

**Дорофеев Виталий Степанович**, д-р техн. наук, профессор,  
ректор, Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, г. Одесса (Украина)

**Шеховцов Игорь Владиславович**, канд. техн. наук, доцент,  
Одесская государственная академия строительства и  
архитектуры, г. Одесса (Украина)

**Петраш Светлана Викторовна**, канд. техн. наук, доцент, Одесская  
государственная академия строительства и архитектуры,  
г. Одесса (Украина)

**Малахов Виктор Валериевич**, ассистент, Одесская  
государственная академия строительства и архитектуры  
г. Одесса (Украина)

## **ВИБРОДИАГНОСТИКА СТЫКОВ СБОРНО- МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

### **VIBRATION MONITORING OF JOINTS OF PRECAST AND CAST-IN-SITU REINFORCED CONCRETE**

#### **АННОТАЦИЯ**

*В статье рассматривается методика вибродиагностики строительных конструкций на примере стыков сборно-монолитного железобетона. Приведены результаты исследований и анализ изменения количественных динамических характеристик. Также рассмотрена зависимость виброперемещений от частоты колебаний при нарушении целостности конструкции.*

#### **ABSTRACT**

*The methods of vibration monitoring of structures on the example of joints of precast and cast-in-situ reinforced concrete are considered in article. The results of research and analysis of quantitative changes of dynamic characteristics are given. Also considered is the dependence of the oscillation frequency vibratory in violation of the integrity of the structure.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Требования к качеству строительных конструкций в условиях роста объема строительного-монтажных работ и непрерывного процесса функционального устаревания введенных в эксплуатацию зданий и сооружений неуклонно растут. При реконструкции существующего жилого фонда возникает проблема усиления существующих конструк-

ций и приведения их в соответствие с новыми технологическими и моральными требованиями. Помимо этого, в настоящее время существует определенный процент зданий, подверженных воздействию внешних факторов, оказывающих негативное воздействие на прочность их конструкции. К таким факторам можно отнести воздействие землетрясений, пожара, подвижки грунтов и работу строительной техники в непосредственной близости от здания. Для конструкций остро возникает вопрос о своевременном и постоянном контроле качества и целостности, что позволит диагностировать техническое состояние строительных конструкций, предотвратить возникновение аварийных ситуаций и, следовательно, увеличит срок их эксплуатации [1].

Наиболее эффективными и перспективными неразрушающими методами являются вибрационные. Вибродиагностика – обнаружение внутренних дефектов и изменений в конструкциях на основании определения их собственных и резонансных частот с применением спектрального анализа. По полученным спектрам зарегистрированных сигналов от вибрационных датчиков определяются собственные частоты и формы колебаний конструкций и здания, а также логарифмические декременты колебаний, что позволяет оценить качество конструкций [2,3].

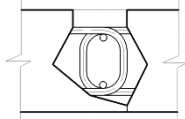

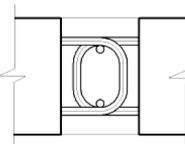
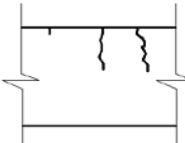
В большинстве случаев основными информативными динамическими параметрами технического состояния конструкций являются частоты и декременты собственных колебаний по основному тону, которые наиболее чувствительны к имеющимся в строительных конструкциях дефектам и повреждениям.

## **1. Динамические испытания методом мгновенного сброса нагрузки**

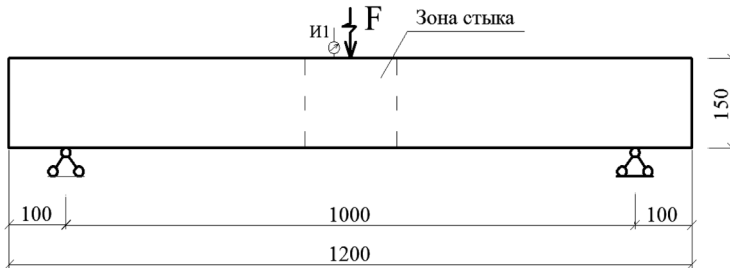
С целью исследования указанных информативных параметров в лабораторных условиях была поставлена серия экспериментов по определению динамических характеристик железобетонных балок с петлевыми шпоночными стыками сборно-монолитной конструктивной системы (по типу «Каркас Унифицированный Безригельный – 2,5» [4]). Габаритные размеры экспериментальных балок – 1200x100x150 мм, общее количество – 16 шт. Основные виды и маркировка экспериментальных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Основные виды и маркировка экспериментальных образцов

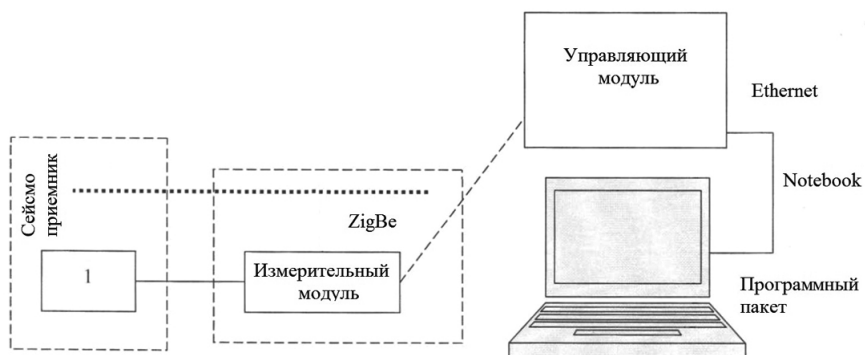
Позиция	Маркировка серии экспериментальных образцов	Схема петлевого стыка серии	Примечание
1	A		Петлевой стык по технологии КУБ (Каркас Унифицированный Безригельный) - 2,5
2	B		Шпоночный петлевой стык
3	C		Бешпоночный петлевой стык
4	D		Образцы без стыка

Предварительно перед испытаниями динамической знакопеременной нагрузкой (рисунок 1) все образцы были подвержены статическому нагружению, вследствие чего в них образовались дефекты в виде трещин в растянутой зоне образцов.

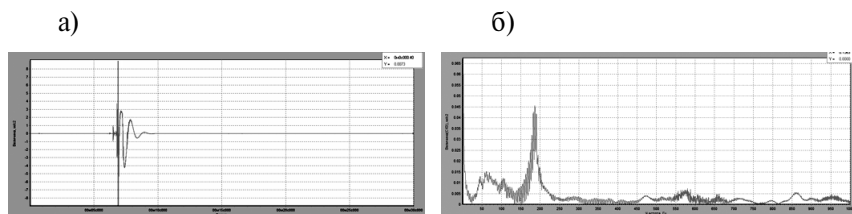


**Рисунок 1.** Схема динамического испытания образцов балок (F-амплитуда динамической силы вибромашины; И1-акселерометр)

Для определения частот и декрементов собственных колебаний балок использовался метод мгновенного снятия нагрузки с последующей обработкой затухающих колебаний. В качестве вибродатчика использовался низкочастотный сейсмический акселерометр марки 731А фирмы Wilcoxon Research (США). Регистрация вибросигналов выполнялась с локального рабочего места с помощью портативной восьмиканальной измерительной системы «Сейсмомониторинг» (рисунок 2). Для определения частот колебаний экспериментальных железобетонных балок с петлевыми стыками производился спектральный узкополосный анализ в диапазоне частот 1-1000 Гц. По результатам динамических испытаний регистрировались временные сигналы вертикальных виброускорений и рассчитывались спектры для железобетонных балок при мгновенном бросе нагрузки (рисунок 3).



**Рисунок 2.** Система сейсмомониторинга



**Рисунок 3.** Зарегистрированный вибросигнал ускорений (а) и его спектр (б) при возбуждении колебаний балки с петлевым стыком методом мгновенного сброса нагрузки

Перед началом эксперимента была определена теоретическая частота собственных колебаний железобетонных балок с заданной жесткостью при условии отсутствия в них повреждений. Ее величина составила  $f_{theor} = 204,9 \text{ Гц}$ .

Все результаты сопоставлялись со значениями частот первой формы собственных колебаний, полученных экспериментальным путем для каждой балки в отдельности до испытания ее статическим нагружением. Данные значения были приняты за 100%.

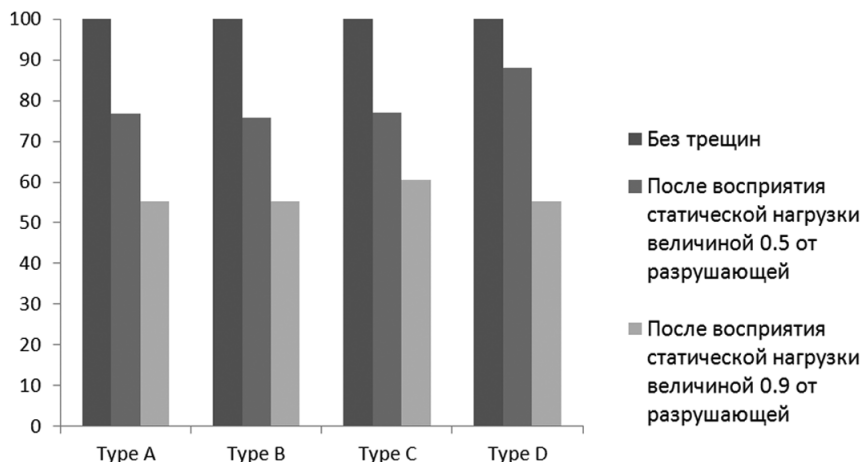
После статического нагружения-разгрузки при величине нагрузки, составляющей 0,5 от разрушающей, испытания балок серии А показали снижение частоты собственных колебаний до значений 69–85% от первоначальных. После статического нагружения-разгрузки при величине нагрузки, составляющей 0,9 от разрушающей, собственная частота снизилась до значений в 55–58% от первоначальных показаний. Абсолютные значения частот собственных колебаний до испытаний статическим нагружением для таких балок варьировались в диапазоне от 202 Гц до 211 Гц.

При динамических испытаниях методом мгновенного сброса нагрузки собственная частота колебаний балок серии В после статического нагружения-разгрузки при величине нагрузки, составляющей 0,5 от разрушающей, находилась в пределах от 64% до 72% от первоначальных значений. При испытаниях после статического нагружения-разгрузки при величине нагрузки, составляющей 0,9 от разрушающей, значения собственной частоты колебаний снизились до 45-51% от аналогичных значений, полученных до нагружения-разгрузки экспериментальных образцов статической нагрузкой.

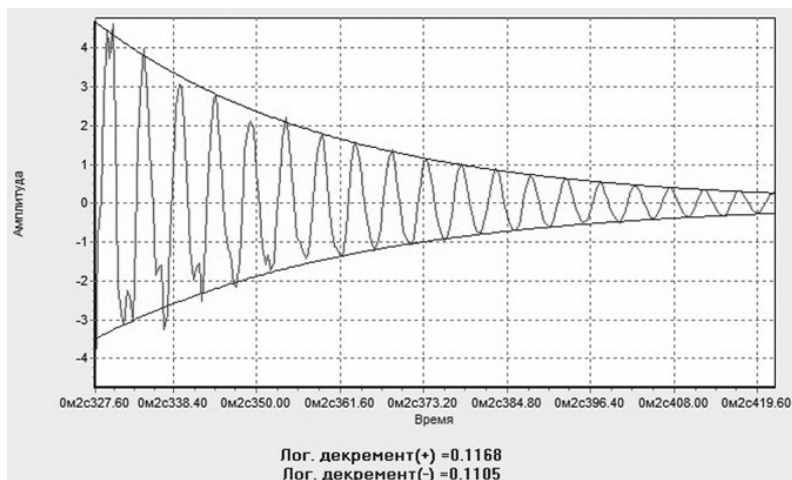
Собственные частоты для первой формы колебаний балок серии С после статического нагружения в размере 0,5 от разрушающей нагрузки снизились до 71–86% от первоначальных значений. После статического нагружения при нагрузке, составляющей 0,9 от разрушающей, эти значения уже составляли 64–73%. Испытания балок, выполненных без петлевого стыка, показали снижение собственной частоты колебаний при первой форме до 81–94% для второго этапа (после нагружения образцов до нагрузки в размере 0,5 от разрушающей и последующей разгрузки). Значения собственных частот вертикальных колебаний на третьем этапе для таких балок в процентном отношении составило 54-56% от первоначальных значений. Общая картина снижения частот собственных колебаний для балок по сериям отображена на рисунке 4.

Анализ изменения количественных динамических характеристик экспериментальных образцов заключался также в определении фактических декрементов колебаний (рисунок 5). По результатам измерений построены диаграммы по абсолютным и относительным (относительно значений логарифмических декрементов затухания для балок до их статического нагружения) значениям декрементов колебаний.

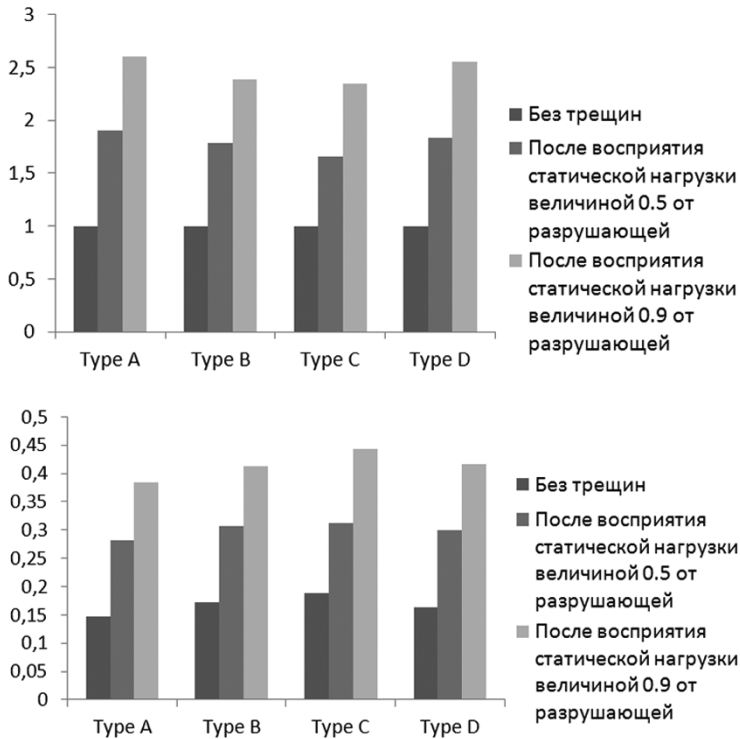
Усредненное значение логарифмического декремента затухания составило 0,1475 для балок серии А и оказалось наименьшим. Следует отметить, что и по результатам последующих этапов испытаний значение логарифмического декремента для балок серии А оставалось минимальным по сравнению с аналогичными значениями декрементов для балок остальных серий.



**Рисунок 4.** Динамика снижения собственных частот колебаний балок исследованных серий по результатам динамических испытаний



**Рисунок 5.** Логарифмический декремент колебаний, определенный при помощи системы сейсмомониторинга



**Рисунок 6.** Изменение декремента колебаний в экспериментальных балках в ходе испытаний: а – относительное увеличение значений декрементов; б – абсолютные значения декрементов

Максимальное значение логарифмического декремента было получено при испытаниях балок серии С. От значения 0,1885 на первом этапе логарифмический декремент затухания для таких балок увеличился после восприятия ими статического нагружения в размере 0,9 от разрушающей нагрузки до 0,4430, что больше значений декрементов затухания 0,4120 и 0,3840 для балок серий А и В соответственно. Декремент колебаний для балок серии D после восприятия ими статического нагружения в размере 0,9 от разрушающей нагрузки составил 0,4165. Однако, приняв во внимание относительные величины декрементов затухания колебаний, можно отметить увеличение декрементов для балок серии А в 1,91 раза после восприятия балками статической нагрузки в размере 0,5 от разрушающей и в 2,6 раза после восприятия экспериментальными образцами нагрузки в размере 0,9 от разруша-

юшей. Для балок серии В декремент увеличился в 1,79 и в 2,39 раза, для балок серии С – в 1,65 и в 2,35 раза, соответственно. Для балок без стыков декременты затухания колебаний увеличились в 1,83 раза после восприятия балками статической нагрузки в размере 0,5 от разрушающей и в 2,86 раза – после восприятия экспериментальными образцами нагрузки в размере 0,9 от разрушающей.

Как видно из рисунка 6, наименьшее приращение декремента колебаний в абсолютных значениях и одновременно наибольшую динамику его увеличения по отношению к первоначальным значениям показали испытания железобетонных балок серии А. Значения декрементов колебаний в балках со шпоночными стыками (серия В) и в балках без стыков (серия Д) были сопоставимы друг с другом. В то же время абсолютные значения декрементов колебаний в результате экспериментальных исследований в балках с бесшпоночными петлевыми стыками (серия С) были максимальными.

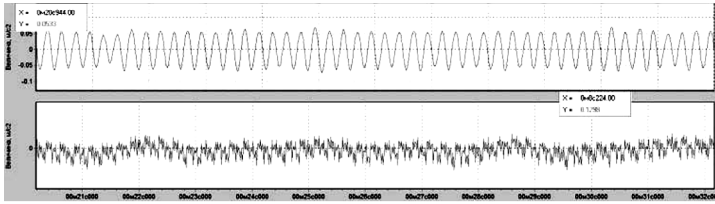
## **2. Динамические испытания многократно повторяющейся нагрузкой**

Данные испытания балок были проведены в два этапа. На первом этапе все опытные образцы были испытаны вибрационной нагрузкой до начала статического нагружения. На втором этапе динамические испытания образцов проводились после достижения статической нагрузкой значений, составляющих 0,5 и 0,9 от разрушающей нагрузки. Частота динамических воздействий вибромашины возрастала ступенчато от 2 Гц до 16 Гц (шаг – 2 Гц). По результатам динамических испытаний балок определены амплитуды виброускорений, виброскоростей и виброперемещений. При обработке вибросигналов с помощью системы «Сейсмомониторинг» выполнялась цифровая фильтрация (рисунок 7).

Для всех испытанных балок было зарегистрировано увеличение значений амплитуд при низких частотах (от 1 Гц до 6 Гц). Причиной этого факта может служить собственная частота колебаний всей испытательной установки, состоящей не только из экспериментальных балок с вибромашиной, но и металлической станины, установленной на резиновые виброгасители и служившей опорой для исследуемых образцов. В этом случае следует говорить не о поведении экспериментального образца с петлевым стыком в целом, а о поведении петлевых стыков различных конфигураций при восприятии вибронгрузки. По этой причине при анализе экспериментальных данных значения

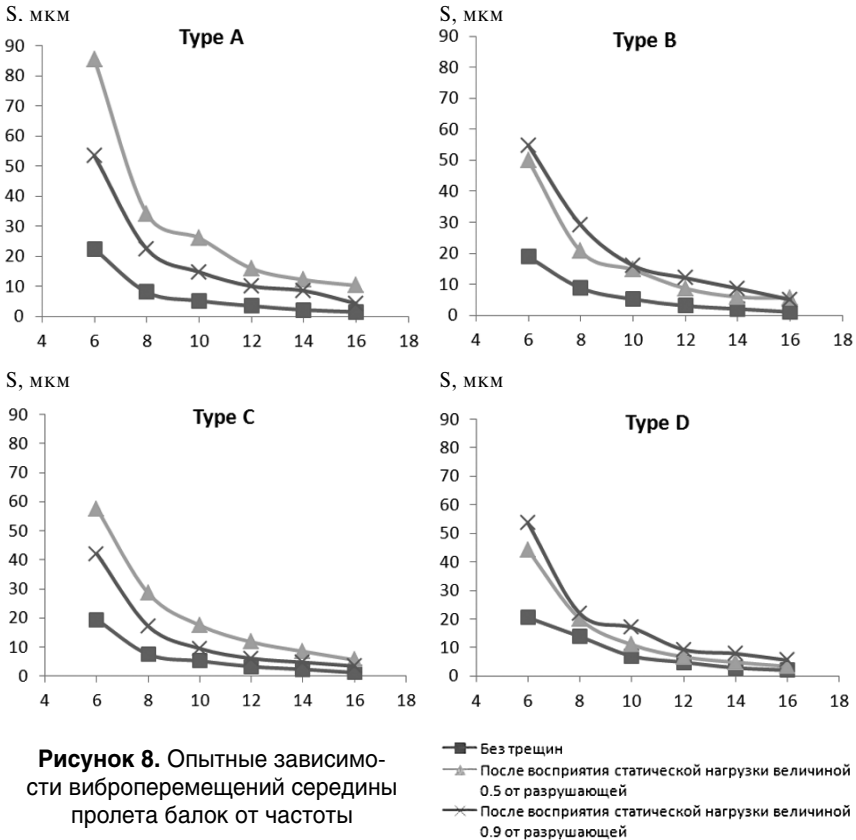


виброперемещений, виброскоростей и виброускорений при низких частотах во внимание не принимались.



**Рисунок 7.** Вибросигнал ускорений балки после фильтрации (вверху) и исходный зарегистрированный сигнал (внизу)

На рисунке 8 представлены обобщенные графики зависимости виброперемещений от частоты для каждой серии экспериментальных образцов.



На рисунках приведено по три опытные кривые: зависимость виброперемещений от частоты для балок до испытаний статическим нагружением и зависимости виброперемещений для тех же экспериментальных балок после статического нагружения балок нагрузкой в 0,5 и 0,9 от разрушающей.

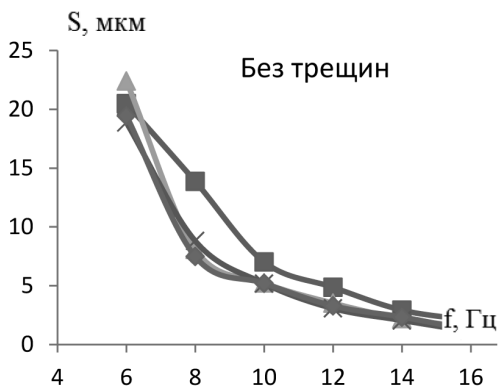
Установлено, что при испытаниях железобетонных экспериментальных балок, выполненных с петлевыми стыками, виброперемещения после статической нагрузки-разгрузки в размере 0,5 от разрушающей были выше аналогичных значений, полученных на балках до испытания статическим нагружением. Существенные различия в восприятии вибрационной нагрузки петлевыми стыками проявились при испытаниях железобетонных экспериментальных образцов, прошедших этап статического нагружения-разгрузки при силе, составляющей 0,9 от разрушающей нагрузки.

На этом этапе перемещения в балках со шпоночными стыками стали еще выше аналогичных значений, полученных на предыдущих этапах. Такая же картина наблюдалась и при испытаниях экспериментальных балок серии D, выполненных без стыка. В то же время, виброперемещения при испытании балок с петлевым стыком, выполненным по технологии «Каркас Унифицированный Безригельный – 2,5» и балок с бесшпоночным стыком оказались заметно меньше тех же значений, полученных при испытаниях этих же образцов после статического нагружения-разгрузки величиной в 0,5 от разрушающей нагрузки.

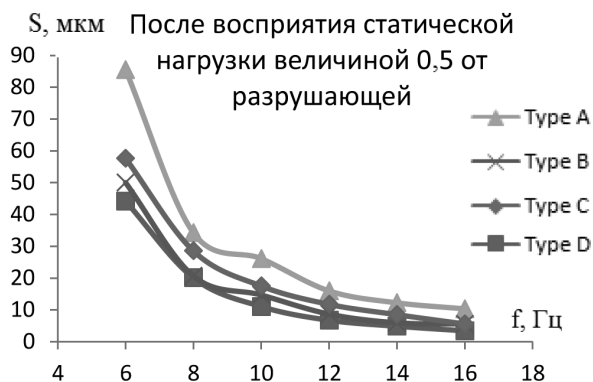
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставив графики зависимостей виброперемещений от частоты для балок с петлевыми стыками серий А, В, С и балок без стыков серии D для каждого этапа экспериментальных исследований (до нагружения статической нагрузкой и после нагружения-разгрузки величиной в 0,5 (рисунок 9) и 0,9 (рисунок 10) от разрушающей) многократно повторяющейся вибрационной нагрузкой, установлено:

а)



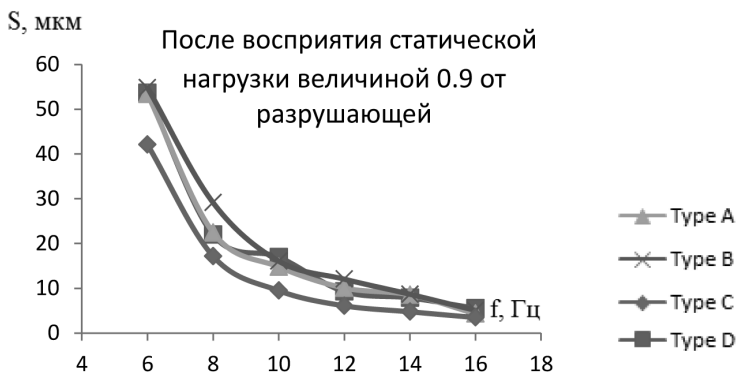
б)



**Рисунок 9.** Результаты динамических испытаний – графики зависимости виброперемещений от частоты (пошаговое наложение для всех серий:

а – без трещин;

б – после восприятия статической нагрузки величиной 0,5 от разрушающей)



**Рисунок 10.** Результаты динамических испытаний – графики зависимости виброперемещений от частоты (пошаговое наложение для всех серий – после восприятия статической нагрузки величиной 0,9 от разрушающей)

1. При испытании динамической нагрузкой экспериментальных образцов без трещин разброс значений виброперемещений всех балок с петлевыми стыками в центральной зоне балок был небольшим. Одновременно с этим виброперемещения балок серии D в середине пролета заметно отличались в большую сторону – на 30-40% от аналогичных значений для остальных балок.
2. Дальнейшие испытания балок с петлевыми стыками динамической нагрузкой после статического нагружения-разгрузки величиной в 0,5 от разрушающей показали большой разброс абсолютных значений виброперемещений (рисунки 9а, 9б, 10). При сравнении графиков зависимостей видно, что балки серии D имеют наименьшие амплитуды виброперемещений в середине пролета. Балки серии В со шпоночными петлевыми стыками на данном этапе эксперимента показали самые близкие к эталонным балкам серии D значения виброперемещений. Разница этих показателей составила 22-32%. Виброперемещения балок серии С были уже на 58-75% выше значений виброперемещений балок без стыков. Несколько неожиданным можно считать результат испытаний для балок серии А. Виброперемещения таких балок оказались в 2,4-2,55, а при 16 Гц – в 3 раза больше виброперемещений балок без стыков.
3. При испытаниях после статического нагружения в 0,9 от разрушающей нагрузки можно увидеть следующие изменения по сериям в результатах испытаний. При сопоставлении графиков

зависимостей на рисунках 9 и 10 видно, что виброперемещения середины пролета балок серии С с бесшпоночными стыками на 35-44% меньше значений виброперемещений балок серии D, выполненных без стыков. В свою очередь, виброперемещения балок со шпоночными стыками (серия В) и со стыками, выполненными по технологии «Каркас Унифицированный Безригельный» (серия А) сопоставимы со значениями перемещений балок без стыков и отличаются от последних на 6-10%.

4. Испытания железобетонных балок с различной конфигурацией граней петлевых стыков вибрационной знакопеременной нагрузкой показали наличие преимуществ для каждой из конфигураций стыков в конкретных условиях. После статического нагружения-разгрузки с величиной нагрузки в 0,9 от разрушающей, жесткость петлевых соединений балок с бесшпоночными петлевыми стыками оказалась максимальной. Данная конфигурация стыка на заключительном этапе исследований является оптимальной по показателям жесткостных характеристик. Исследования позволяют сделать вывод о рациональности применения в сборно-монолитном строительстве наряду со стыками в балках серии А (по технологии КУБ-2,5) также и балок серии В со шпоночными петлевыми стыками.
5. Сопоставление результатов вибродиагностики конструкций и результатов определения основных динамических характеристик методом мгновенного снятия нагрузки позволяет сделать вывод о корректности и достоверности полученных результатов. В будущем планируется усовершенствование комплекса оборудования для вибродиагностики, а также программного обеспечения для обработки полученных результатов.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Дорофеев, В. С. Анализ работы петлевых стыков различных конфигураций [текст] / В.С. Дорофеев, В.В. Малахов, С.С. Нестеренко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури – О., 2012; випуск 47. Ч.1 – С. 96–102.
2. Немчинов, Ю.И. Контроль и вибродиагностика строительных конструкций объекта «Укрытие» / Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, Л.В. Емельяненко // Будівельні конструкції – К.: НДІБК, 2001, випуск 54 – С. 76–79.

3. Семченков, А. С. Жесткости омоноличенных сопряжений между элементами сборных дисков перекрытий / А.С. Семченков, М.М. Козелков, А.В. Луговой // Бетон и железобетон М. «Ладья», 2008, выпуск 2(551) – С. 17–20.
4. Унифицированная система сборно-монолитного безригельного каркаса КУБ-2,5 / НПСО «Монолит» – М, 1990.

*Статья поступила в редколлегию 25.11.2014*