



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.11

УДК 539.3:534.08

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «УДАРНИК–ПРОКЛАДКА–ЖЕЛЕЗОБЕТОННАЯ БАЛКА»

К.В. Собянин, И.Н. Шардаков, А.П. Шестаков, И.О. Глот

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 26 октября 2018 г.
Принята: 27 ноября 2018 г.
Опубликована: 28 декабря 2018 г.

Ключевые слова:

деформационный мониторинг, вибрационная диагностика, железобетон, ударное воздействие, упругая волна, численное моделирование, длительность импульса.

АННОТАЦИЯ

Применение автоматизированных систем мониторинга обеспечивает деформационную безопасность конструкций. Такие системы деформационного контроля включают в себя инструменты, позволяющие оценивать критичность состояния конструкции на основе измерения вибрационных процессов. Вибрационная диагностика железобетонных конструкций позволяет выявить наличие дефектов и их локализацию, а также оперативно отслеживать их развитие. Результаты, полученные в данном исследовании, связаны с ударно-волновой диагностикой железобетонных конструкций. Особое внимание уделяется диагностике в «сдающем режиме», которая не вызывает неупругих деформаций в элементах исследуемой конструкции.

Цель данной работы – найти параметры локального импульсного воздействия для возбуждения в конструкции механических колебаний с желаемым спектром частот или создания упругой волны, волновой фронт которой имеет необходимые характеристики. Одним из основных параметров импульсного воздействия, определяющих эти характеристики, является его длительность. По результатам численного эксперимента, выполненного на основе математической модели динамического упругого взаимодействия элементов системы «ударник–прокладка–железобетонная балка», получена зависимость длительности импульса от ряда факторов, которые можно варьировать в эксперименте (скорость, масса и размеры ударника, толщина и упругость прокладки). Показано, что длительность импульса наиболее чувствительна к изменению скорости ударника и коэффициента упругости прокладки. В пределах выбранного диапазона изменения управляющих параметров возможно изменение длительности силового импульса в пределах от 0,25 до 2,8 мс. Поскольку длительность импульса определяет доминирующую частоту колебаний балки, можно сделать вывод, что при таком изменении длительности импульса частоты будут варьироваться в диапазоне от 200 до 1500 Гц.

© ПНИПУ

© Собянин Кирилл Валентинович – инж., e-mail: sobyenin.k@icmm.ru, [ID: 0000-0003-2224-4260](https://orcid.org/0000-0003-2224-4260).

Шардаков Игорь Николаевич – д.ф.-м.н., проф., зав. лаб., e-mail: shardakov@icmm.ru, [ID: 0000-0001-8673-642X](https://orcid.org/0000-0001-8673-642X).

Шестаков Алексей Петрович – м.н.с., e-mail: shap@icmm.ru, [ID: 0000-0003-3387-7442](https://orcid.org/0000-0003-3387-7442).

Глот Ирина Олеговна – к.ф.-м.н., доц., с.н.с., e-mail: glot@icmm.ru, [ID: 0000-0002-2842-7511](https://orcid.org/0000-0002-2842-7511).

Kirill V. Sobyanin – Engineer, e-mail: sobyenin.k@icmm.ru, [ID: 0000-0003-2224-4260](https://orcid.org/0000-0003-2224-4260).

Igor N. Shardakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory, e-mail: shardakov@icmm.ru, [ID: 0000-0001-8673-642X](https://orcid.org/0000-0001-8673-642X).

Aleksey P. Shestakov – Junior Researcher, e-mail: shap@icmm.ru, [ID: 0000-0003-3387-7442](https://orcid.org/0000-0003-3387-7442).

Irina O. Glot – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: glot@icmm.ru, [ID: 0000-0002-2842-7511](https://orcid.org/0000-0002-2842-7511).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

DYNAMIC DEFORMATION INTERACTION OF ELEMENTS OF THE “DRUMMER–GASKET–REINFORCED CONCRETE BEAM” SYSTEM

K.V. Sobyanin, I.N. Shardakov, A.P. Shestakov, I.O. Glot

Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 26 October 2018
Accepted: 27 November 2018
Published: 28 December 2018

Keywords:

deformation monitoring, vibration diagnostics, reinforced concrete, shock impulse action, elastic wave, numerical simulation, impulse duration

ABSTRACT

The use of automated monitoring systems ensures the deformation safety of structures. Deformation control systems are supplemented with the tools which allow evaluating the criticality of the structure state on the basis of vibration measurements. Vibration-based damage detection of the reinforced concrete structures allows detecting the presence of defects in the structure, determining their localization, as well as promptly tracking their development. The results obtained in this study are directly related to the shock-wave vibrodiagnostics of reinforced concrete structures. Special attention is paid to the diagnostics in a “sparing mode”, which does not cause inelastic deformations in the elements of the structure under study. The vibration process in a concrete beam, caused by a local impulse action, is considered.

The purpose of this study is to find the parameters of the impulse that forms an elastic wave with the desired frequency spectrum or required wavefront characteristics. One of the main parameters determining these characteristics is the impulse duration. A mathematical model of the dynamic elastic interaction of the elements of the “drummer – gasket – reinforced concrete beam” system was constructed and a series of numerical experiments on the bases of this model was carried out. According to the results of these experiments the dependence of the impulse duration on a number of factors is obtained. These factors are the velocity, mass and dimensions of the striker and the thickness and elasticity of the gasket. These parameters are chosen because they can be varied in a real experiment. It is shown that the impulse duration is most sensitive to the changes in striker velocity and gasket elasticity. Within the selected range of control parameters, it is possible to change the impulse duration from 0.25 to 2.8 ms. Since the impulse duration determines the dominant vibration frequency, one may conclude that in this case frequencies will vary in the range from 200Hz to 1500Hz.

© PNRPU

Введение

Железобетон – один из основных конструкционных материалов, используемых для создания современных строительных конструкций. Безопасность эксплуатации конструкций из железобетона во многом определяется их деформационным состоянием. В настоящее время для обеспечения деформационной безопасности конструкций используются автоматизированные системы мониторинга [1–6].

Как правило, в этих системах содержатся экспериментальные средства, поставляющие информацию, из анализа которой производится оценка деформационного состояния конструкции. При этом особенно важным качеством системы мониторинга является ее способность улавливать появление предкритических и критических процессов в элементах инспектируемой конструкции, а также прогнозировать возможность безопасной эксплуатации конструкции [7–9]. Такими средствами, поставляющими исходную мониторинговую информацию, в частности, могут быть разнообразные системы датчиков, регистрирующих такие деформационные параметры, как компоненты тензора деформации в локальных точках конструкции, перемещения и углы поворота элементов конструкции в характерных местах, распределение вертикальных осадков фундаментов и т.д. [10–

16]. Эти измерения, как правило, осуществляются в квазистатическом режиме. На основе математической обработки этих данных и математического моделирования деформационных процессов с использованием этих данных осуществляется анализ критичности деформационного состояния всей конструкции [17].

В настоящее время системы деформационного контроля часто дополняются средствами, позволяющими оценивать состояние конструкции на основе вибрационных измерений. К таким средствам следует отнести системы регистрации акустической эмиссии [18, 19], а также методы ударно-волновой (вибрационной) диагностики [20–23]. Вибрационная диагностика позволяет выявить наличие дефектов в конструкции и их локализацию, а также оперативно отслеживать их развитие [24–26]. Информативность этих средств с точки зрения возможности оценки появления зарождающихся необратимых повреждений в локальных местах конструкции достаточно велика. Их использование расширяется в связи с совершенствованием аппаратной (приборной) базы, позволяющей осуществлять регистрацию параметров вибрационных процессов, возникающих в наблюдаемой конструкции. Очень важной составляющей, обеспечивающей эффективность этих средств, является математический аппарат, обеспечивающий адекватную интерпретацию измеряемых вибрационных параметров [28–29].

Результаты, представленные в данной статье, относятся к ударно-волновой вибродиагностике железобетонных конструкций. Речь идет о вибрационной диагностике в «падающем режиме», который предполагает, что воздействие на конструкцию в процессе диагностики не вызывает неупругого деформирования в элементах инспектируемой конструкции [31–33].

Такой вариант вибродиагностики в системе деформационного мониторинга реализуется следующим образом. В определенных местах железобетонной конструкции осуществляется локальное импульсное силовое воздействие с помощью металлического ударника. Механический отклик конструкции на это воздействие регистрируется совокупностью датчиков (акселерометров, велосиметров и т.п.), расположенных в разных местах конструкции. Отклик, зарегистрированный в начальный момент установки системы мониторинга (а еще лучше – в момент начала жизненного цикла конструкции), далее сопоставляется с данными измерений, полученными в текущий момент наблюдения. В результате такого сопоставления появляется возможность оценить степень накопления необратимых дефектов и соответствующего изменения свойств материала конструкции. Как происходит это сопоставление и по каким критериям оценивается, большой вопрос, не входящий в рамки данной статьи.

Предметом настоящего исследования является установление параметров локального импульсного силового воздействия, которое вызывает в конструкции возбуждение механических колебаний желаемого спектра или возбуждает упругую волну с заранее известными характеристиками фронта. Одним из основных параметров импульсного воздействия, определяющим эти характеристики, является длительность импульса. Анализ зависимости длительности силового импульса от различных факторов и оценке возможности управлять импульсом посвящена данная статья. В ней в рамках теории упругости решается начально-краевая задача о динамическом деформационном взаимодействии элементов системы «ударник–прокладка–железобетонная балка». В численном эксперименте моделируются изменения управляющих параметров, которые могут быть реализованы в эксперименте, и оценивается изменение длительности импульса.

1. Математическая постановка задачи и её численная реализация

Механическое существо решаемой задачи о взаимодействии ударника, прокладки и железобетонной балки представлено на рис. 1. Неподвижная железобетонная балка через упругую прокладку деформационно взаимодействует с летящим металлическим ударником сферической формы, который в момент соприкосновения с прокладкой имеет скорость V_0 , направленную по нормали к поверхности прокладки. В процессе контактного взаимодействия ударника с прокладкой реализуется импульс силы, который инициирует ударно-волновой процесс в бетонной балке. Характерный вид силового импульса в развертке по времени представлен на рис. 1, б. Одним из основных параметров импульса является его время действия τ . Материалы всех тел считаются линейно-упругими.

Для математической постановки этой задачи используется принцип возможных перемещений [34], в котором учитывается вариация работы внутренних напряжений, поверхностных сил и сил инерции:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_{S_\sigma} p_i \delta u_i dS - \int_V \rho \ddot{u}_i \delta U_i dV. \quad (1)$$

Здесь σ_{ij} , ε_{ij} – соответственно компоненты тензора упругих напряжений и деформаций; u_i – компоненты вектора перемещений; \ddot{u}_i – компоненты вектора ускорения; p_i – компоненты вектора поверхностных сил; ρ – плотность; V – объем взаимодействующих тел системы «ударник–прокладка–железобетонная балка»; S_σ – поверхность, на которую действуют компоненты вектора поверхностных сил.

Численное решение вариационного уравнения (1) осуществлялось методом конечных элементов с использованием программного средства ANSYS. Для построения конечно-элементных образов использовались конечные элементы с квадратичной аппроксимацией компонент вектора перемещения, в том числе элементы, позволяющие учитывать контактное взаимодействие.

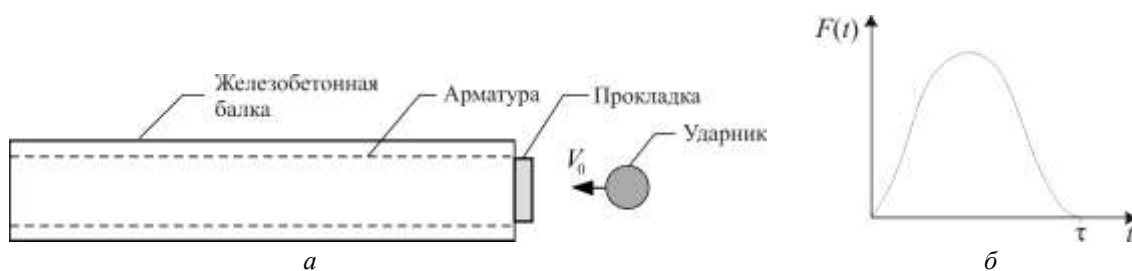


Рис. 1. Расчетная схема задачи (а) и форма силового импульса (б)

Fig. 1. Calculation scheme (a) and force impulse shape (b)

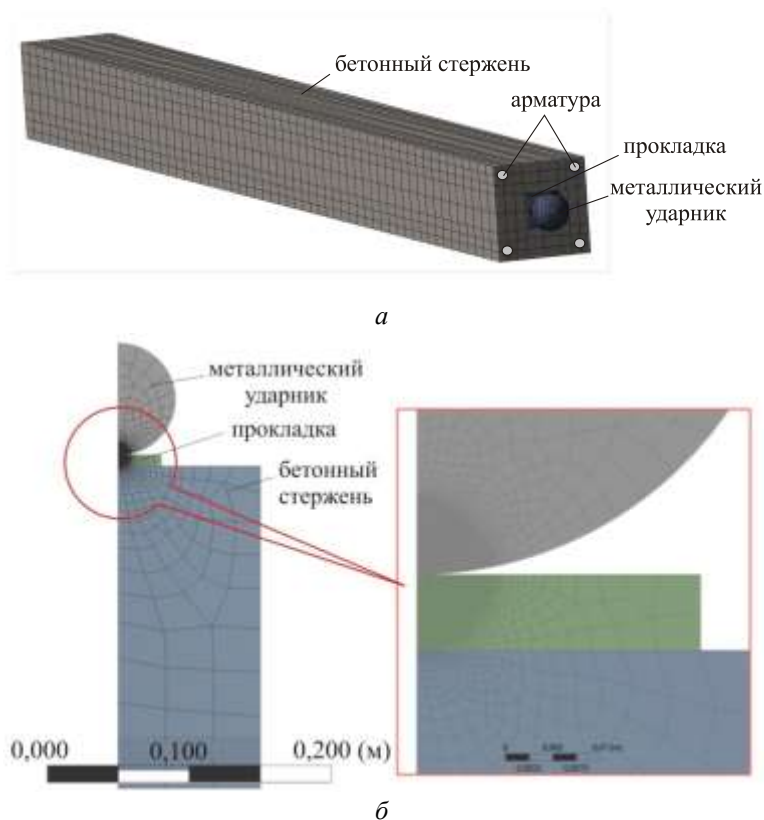


Рис. 2. Конечно-элементный образ системы «ударник – прокладка – железобетонная балка» в трехмерной (а) и осесимметричной (б) постановке

Fig. 2. Finite-element images of the «striker – gasket – reinforced concrete beam» system in three-dimensional (a) and axisymmetric (b) cases

Решение поставленной задачи о динамическом взаимодействии ударника, прокладки и железобетонной балки осуществлялось в трехмерной и осесимметричной постановке (осевая симметрия относительно продольной оси балки). В первом случае балка представляла собой призму размерами 20×20×200 см; во втором – цилиндр диаметром 20 см и длиной 200 см. В трехмерной постановке учитывалось наличие железной арматуры, тогда как в осесимметричной постановке этот фактор не учитывался и балка считалась однородным бетонным стержнем. Конечно-элементные образы элементов системы «ударник – прокладка – железобетонная балка» в трехмерной и осесимметричной постановке представлены соответственно на рис. 2. При численном моделировании структуры конечно-элементных сеток формировались неоднородными с целью наилучшей аппроксимации численного решения в областях, где напряженно-деформированное состояние может иметь большие градиенты. При решении этой задачи учитывался нестационарный динамический характер взаимодействия ударника с прокладкой. Выбранные типы конечных элементов позволили учесть изменение площади контакта поверхности деформируемого шара с поверхностью деформируемой прокладки.

Проведенные численные эксперименты с трехмерным и осесимметричным представлением взаимодей-

ствующих элементов показали, что при использовании этих двух подходов моделируемый деформационный отклик балки на удар отличается незначительно, а учет металлической арматуры не сказывается принципиально на результатах расчетов. Поэтому в дальнейших расчетах балка моделировалась как однородный упругий бетонный цилиндр.

Физико-механические свойства материалов элементов балки и ударника представлены в табл. 1. Следует отметить, что модуль упругости ударника является фиксированной величиной и намного превосходит модуль упругости бетона, поэтому ударник по отношению к бетону ведет себя практически, как абсолютно твердое тело. При контактном взаимодействии его с прокладкой значимым фактором для определения длительности импульса является радиус кривизны контактирующей части ударника. Поэтому ударник можно представлять осесимметричным телом, имеющим в зоне контакта сферическую поверхность заданного радиуса кривизны. Для удобства при численной реализации ударник был представлен в виде шара. В процессе численных экспериментов механические свойства прокладки варьировались: наименьшие значения модуля упругости соответствовали резине, наибольшие – металлу. Таким образом моделировались различные материалы прокладок.

Таблица 1
Физико-механические свойства материалов
Table 1
The physical-mechanical properties of materials

Материал	ρ , кг/м ³	E , ГПа	ν
Бетон	2300	30	0,2
Сталь (металлическая арматура и ударник)	7800	200	0,3
Прокладка	950	0,2–200	0,42

Использование метода конечных элементов для решения вариационного уравнения (1) позволяет получить конечномерную систему ОДУ относительно узловых неизвестных:

$$M \cdot \ddot{U}(t) + K \cdot U(t) = 0, \quad (2)$$

где M , K – матрицы масс и жесткости; $U(t)$ – вектор узловых неизвестных как функция времени t ; $\ddot{U}(t)$ – вектор узловых ускорений. Внешнее воздействие определялось начальными условиями для компонент векторов скорости и перемещения. Для железобетонной балки и прокладки эти условия принимались нулевыми. В начальный момент соприкосновения металлического шара с прокладкой все его точки имеют скорость V_0 , направленную по нормали к поверхности прокладки, при этом компоненты вектора перемещения равны нулю.

Сходимость и достоверность получаемых решений оценивалась по величинам норм выполнения естественных краевых условий, а также по характеру сходимости численных решений в зависимости от степени дискретизации рассматриваемых областей на конечные элементы.

2. Результаты численных решений

На основе разработанного алгоритма решения задачи о динамическом взаимодействии элементов системы «ударник – прокладка – железобетонная балка» был

осуществлен ряд численных экспериментов. Основная цель этих экспериментов – установить зависимость длительности импульса силы τ (см. рис. 1, б) от различных факторов: массы ударника, радиуса ударника, скорости ударника, модуля упругости прокладки и толщины прокладки. Выбор этих пяти параметров обусловлен тем, что с их помощью можно конструктивно управлять величиной длительности импульса.

В численных экспериментах фиксировались величины четырех управляющих параметров и варьировался пятый. Выбранные базовые значения параметров и диапазоны их изменения приведены в табл. 2. Длительность силового импульса, вычисленная при базовых значениях параметров, составила $\delta t = 1,04$ мс. В табл. 2 для каждого из варьируемых параметров даны значения длительности импульса, соответствующие минимальному и максимальному значениям параметра, а также диапазон изменения длительности импульса. Графики, представляющие изменение длительности импульса при последовательном изменении каждого из управляющих параметров, приведены на рис. 3. На каждом из графиков точкой отмечена длительность импульса, полученная при базовых значениях всех пяти параметров. Выбранные пределы изменения управляющих параметров соответствуют реальным условиям проведения эксперимента.

Сопоставление полученных графиков позволяют выявить те параметры, которые позволяют наиболее эффективно воздействовать на длительность силового импульса и добиваться желаемых режимов воздействия на бетонную конструкцию. Как показал численный эксперимент, такими наиболее перспективными управляющими параметрами являются скорость ударника и материал прокладки (ее модуль упругости). Из табл. 2 видно, что в пределах выбранного диапазона изменения управляющих параметров возможно изменение длительности силового импульса от 0,25 до 2,8 мс. Это соответствует изменению частоты свободных колебаний такой системы в диапазоне от 200 до 1500 Гц.

Таблица 2
Значения управляющих параметров

Table 2

Table 2

Values of control parameters

Варьируемый параметр	Базовое значение параметра	Пределы изменения параметра	Пределы изменения длительности импульса τ , мс	Диапазон изменения длительности импульса, Δt , мс
Масса ударника	4 кг	0,05–10 кг	0,25–1,35	1,1
Радиус ударника	40 мм	5–140 мм	2,1–0,7	1,4
Скорость ударника	1 м/с	0,05–10 м/с	2,8–0,6	2,2
Модуль упругости прокладки	10^9 Па	$2 \cdot 10^7$ – $2 \cdot 10^{11}$ Па	2,5–0,5	2,0
Толщина прокладки	2 мм	0–50 мм	0,6–2,1	1,5

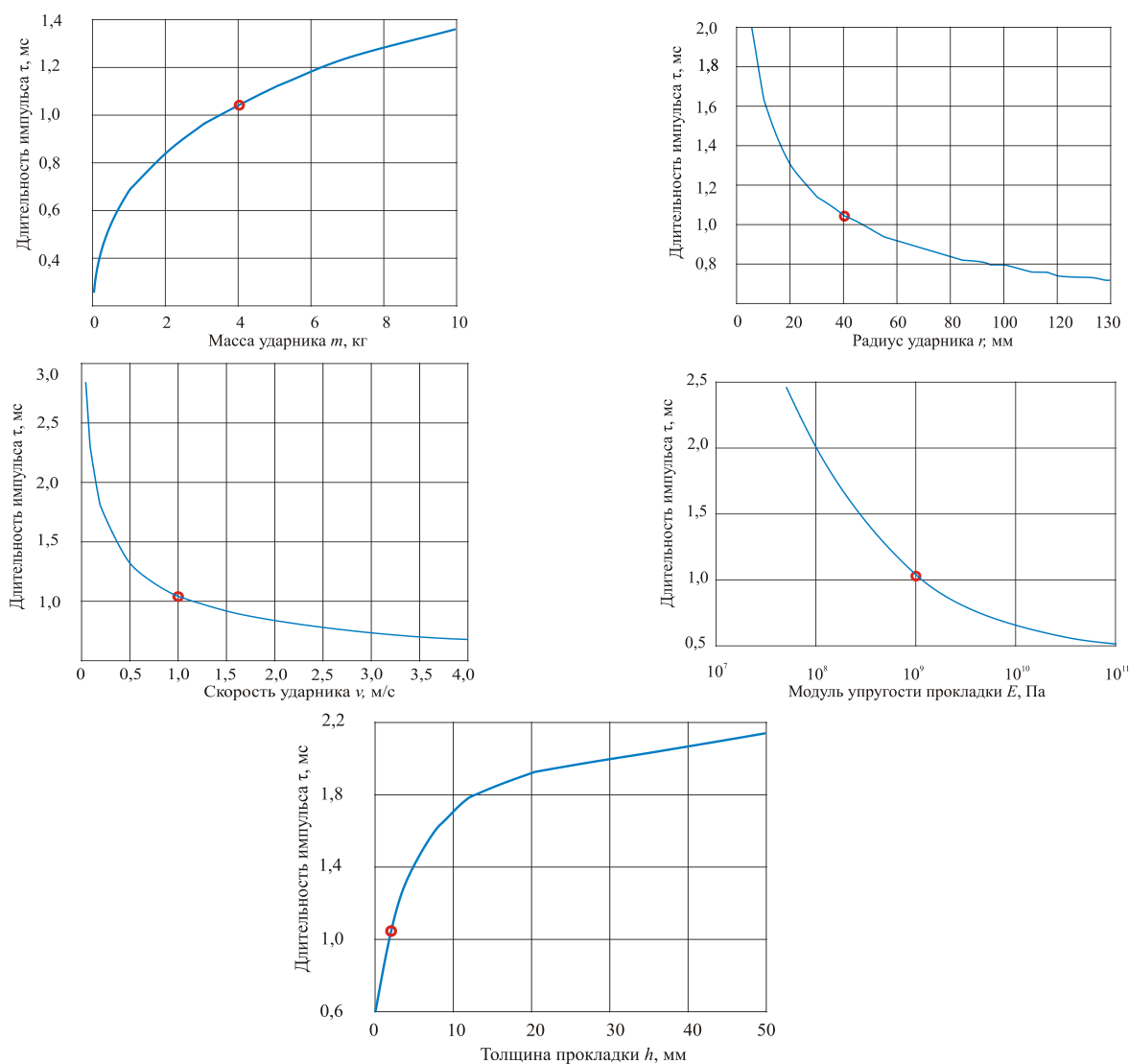


Рис. 3. Изменение длительности силового импульса при варьировании управляющих параметров
 Fig. 3. The change in duration of the force impulse with varying control parameters

Заклучение

Предложена математическая модель, описывающая упругое деформационное динамическое взаимодействие элементов системы «ударник – прокладка – железобетонная балка». На базе этой модели выполнен численный эксперимент, в котором анализируется длительность силового импульса, производимого воздействием сферического ударника на бетонную балку, в зависимости от ряда факторов (масса, радиус и скорость ударника, модуль упругости и толщина прокладки). Показано, что при изменении этих факторов в пределах, которые можно реализовать в физическом эксперименте, наибольший диапазон изменения длительности импульса достигается при изменении скорости ударника. Рассмотренный диапазон изменения параметров, управляющих длительностью силового импульса, обеспечивает его изменение в пределах от 0,25 до 2,8 мс. Полагая, что длительность импульса определяет одну из основных

собственных частот колебаний балки, можно дать оценку для диапазона изменения частот. Он составляет от 200 до 1500 Гц.

Разработанный алгоритм позволяет достаточно быстро определить конструктивно приемлемую комбинацию факторов (масса, радиус и скорость ударника, модуль упругости и толщина прокладки), которые обеспечивают необходимый спектр волновых частот при возбуждении колебаний в железобетонной конструкции при проведении вибрационной диагностики.

Благодарность

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект РНФ №14-29-00172)

Acknowledgment

The work was carried out at the expense of the Russian Science Foundation (the Project of the Russian Science Foundation)

Библиографический список

1. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001 / H. Sohn, C.R. Farrar, F.M. Hemez, D.D. Shunk, D.W. Stinemas, B.R. Nadler, J.J. Czamecki // Los-Alamos National Laboratory. Report LA-13976-MS. – Los Alamos, NM, USA, 2004.
2. Rainieri C., Fabbrocino G. Operational modal analysis of civil engineering structures. 1st ed. – New York: Springer-Verlag, 2014. – 322 p.
3. Кириленко А.М. Диагностика железобетонных конструкций и сооружений. – М.: Архитектура-С, 2013. – 365 с.
4. Glišić B., Inaudi D., Vurpillot S. Structural monitoring of concrete structures // Third World Conference on Structural Control, 7-12.4.2002. – Como, Italy, 2002. – 10 p.
5. Different techniques of structural health monitoring / D.R. Dhakal, K. Neupane, C. Thapa, G.V. Ramanjaneyulu // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – 2013. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 55–66.
6. Tse C., Luk J. Design and implementation of automatic deformation monitoring system for the construction of railway tunnel: a case study in West Island line // Proceeding of Joint International Symposium on Deformation Monitoring. – Hong Kong, China, 2011. – 7 p
7. Климов А.Н. Прогноз развития напряженно-деформированного состояния конструкций высотного здания на основании данных системы мониторинга // Жилищное строительство. – 2013. – № 11. – С. 13–16.
8. Integrated system of structural health monitoring and intelligent management for a cable-14 stayed bridge / Bin Chen, Xu Wang, Dezhang Sun, Xu Xie // ScientificWorld Journal. – 2014: 689471.
9. Deployment of a smart structural health monitoring system for long-span arch bridges: A review and a case study / Z. Chen, X. Zhou, X. Wang, L. Dong, Y. Qian // Sensors. – 2017. – Vol. 17(9). – P. 2151.
10. Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А. Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестн. МГСУ. – 2015. – № 5. – С. 92–105.
11. Patil P.K., Patil S.R. Review on structural health monitoring system using WSN for bridges // International Conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA) 10.1109/ICECA. – 2017. – P. 8203615.
12. Сопегин Г.В., Сурсанов Д.Н. Использование автоматизированных систем мониторинга конструкций (АСМК) // Вестн. МГСУ. – 2017. – Т. 12. – Вып. 2 (101). – С. 230–242.
13. Roghaei M., Zabihollah A. An efficient and reliable structural health monitoring system for buildings after earthquake // APCBEE Procedia. – 2014. – No. 9. – P. 309–316.
14. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures / W. Mukupa, G.W. Roberts, C.M. Hancock, K. Al-Manasir // Survey Revie. – 2016. – P. 1–18. DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039
15. Ten-year monitoring of high-rise building columns using long-gauge fiber optic sensors / B. Glisic, D. Inaudi, J.M. Lau, C.C. Fong // Smart Materials and Structures. – Vol. 22. – No. 5. – P. 0550301.
16. Deformation monitoring of load-bearing reinforced concrete beams / R. Tsvetkov, I. Shardakov, A. Shestakov, G. Gusev, V. Epin // 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017. – 2017. – Vol. 5. – P. 620–626.
17. The test stand for studying subcritical and critical states of full-size reinforced concrete structures / I. Shardakov, M. Bartolomey, A. Shestakov, R. Tsvetkov, V. Yepin // Proceedings of the First Structural Integrity Conference and Exhibition. Bangalore. SICE-2016. – 2017. – 6 p.
18. Применение метода акустической эмиссии для контроля деструкционных процессов в цементных бетонах / Д.Л. Мерсон, С.И. Дементьев, М.А. Миронов, М.М. Куценко, А.Ю. Виноградов // Вектор науки ТГУ. – 2012. – № 2 (20). – С. 41–45.
19. Карпинтери А., Лачидонья Дж., Пуньо Н. Многомасштабные временные эффекты: мониторинг конструкций с трещинами с использованием метода акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. – 2005. – № 5. – С. 85–89.
20. Wang L., Chan T.H.T. Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring // The Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference : Rethinking Sustainable Development: Planning, Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure. – Queensland University, 2009. – 15 p.
21. Mechanical vibration sensing for structural health monitoring using a millimeter-wave doppler radar sensor / J. Moll, K. Bechtel, B. Hils, V. Krozer // EWSHM – 7th European Workshop on Structural Health Monitoring. – Nantes, France, 2014. – hal-01022029. – P. 1801–1808
22. Liu X.L., Jiang Z.W., Ji L. Investigation on the design of piezoelectric actuator/sensor for damage detection in beam with lamb waves // Experimental Mechanics. – 2013. – Vol 53. – P. 485–492.
23. Kita A., Cavalagli N., Ubertini F. First results of mixed static-dynamic structural health monitoring of Consoli Palace in Gubbio // 10th IMC 10th International Masonry Conference G. Milani, A. Taliercio and S. Garrity (eds.). – Milan, Italy, 2018. – 15 p.
24. Swagato D., Saha P., Patro S.K. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review // J. Civil Struct Health Monit. – 2016. – Vol. 6. – P. 477–507.
25. Lyapin A., Shatilov Y. Vibration-based Damage Detection of the Reinforced Concrete Column // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 1867–1871.
26. Żółtowski M., Liss M., Melcer J. Vibration diagnostics of concrete block // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 182. – P. 02014.
27. Математическое моделирование вибрационных процессов в железобетонных конструкциях для организации мониторинга появления трещин / А.А. Быков, В.П. Матвеев, Г.С. Сероваев, И.Н. Шардаков // Изв. Рос. акад. наук. Механика твердого тела. – 2015. – № 2. – С. 60–72.
28. Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Ч. 2. Верификация методики на стендовых моделях / А.М. Белостоцкий, Д.К. Каличава, А.И. Нагибович, Н.О. Петряшев, С.О. Петряшев // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 28–42.
29. Fritzen C.-P. Vibration-based structural health monitoring – concepts and applications // Key Engineering Materials. – 2005. – Vol. 293–294. – P. 3–20.
30. Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Анализ распространения волн в подземных газопроводах применительно к задаче проектирования систем мониторинга // Вычислительная механика сплошных сред = Computational Continuum Mechanics. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 364–372.
31. Process of cracking in reinforced concrete beams (simulation and experiment) / I.N. Shardakov, A.P. Shestakov, I.O. Glot, A.A. Bykov // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2016. – Vol. 38. – P. 339–350.
32. Crack control in concrete using shock wave techniques / I. Shardakov, A. Bykov, A. Shestakov, I. Glot // Procedia Structural Integrity. – 2017. – Vol. 5. – P. 620–62.

33. Ударно-волновой метод контроля процесса устранения трещин в железобетонных конструкциях / А.А. Быков,

В.П. Матвеевко, И.Н. Шардаков, А.П. Шестаков // Изв. рос. акад. наук. Механика твердого тела. – 2017. – № 4. – С. 35–41.

34. Лурье А.И. Теория упругости. – М., 1970. – 940 с.

References

1. Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler B.R., Czauski J.J. A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. *Los-Alamos National Laboratory. Report LA-13976-MS, Los Alamos, NM, USA*, 2004.
2. Rainieri C., Fabbrocino G. Operational modal analysis of civil engineering structures. 1st ed. *New York, Springer-Verlag*, 2014, 322 p.
3. Kirilenko A.M. Diagnostika zhelezobetonnykh konstrukcij i sooruzhenij [Diagnostics of reinforced concrete structures and structures]. *Moscow, Arhitektura-S*, 2013, 365 p.
4. Glišić B., Inaudi D., Vurpillot S. Structural monitoring of concrete structures. *Como, Italy, Third World Conference on Structural Control*, 2002, 12.4, 10 p.
5. Dhakal D.R., K. Neupane, Thapa C., Ramanjaneyulu G. V. Different techniques of structural health monitoring. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2013, vol. 3, iss. 2.– pp. 55-66.
6. Tse C., Luk J. Design and implementation of automatic deformation monitoring system for the construction of railway tunnel: a case study in West Island line. *Proceeding of Joint International symposium on deformation monitoring. Hong Kong, China*, 2011, 7 p.
7. Klimov A.N. Prognoz razvitija naprjazhenno-deformirovanogo sostojanija konstrukcij vysotnogo zdanija na osnovanii dannyh sistemy monitoringa [Forecast of development of the stress-strain state of high-rise building structures based on monitoring system data]. *Zhurnal stroitel'stvo*, 2013, № 11, S. 13-16.
8. Bin Chen, Xu Wang, Dezhang Sun, Xu Xie Integrated system of structural health monitoring and intelligent management for a cable-stayed bridge. *Scientific World Journal*, 2014: – 689471.
9. Chen Z., Zhou X., Wang X., Dong L., Qian Y. Deployment of a smart structural health monitoring system for long-span arch bridges: A review and a case study. *Sensors*, 2017 vol. 17(9), 2151 p.
10. Shahramanjan A.M., Kolotovich Ju.A. Opyt ispol'zovanija avtomatizirovannykh sistem monitoringa deformacionnogo sostojanija nesuvih konstrukcij na olimpijskix ob'ektax Sochi-2014 [Experience of using automated systems for monitoring the deformation state of supporting structures at the Olympic facilities of Sochi-2014]. *Vestnik MGSU*, 2015, no 5, pp. 92-105.
11. Patil P.K., Patil S.R. Review on structural health monitoring system using WSN for bridges. 2017 International Conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA) 10.1109/ICECA-.2017, p. 8203615
12. Sopegin G.V., Sursanov D.N. Ispol'zovanie avtomatizirovannykh sistem monitoringa konstrukcij (ASMK) [The use of automated systems for monitoring structures (AFMK)]. *Vestnik MGSU*, 2017, vol. 12, iss. 2 (101), pp. 230-242
13. Roghaei M., Zabihollah A. An efficient and reliable structural health monitoring system for buildings after earthquake. *APCBEE Procedia*, 2014, no. 9, pp. 309-316.
14. Mukupa W., Roberts G. W. Hancock C. M., Al-Manasir K. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*, 2016, pp. 1-18. DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039
15. Glisic B., Inaudi D., Lau J.M. Fong C.C. Ten-year monitoring of high-rise building columns using long-gauge fiber optic sensors. *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no 5, p. 0550301
16. Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A., Gusev G., Epin V. Deformation monitoring of load-bearing reinforced concrete beams». 2nd International Conference on Structural Integrity. *ICSI 2017*, 2017, vol. 5, pp. 620-626
17. Shardakov I., Bartolomey M., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. The test stand for studying subcritical and critical states of full-size reinforced concrete structures. *Proceedings of the First*

Structural Integrity Conference and Exhibition. *Bangalore. SICE-2016*, 2017, 6 p.

18. Merson D.L., Dement'ev S.I., Mironov M.A., Kucenko M.M., Vinogradov A.Ju. Primenenie metoda akusticheskoj jemissii dlja kontrolja destrukcionnykh processov v cementnykh betonah [Application of acoustic emission method to control the destruction processes in cement concretes]. *Vektor nauki TGU*, 2012, no. 2 (20), pp. 41-45.

19. Karpinteri A., Lachidon'ja Dzh., Pun'o N. Mnogomasshtabnye vremennye jeffekty: monitoring konstrukcij s trevinami s ispol'zovanijem metoda akusticheskoj jemissii [Multiscale transient effects: monitoring structures with cracks using the acoustic emission method]. *Fizicheskaja mezomehanika*, 2005, no. 5, pp. 85-89.

20. Wang L., Chan T.H.T. Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring. *The Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking Sustainable Development: Planning, Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure, Queensland University*, 2009, 15 p.

21. Moll J., Bechtel K., Hils B., Krozer V. Mechanical vibration sensing for structural health monitoring using a millimeter-wave doppler radar sensor.. EWSHM – 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Nantes, France, 2014. – hal-01022029, pp. 1801-1808

22. Liu X.L., Jiang Z.W., Ji L. Investigation on the design of piezoelectric actuator/sensor for damage detection in beam with lamb waves. *Experimental Mechanics*, 2013, vol 53, pp. 485-492.

23. Kita A., Cavalagli N., Ubertini F. First results of mixed static-dynamic structural health monitoring of Consoli Palace in Gubbio. *Milan, Italy, 10th IMC 10th International Masonry Conference G. Milani, A. Taliercio and S. Garrity (eds.)*, 2018, 15 p.

24. Swagato Das Saha P. Patro S.K. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *J Civil Struct Health Monit*, 2011. vol 6, pp. 477-507

25. Lyapin A. Shatilov Y. Vibration-based Damage Detection of the Reinforced Concrete Column. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150. pp. 1867-1871

26. Żółtowski M., Liss M., Melcer J. Vibration diagnostics of concrete block. *MATEC Web of Conferences*, 2018. vol. 182, p. 02014

27. Bykov A.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S., Shardakov I.N. & Shestakov A.P., 2015. Mathematical Modeling of Vibration Processes in Reinforced Concrete Structures for Setting Up Crack Initiation Monitoring. *Mechanics of Solids*. vol. 50, no. 2, 160-170.

28. Belostockij A.M., Kalichava D.K., Nagibovich A.I., Petrashev N.O., Petrashev S.O. Adaptiruemye konechnojelementnye modeli v osnove dinamicheskogo monitoringa nesuvih konstrukcij vysotnykh zdaniy. Chast' 2. Verifikacija metodiki na stendovykh modeljakh [Adaptable finite element models are the basis for dynamic monitoring of load-bearing structures of high-rise buildings. Part 2. Verification methods on the bench models]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2012, vol. 8, no 4, pp. 28-42.

29. Fritzen C.-P. Vibration-based structural health monitoring – concepts and applications. *Key Engineering Materials*, 2005, vol. 293-294, pp. 3-20

30. Tsvetkov R.V., Shardakov I.N., Shestakov A.P. Analysis of wave propagation in underground gas pipelines in the context of the problem of designing the intelligent monitoring systems.. *Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol.6, no. 3, pp. 364-372.

31. Shardakov I.N., Shestakov A.P., Glot I.O., Bykov A.A. Process of cracking in reinforced concrete beams (simulation and experiment). *Frattura ed Integrità Strutturale*, – 2016, vol. 38, pp. 339-350

32. Shardakov I., Bykov A., Shestakov A., Glot I. Crack control in concrete using shock wave techniques. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, pp. 620-62

33. Bykov A.A., Matveenko V.P., Shardakov I.N., Shestakov A.P. Shock wave method for monitoring crack repair pro-

cesses in reinforced concrete structures. *Mechanics of Solids*, 2017, vol. 52, no 4, pp. 378-383.

34. Lurie, A.I., 2005. Theory of elasticity. *Springer, Berlin*, pp. 1007.