффициент динамичности.

За исходное значение порога регистрации R_{lim}^{min} можно принять амплитуду в точке конструкционной системы с наибольшей жесткостью. Таким образом, под чувствительностью динамического оборудования можно понимать отношение динамической силы к минимальному регистрируемому сигналу [15]. Приблизительный график чувствительности имеет линейную форму (рис. 7). Определение точной зависимости порога регистрации от динамической силы является задачей дальнейших исследований.

2. Частотный диапазон системы регистрации. Диапазон должен лежать в пределах 5-ти первых частот собственных колебаний обследуемого сооружения. Полоса частот 0.1-300 Гц покрывает большинство конструктивных решений зданий и сооружений [15].

Для апробации кривизны формы изгиба как динамического критерия изготовлена экспериментальная установка, которая состоит из опытной про-

странственной металлической рамы и динамического испытательного оборудования (рис. 8).

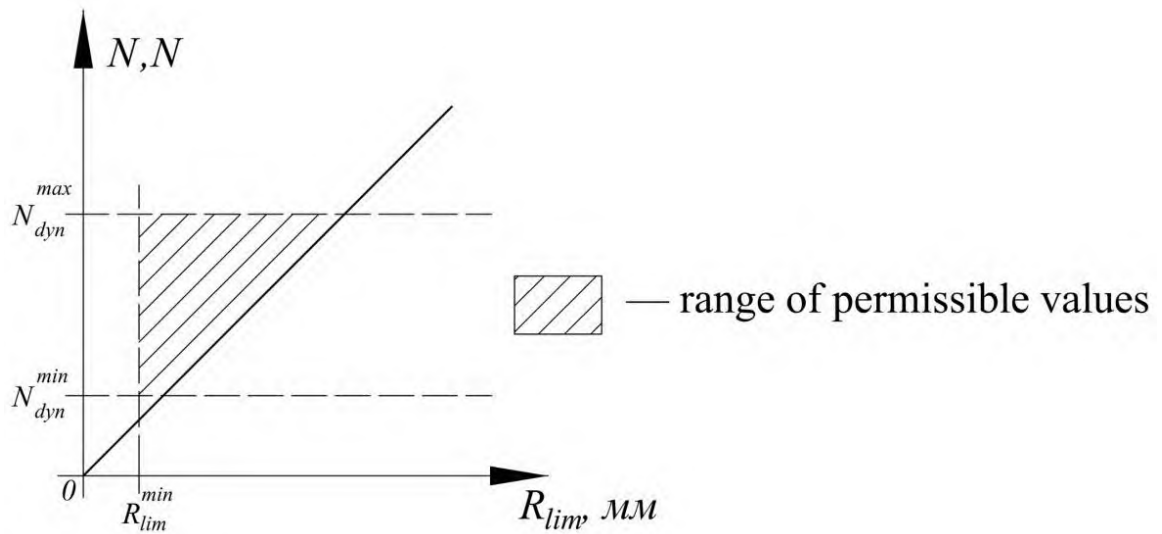


Рис. 7. График чувствительности оборудования для динамических испытаний.

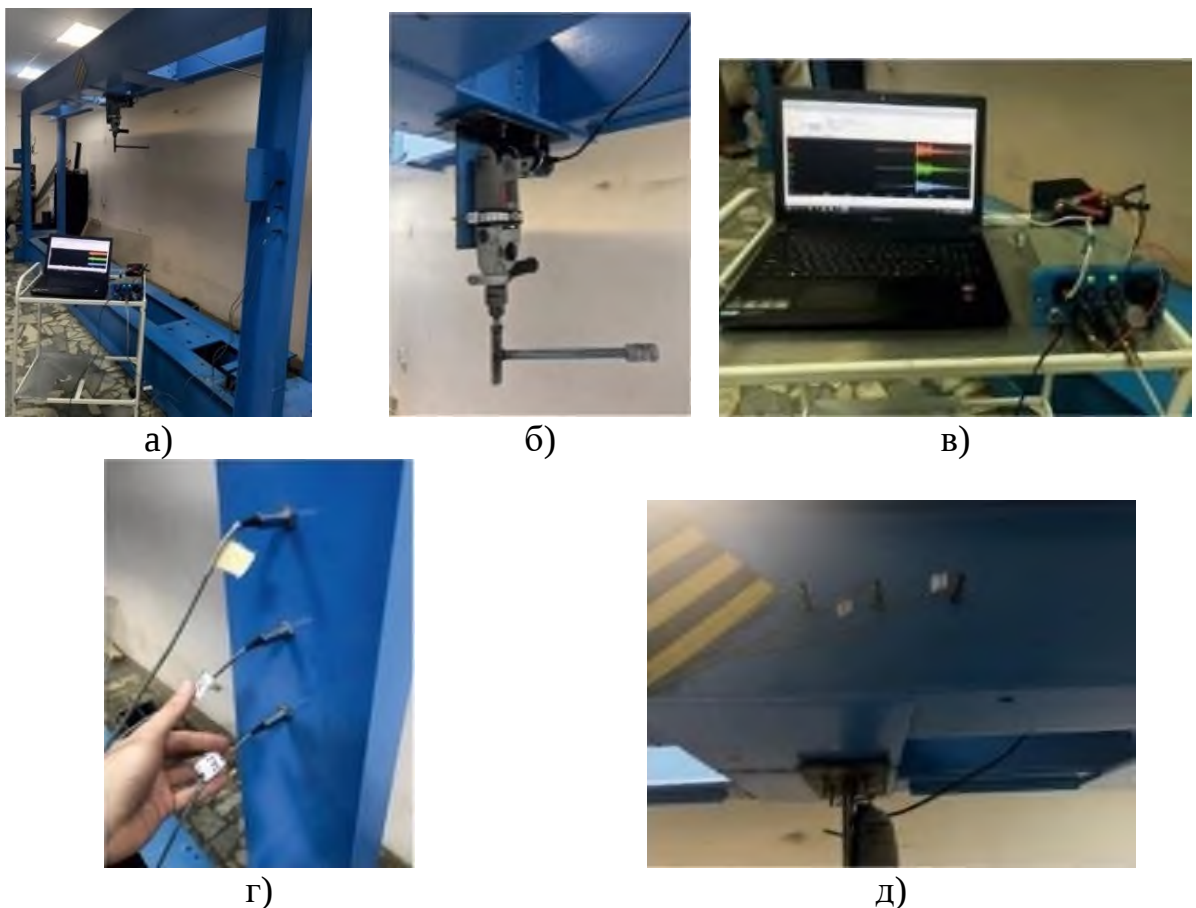


Рис. 8. Экспериментальная установка: общий вид рамы (а), модульный вибростенд (б), система регистрации колебаний (в), размещение датчиков на стойке (г) и ригеле (д) рамы.

Элементы рамы: ригели из двутавра 35Б1, стойки из швеллеров 120У, диафрагмы жёсткости из листовой стали толщиной 8 мм и 12 мм. Анализи-
DOI: 10.24411/2304-9081-2021-13002

ровалась жёсткость всех четырёх стоек и двух ригелей рамы. На данных элементах располагались контрольные точки (Рис. 8, д).

Параметры испытательного динамического и измерительного оборудования показаны в таблицах 1-2. Схема испытания и измерений показаны на рисунке 9.

Таблица 1. Характеристики модульного вибростенда

Характеристика	Единица измерения	Значение
Пиковая синусоидальная сила	Н	604,4
Частотный диапазон	Гц	0-25
Линейная частота колебаний	Гц	6,58
Масса эксцентрика	Кг	0,885
Радиус вращения эксцентрика	м	0,4

Таблица 2. Характеристики системы регистрации

Характеристика	Единица измерения	Значение
Частотный диапазон акселерометров ВС 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

Сначала производится определение динамических параметров. Определяются частоты собственных колебаний рамы и логарифмические декременты колебаний. Для этого рама выводится из равновесия серией ударов, что возбуждает механические колебания. 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.

Частоты и декремент затухания определяются по известным методикам [7, 16] через выделение пиков на амплитудном спектре участков виброграмм, содержащих «удары» (рис. 10). Критерии выбора частот: повторение значений на всех участках, несовпадение значения с отношением $50/N$ (N — целое число) для исключения влияния работы электрических машин.

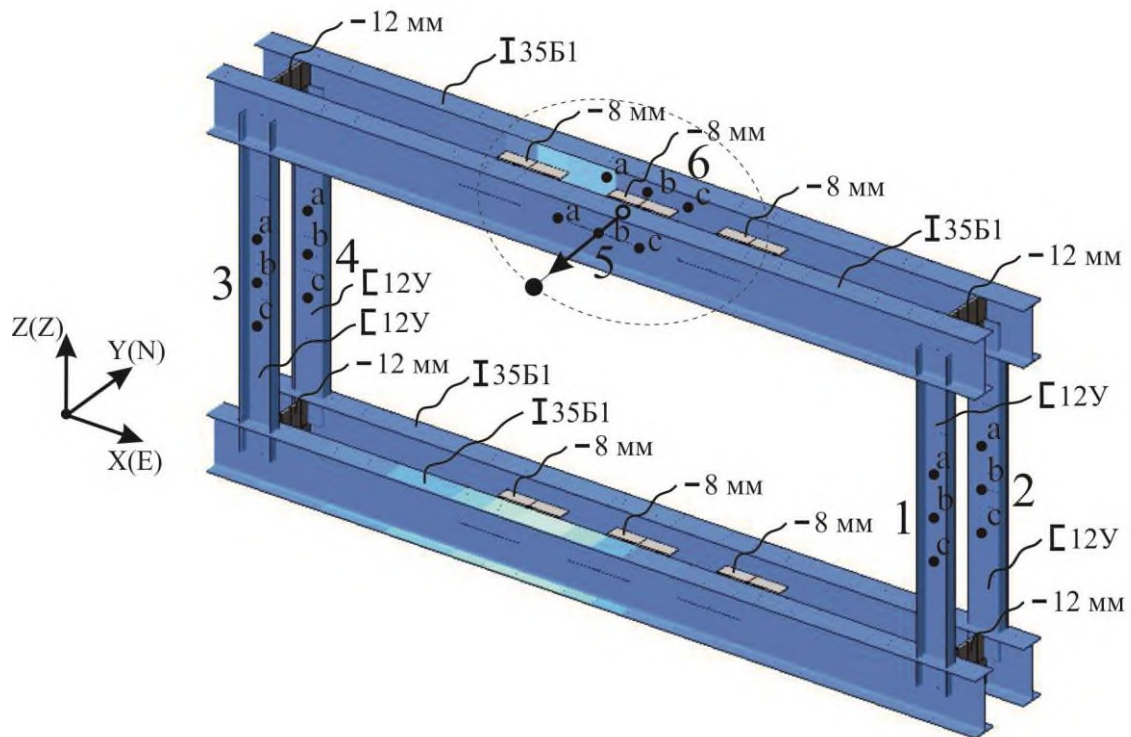


Рис. 9. Модель рамы, принятые оси измерений, траектория движения эксцентрика, точки измерения колебаний (a, b, c).

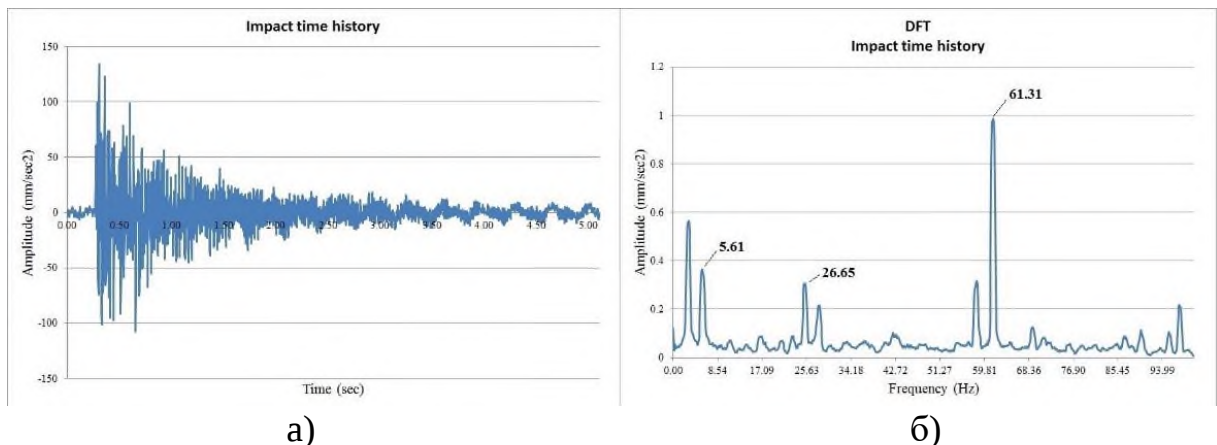


Рис. 10. Виброграмма «удара» (а); график дискретного преобразования Фурье с резонансными частотами (б).

Логарифмический декремент колебаний определяется как натуральный логарифм отношения двух соседних критических (с нулевой производной) точек на виброграмме (Рис. 11, а). 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).

Далее производится регистрация вынужденных колебаний, возбуждаемых модульным вибростендом (Рис. 11, б). Длительность воздействия составляет 10 секунд с момента установления постоянной частоты вращения

осциллятора. Производится серия пусков вибростенда с поочерёдной регистрацией колебаний вдоль и поперек рамы. Обработка виброграмм производилась в программной среде Windows Seismic Grafer (WSG).

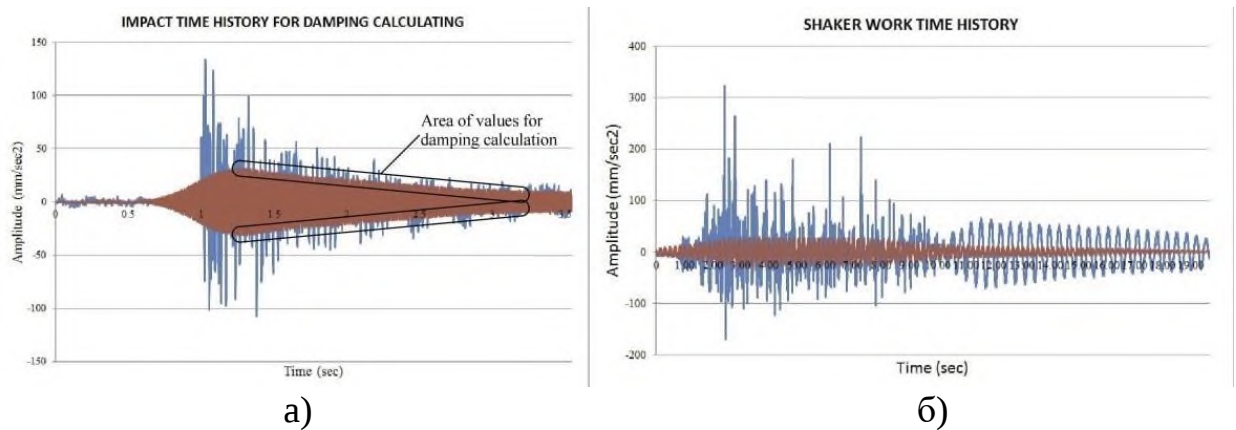


Рис. 11. Схема расчёта логарифмического декремента колебаний (а), запись работы вибростенда (б).

Для получения значений смещения производится интегрирование численного ряда акселерограммы. Затем вычисляется СКЗ полученных смещений при нагрузке от вибростенда. При этом нагрузка от вибростенда является динамической, поэтому для удобства построения модели нагрузка пересчитывается в соответствующую статическую через коэффициент динамичности. После определения динамических параметров рассчитывается кривизна ρ формы изгиба упругой линии выбранных элементов конструктивной системы рамы.

Далее производится работа с моделью конструктивной системы рамы. Построение модели конструктивной системы испытуемой рамы выполнено в расчётном комплексе с заданием поперечных сечений и теоретических значений жёсткости (рис. 9). 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. Далее для сопоставления реальной работы системы опытного сооружения с теоретической в модели задавалась нагрузка от вибростенда, аналогичная динамическим испытаниям с учетом вычисленного коэффициента динамичности. Результаты расчётов отражены в таблицах 3 и 4.

Частота вынужденных колебаний $p_{6blH} = 6,67$ 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, $P_{ст} = 336,98$ Н.

Таблица 3. Сравнение теоретических и экспериментальных резонансных частот

Номер частоты	Теоретическая (модельная), Гц (рад/с)	Экспериментальная, Гц (рад/с)
1	8,81 (55,33)	5,61 (35,23)
2	28,07 (176,28)	26,65 (167,36)
3	63,31 (397,59)	61,31 (385,03)

Таблица 4. Результаты расчёта изгибной жесткости элементов рамы по динамическим испытаниям

Area number	Модельный радиус кривизны, м	Эксп. радиус кривизны, м	Модельная изгибная жесткость, Н·м ²	Отношение кривизны	Эксп. изгибная жесткость, Н·м ²
<i>Передняя правая стойка</i>					
Поперёк	4 000 000	3 983 666	3 131 200	1.004	3 144 038
Вдоль	25 000 000	21 958 088	232 780	1.139	265 028
<i>Задняя правая стойка</i>					
Поперёк	1 459 854	1 237 842	3 131 200	1.179	3 692 794
Вдоль	7 692 308	9 851 953	232 780	0.781	181 752
<i>Передняя левая стойка</i>					
Поперёк	1 449 275	2 062 767	3 131 200	0.703	2 199 943
Вдоль	7 836 991	10 894 957	232 780	0.719	167 444
<i>Задняя левая стойка</i>					
Поперёк	1 449 275	1 478 883	3 131 200	0.980	3 068 513
Вдоль	7 692 308	6 870 798	232 780	1.120	260 612
<i>Передний ригель</i>					
Поперёк	769 231	1 106 431	109 098 000	0.695	75 848 864
<i>Задний ригель</i>					
Поперёк	769 231	993 181	109 098 000	0.775	84 497 761

Результаты обработки данных эксперимента показывают расхождение значений изгибной жесткости модели рамы и фактической опытной. Разница укладывается в диапазоне 0,004-30,5%. Наблюдается тяготение значений вниз от теоретических, что может говорить о ненормативном модуле упругости стали, а также неэталонном исполнении узлов сопряжения конструкций

рамы. В эксперименте, условия закрепления рамы и материал принимались как эталонные, модельные. По нашему мнению, при дальнейшей работе над способом следует экспериментально определять фактическую жесткость узлов сопряжения конструкций сооружения. В подобных условиях после статистической обработки всех данных относительная погрешность значений жесткости составила около 21%. Это ниже значений, полученных при статических испытаниях, что может быть вызвано погрешностью работы акселерометров и невысоким отношением вынуждающей силы вибростенда к минимальному регистрируемому сигналу. Также стоит отметить, что расстояние между вибрационными датчиками составляло 400 мм. При таком расположении разница показаний ускорения и, соответственно, перемещения после интегрирования численного ряда, составила 30-50 мм/с², что, с учетом погрешности в 5%, близко к порогу чувствительности применяемого емкостного акселерометра. Таким образом, при динамических испытаниях выгодно увеличивать расстояние между датчиками, что увеличивает разницу значений при колебаниях, но уменьшается область контроля. Также, данная разница значений может обеспечиваться более мощным вибростендом, что ведет к более интенсивным колебаниям и большему изгибу элементов. Однако, в таком случае требуется учитывать возможность повреждения обследуемого сооружения.

Заключение

Проведение испытаний зданий и сооружений необходимо и актуально с точки зрения их надёжности и материальной эффективности. Наблюдается общемировая тенденция к снижению запаса по прочности и жёсткости, что существенно понижает стоимость строительства. Определение динамических критериев оценки технического состояния сооружений является актуальной и сложной задачей. Для повышения точности динамической оценки состояния конструктивной системы предлагается в качестве динамического критерия рассмотреть кривизну формы изгиба. Данный параметр можно использовать в методе сопоставления, вычисляя его для эталонной системы по априорным проектным данным и для фактической системы по измеренным данным. Для анализа фактической системы эффективно использовать динамические испытания, так как на стадии эксплуатации строительного объекта трудоемко, а часто, не возможно, провести статические. Относительная погрешность определения жесткости по кривизне формы изгиба составила 12% при

статических испытаниях, и 21% — при динамических. Развитие способа может быть связано с разработкой методики оценки фактической жесткости узлов сопряжения конструкций обследуемого сооружения, а также методики анализа различных конструктивных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Agdas D., Rice J., Martinez J., Lasa I. Comparison of Visual Inspection and Structural-Health Monitoring As Bridge Condition Assessment Methods. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol 30, No 3.
2. Hellier Ch. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill. p. 1.1., 2003. ISBN 0-07-028121-1.
3. McCARTNEY L. Can safety factors be reduced safely when designing against fatigue. *Fatigue of Engineering Materials and Structures* Vol. 2, pp. 387-400.
4. Morgantini M., Betti R. The inner product vector as an output-only cross-correlation-based feature to structural damage assessment. *Journal of Vibroengineering*. 2020, Vol. 22 (6).
5. Nesterenko A., Stolpovsky G., Nesterenko M. Method of calculation flexural stiffness over natural oscillations frequencies. *Archives of Civil Engineering*, Volume 64, Issue 4, Pages 89–103, ISSN (Online) 1230-2945, DOI: <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0046>.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Volkovas V., Petkevičius K., Eidukevičiūtė M., Akinci T.C. Diagnostics of construction defects in a building by using time-frequency analysis. *MECHANIKA*, 2012 Vol. 18(4). Pp. 432-437.
10. Котляревский В.А. Диагностика скрытых дефектов сейсмостойких сооружений по изменению частотного спектра. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2014. № 4. С. 36-42.
11. Rainer J. Dynamic testing of civil engineering structures. *Proceedings of the Third Canadian Conference on Earthquake Engineering held in Montreal*. Vol. 1. 1979.
12. Williams, M., Blakeborough, A. Laboratory testing of structures under dynamic loads: An introductory review. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 359. 1651-1669. 10.1098/rsta.2001.0860.
13. Nesterenko A., Nesterenko M., Stolpovsky G. Подход к решению обратной задачи изгиба на примере деревянной стойки. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. 2019. №1. С.1-14.
14. Nesterenko A., Zhadanov V., Stolpovsky G., Nesterenko M. Stiffness evaluation of a metal frame by the method of dynamic tests. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research"*. doi.org/10.2991/isees-19.2019.45
15. 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.

Поступила 2021 г.

(Контактная информация: **Нестеренко Алексей Михайлович** – научный сотрудник Отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН; адрес: 460014, Оренбург, ул. Набережная, 29; E-mail: Alexnes@mail.ru);

Нестеренко Максим Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий Отделом геоэкологии ОФИЦ УрО РАН; адрес: 460014, Оренбург, ул. Набережная, 29; E-mail: n_mu@mail.ru.

LITERATURE

1. Agdas D., Rice J., Martinez J., Lasa I. Comparison of Visual Inspection and Structural-Health Monitoring As Bridge Condition Assessment Methods. Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol 30, No 3.
2. Hellier Ch. Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill. p. 1.1., 2003. ISBN 0-07-028121-1.
3. McCARTNEY L. Can safety factors be reduced safely when designing against fatigue. Fatigue of Engineering Materials and Structures Vol. 2, pp. 387-400.
4. Morgantini M., Betti R. The inner product vector as an output-only cross-correlation-based feature to structural damage assessment. Journal of Vibroengineering. September 2020, Volume 22, Issue 6.
5. Nesterenko A., Stolpovsky G., Nesterenko M. Method of calculation flexural stiffness over natural oscillations frequencies. Archives of Civil Engineering, Volume 64, Issue 4, Pages 89–103, ISSN (Online) 1230-2945, DOI: <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0046>.
6. 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.
7. Yudakhin F., Kapustyan N. Antonovskaya G. Engineering and seismic studies of the geological environment and building structures using wind vibrations of buildings. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. ISBN 5-7691-1835-0.
8. Korobko V., Kalashnikov M., Kalashnikova O. Control of the stiffness of reinforced concrete bridges using a dynamic criterion - coefficient of nonlinear distortions. Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2015. No. 6 (314). Pp. 130-135.
9. Volkovas, V. Diagnostics of construction defects in a building by using time-frequency analysis / V. Volkovas, K. Petkevičius, M. Eidukevičiūtė, T.C. Akinci. MECHANIKA, 2012 Vol. 18(4). Pp. 432-437.
10. Kotlyarevsky V. Diagnostics of hidden defects of seismic resistant structures by changing the frequency spectrum / V.A. Kotlyarevsky // Earthquake-resistant construction. Safety of structures. 2014. No. 4. Pp. 36-42.
11. Rainer J. Dynamic testing of civil engineering structures. Proceedings of the Third Canadian Conference on Earthquake Engineering held in Montreal. Vol. 1. 1979.
12. Williams, M., Blakeborough, A. Laboratory testing of structures under dynamic loads: An introductory review. Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 359. 1651-1669. 10.1098/rsta.2001.0860.
13. Nesterenko A., Nesterenko M., Stolpovsky G. Approach to the solution of the inverse problem of bending on the example of a wooden rack. Electronic journal "Bulletin of the Orenburg Scientific Center", No. 1/2019. Pp 1-15.
14. Nesterenko A., Zhadanov V., Stolpovsky G., Nesterenko M. Stiffness evaluation of a metal frame by the method of dynamic tests. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research". doi.org/10.2991/isees-19.2019.45

15. Zhadanov V., Nesterenko A., Nesterenko M., Stolpovsky G. Study of the absorbing properties of the material of building structures on the example of a reinforced concrete bulkhead. News of higher educational institutions. Construction, Novosibirsk, No. 9 (693), 2016, pp.76-86.

Образец ссылки на статью:

Нестеренко А.М., Нестеренко М.Ю. Кривизна формы изгиба как динамический критерий контроля состояния сооружений. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2021. №3. 22с. [Электр. ресурс] (URL: [http:// elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2021-3/Articles/AMN-2021-3.pdf](http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2021-3/Articles/AMN-2021-3.pdf)). **DOI: 10.24411/2304-9081-2021-13002**