

УДК 004.94:620.17:69

С.Д. Николенко, С.А. Сазонова, В.Я. Манохин
**ФИЗИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОНСТРУКЦИИ**
*Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия*

В области научных исследований одним из важных является проведение экспериментов. Достаточно часто возникает необходимость исследовать различные модели. Для создания воздействий на исследуемый объект, близких по основным параметрам к реальным, используют различные стенды. В частности, для создания сейсмической нагрузки чаще всего используют специальные платформы. Однако не все они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним исследователями. Выбор и приспособление стенда для испытания балочных железобетонных элементов заданных размеров на нагрузку типа «сейсмической» осуществляется с учетом возможности варьирования нагрузки в широких пределах и измерения ускорения и перемещения конструкции. Целью исследований явилось моделирование нагрузки типа «сейсмической» на выбранном стенде и отработка методики проведения испытаний железобетонных балок на такую нагрузку, включая разработку конструкции крепления балок и измерительных приборов. Для достижения поставленной цели универсальный динамический стенд был приспособлен под конкретный вид экспериментального исследования. В частности, был разработан способ крепления исследуемой конструкции и измерительных приборов, а также способ создания второй полуволны ускорений. Разработано устройство центровки места удара по рабочей тележке, что обеспечивает равенство воздействий на обе опоры испытываемой конструкции. Произведено тестирование всего измерительного комплекса. Получен контрольный график колебания балочной конструкции на воздействие типа «сейсмического». Проведено математическое моделирование колебаний балки на действие ударной импульсной нагрузки, с использованием метода конечных элементов. В работе обоснована возможность и целесообразность моделирования универсальной нагрузки типа «сейсмической» с помощью универсального динамического стенда. Предложена и применена конструкция крепления испытываемого элемента и измерительных приборов на рабочей тележке стенда. Предложена и отработана методика испытаний экспериментальных конструкций на нагрузку типа «сейсмической». Сравнение результатов численного моделирования с экспериментом показало удовлетворительную сходимость.

Ключевые слова: физическое моделирование, нагрузка типа «сейсмическая», экспериментальные стенды, методика эксперимента, численное моделирование.

Введение. Во многих областях деятельности человека возникает необходимость проведения экспериментальных исследований. В частности, необходимость в экспериментальных исследованиях существует в области строительства. Одной из наиболее сложных областей исследований является изучение поведения конструкций и оборудования при сейсмическом воздействии. По своей сути сейсмическое воздействие

это движение грунта, которое вызывается природными землетрясениями или техногенными факторами (например, взрывами). Такие воздействия обуславливают движение, деформации, иногда разрушение сооружений и других объектов [1].

В настоящее время невозможно создать реальную картину процессов, происходящих при землетрясениях. В частности, практически невозможно точно определить величины сейсмических сил и направления их действия на сооружение, так как движение земной коры во время землетрясения зависит от многих факторов. Поэтому при проведении экспериментальных исследований используются специальные стенды, позволяющие создавать знакопеременную нагрузку на испытуемое оборудование, приборы, конструкцию, фрагмент сооружения. Такую нагрузку можно условно назвать типа «сейсмической», так как она не совсем точно повторяет сейсмическое воздействие.

Исследования новых видов строительных конструкций и оборудования может выполняться экспериментальными методами на натуральных образцах или физических моделях. Экспериментальные исследования на натуральных образцах применяют, в случае небольших размеров образцов или при соответствующем технико-экономическом обосновании. Экспериментальные исследования на физических моделях, основанные на теории подобия, более целесообразны, так как решают задачи снижения трудоемкости и стоимости эксперимента.

Для динамических воздействий характерным являются колебания, возникающие под влиянием сил инерции. При этом возникающие внутренние усилия, перемещения и деформации являются функциями времени.

Например, для приборов и оборудования установлены четыре группы сейсмобезопасности [2]. Для их испытаний используются различные вибростенды или платформы. Ведущие мировые научные центры располагают стендовым оборудованием для проведения полномасштабных сейсмических испытаний строительных конструкций массой более 1000 тонн [3].

Россия значительно уступает зарубежному, но в стране имеется оборудование, позволяющее проводить испытания на сейсмическую стойкость сравнительно небольших объектов [3].

Для испытания элементов конструкций можно использовать виброплатформы маятникового типа - Рисунок 1 или сейсмо-вибро стенды - Рисунок 2.

Однако после анализа выяснилось, что провести испытания на таком оборудовании достаточно дорого и для испытания конструкций балочного типа не целесообразно. Поэтому было принято решение дооборудовать

универсальный динамический стенд для моделирования воздействия типа «сейсмического».



Рисунок 1 - Общий вид виброплатформы маятникового типа



Рисунок 2 - Вид универсального сейсмо-вибро стенда грузоподъемностью 100 тонн (УСВС-100)

Оборудование для проведения эксперимента делится на три части [4]: измерительные приборы, испытательная аппаратура и образец для эксперимента. В нашем случае выбор этих составляющих осуществлялся, начиная с образца, для эксперимента, который выбирался исходя из физического и геометрического подобия.

Было использовано физическое моделирование с уменьшением масштаба системы. Такими образцами явились железобетонные балки размером 1650x100x100 мм. При этом рабочим пролетом таких балок был выбран пролет 1500 мм.

Целью исследований являлось – моделирование нагрузки типа «сейсмической» на выбранном стенде и отработка методики проведения испытаний железобетонных балок на такую нагрузку, включая разработку конструкции крепления балок и измерительных приборов.

Выбор оборудования стенда. Из имевшихся на экспериментальной базе стендов было принято решение использовать универсальный динамический стенд, так как его мощность позволяла создавать требуемые нагрузки и изменять их в широких пределах. А его конструкция позволяла крепить дополнительное оборудование. Например, виброплатформы маятникового типа не позволяют достаточно просто и надежно закрепить балочную конструкцию и измерительные приборы.

Выбранный универсальный динамический стенд представляет собой достаточно сложный комплекс, изображенный на Рисунке 3. Основными элементами стенда являлись: гидравлический механизм с пружинами, ударная тележка, направляющие для движения ударной тележки, рабочая тележка.

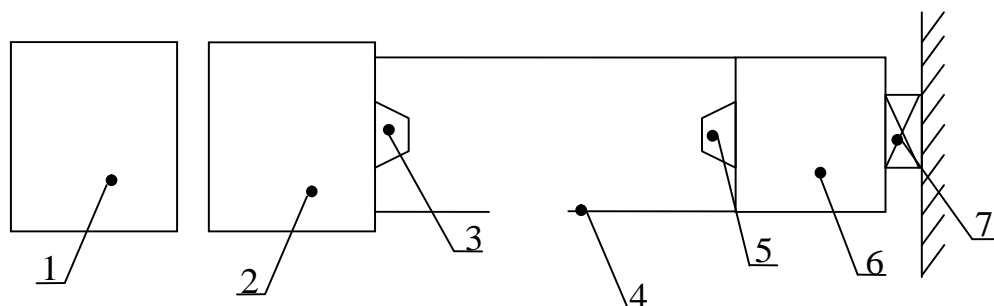


Рисунок 3 - Схема стенда для моделирования воздействия типа «сейсмического»:

- 1 – гидравлический механизм с пружинами; 2 – ударная тележка;
- 3 – центрирующее устройство на ударной тележке; 4 – направляющие;
- 5 – центрирующее устройство на рабочей тележке; 6 – рабочая тележка;
- 7 – упругая вставка

На первом этапе были проведены мероприятия позволяющие создавать динамическую нагрузку, типа «сейсмической». Такая нагрузка

создавалась путем удара ударной тележки по рабочей тележке, через устройство центровки удара. Устройство центровки обеспечивало одинаковые показатели ускорения в любой точке рабочей тележки.

При этом для создания второй полуволны воздействия на испытываемую конструкцию между упором и рабочей тележкой располагалась упругая вставка. Упругая вставка, имела разную жесткость, зависевшую от величины конкретного воздействия на рабочую тележку.

На втором этапе для обеспечения надежного крепления балки и измерительных приборов в процессе испытаний, стенд был дополнительно оборудован специальной конструкцией, изображенной на Рисунке 4.

Разработанная специальная конструкция состоит из крепления балки к рабочей тележке, представляющего собой два швеллера закрепленных на тележке с помощью болтов. Для создания жесткой конструкции и исключения расхождения опор балки, швеллера были жестко соединены между собой, посредством приваренных швеллеров, (на Рисунке 4 условно не показаны). Можно видеть на Рисунке 5. Непосредственно сама балка крепится с помощью конструкции для фиксации, которая приварена к швеллерам конструкции крепления балки к рабочей тележке (Рисунки 4, 5). Все это делается для того, чтобы исключить кручение балки при колебаниях.

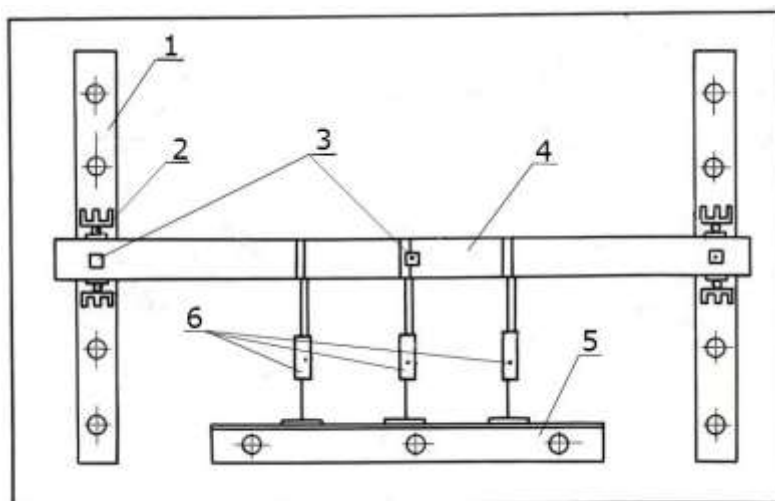


Рисунок 4 - Схема размещения балки и измерительных приборов на рабочей тележке:
1 - конструкция крепления балки к рабочей тележке; 2 - конструкция для фиксации балки;
3 - датчики ускорений; 4 - балка; 5 - конструкция крепления датчиков перемещения;
6 - датчики перемещения

Два датчика ускорения крепятся с помощью болтов. Один датчик ускорения крепится на конструкции для фиксации балки с помощью болта. Второй датчик ускорения крепится непосредственно в центре балки

посредством болта, установленного тело балки в процессе ее изготовления. Общий вид закрепленной на рабочей тележке балки показан на Рисунке 5.

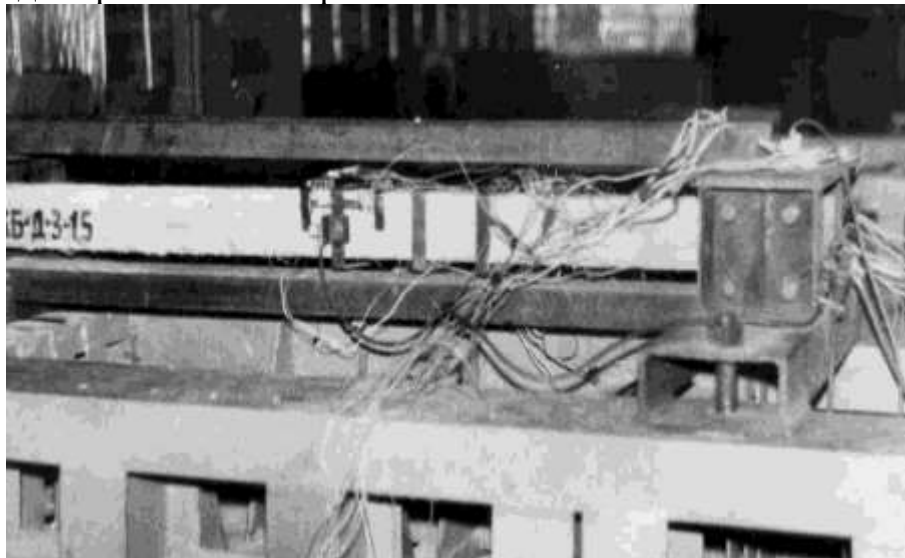


Рисунок 5 - Вид закрепленной балки и датчиков

Датчики перемещения реохордного типа одним концом крепятся к уголку, который жестко с помощью болтов соединен с рабочей тележкой. Второй конец датчика с помощью специально изготовленных металлических скоб крепится на самой балки. На Рисунке 6 показаны установленные датчики перемещения.

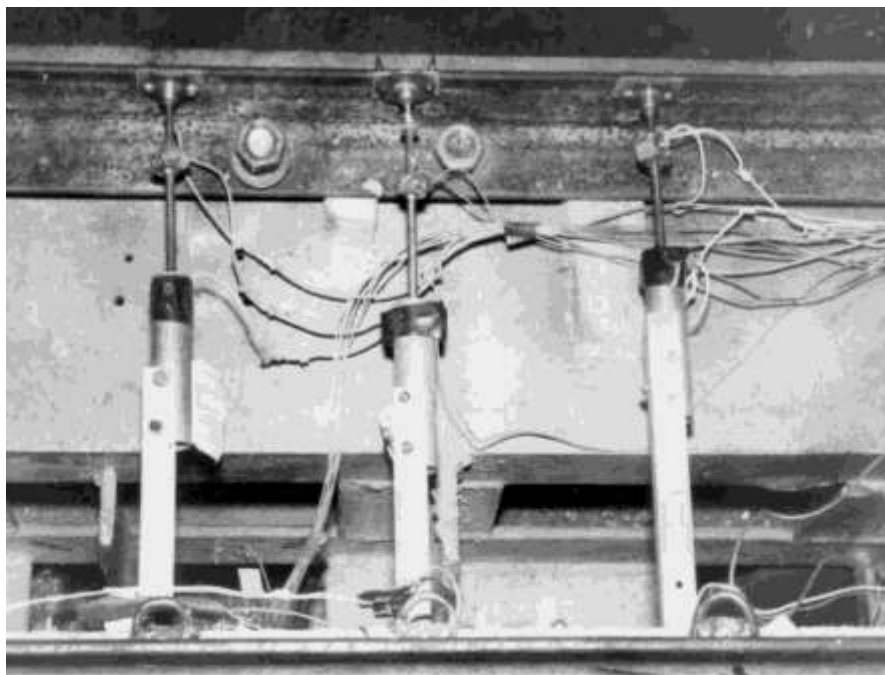


Рисунок 6 - Вид закрепленных датчиков перемещений

Методика проведения испытаний. Первоначально испытываемая конструкция и измерительные приборы надежно закреплялись на рабочей тележке. Затем подключалась и тестировалась измерительная аппаратура. После этого, с помощью гидравлического механизма производился захват ударной тележки и сжатие пружин стенда. Сжатие пружин проводилось до определенного (расчетного) уровня. Такой уровень определяется требуемой величиной воздействия, учитывая большую массу ударной тележки и жесткость пружины, измеряется в сантиметрах.

Далее дистанционно захваты ударной тележки отпускались, и она приводилась в движение за счет распрямления пружин. Ударная тележка, двигаясь по направляющим, ударяла по рабочей тележке, тем самым передавала нагрузку в виде ускорения на балку через опоры специально изготовленной конструкции. Отражаясь от упругой вставки, рабочая тележка передавала через те же опоры специально изготовленной конструкции нагрузку противоположного знака. После каждого испытания упругий элемент заменялся. В процессе испытаний балок проводились следующие измерения:

ускорения на опорах балки с помощью датчиков ускорения (воздействие);

ускорения в центре пролета балки с помощью датчика ускорения;

перемещения балки в трех местах срединной части ее пролета, с помощью датчиков перемещений реохордного типа.

Все измерения проводились с записью времени. В процессе проведения экспериментальных исследований была отработана методика проведения таких исследований. В частности, подобраны величина сжатия пружин, соответствующая определенной нагрузке и жесткость упругой вставки, соответствующая второй полуволне воздействия.

В итоге серии проведенных испытаний были получены графики подтверждающие правильность выбора универсального динамического стенда для создания нагрузки типа «сейсмической», также надежность разработанных конструкций крепления и выбранной методики испытаний. Для проверки соответствия физической модели было проведено численное моделирование колебаний балки.

Численное моделирование колебаний балки. Численное моделирование колебаний балки производилось многими исследователями [5, 6]. Например, в работе [5] использовалась, конечно, разностная схема. В нашем случае численное моделирование колебаний балки производилось на действие ударной импульсной нагрузки, при этом использовался метод конечных элементов. Расчет проводился с помощью вычислительного комплекса Structure CAD (SCAD). При этом для решения

динамической задачи реализован безусловно устойчивый вариант метода Ньюмарка в форме «предиктор-корректор» [6].

Исходными данными для расчета приняты размеры и масса балки, а также форма импульса соответствующие экспериментальным. Предварительно проведенный модальный анализ динамической модели балки (Рисунок 7.) показал, что первая частота колебаний составила $f = 26.74$ Гц ($T_1 = 0.0374$ с). Продолжительность ударного импульса, полученного при эксперименте равна $t_u = 0.018$ с. При относительной продолжительности импульса $t_u / T_1 = 0.05$ форма импульса не очень влияет на характер свободных колебаний балки [7, 8].

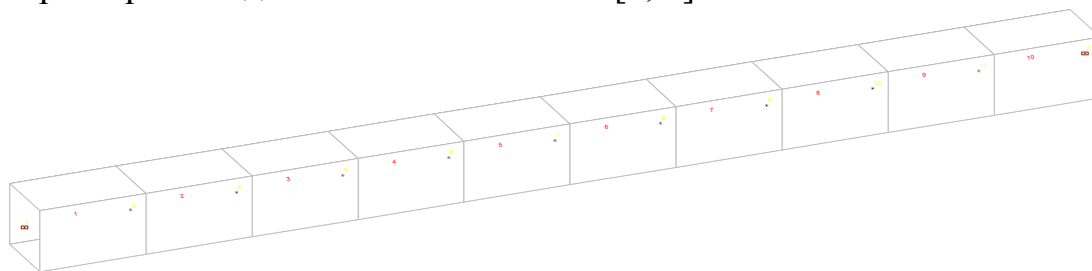


Рисунок 7 - Конечноэлементная модель балки прямоугольного сечения

Из сопоставления расчётной, полученной в предположении линейно-упругой работы материала, и экспериментальной виброграмм, можно сделать вывод об удовлетворительном совпадении результатов (Рисунок 8).

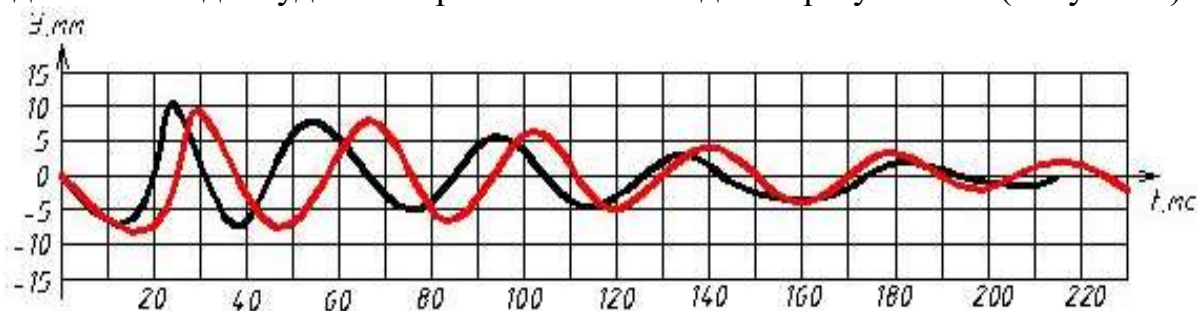


Рисунок 8 - Вид графика колебаний центра пролета балки:
черный цвет-эксперимент, красный цвет - расчет

Заключение. В результате проведенных исследований подтверждена возможность и целесообразность моделирования динамической нагрузки типа «сейсмической» с помощью универсального динамического стенда.

Разработана и применена специальная конструкция для размещения балки и измерительных приборов на рабочей тележке стенда.

Отработана методика проведения испытаний железобетонных балок на универсальном динамическом стенде при нагрузке типа «сейсмической».

Проведено численное моделирование колебаний балки на действие ударной импульсной нагрузки, с использованием метода конечных элементов. Результат показал удовлетворительную сходимость с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах (актуализированного СНиП II-7-81*). [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200111003>
2. ГОСТ 30546.1-98. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости (с изменением N 1, 2005г.). [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200010027>
3. Савков С.В. Центр комплексно-сейсмических испытаний: текущая ситуация и перспективы развития. Сейсмостойкое строительство [Текст] / С.В. Савков, С.В. Демишин // Безопасность сооружений. 2015. №5. С. 1-5.
4. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х. Шенк. М.: Мир, 1972. 381 с.
5. Атамуратов А.Ж. Решение уравнения колебаний балки при шарнирном закреплении на границах / А.Ж. Атамуратов // Молодой ученый. 2014. №2. С. 1-7. URL <https://moluch.ru/archive/61/8996/> (дата обращения: 13.04.2018).
6. Тарасов В.А. Колебания стержневой системы с одной степенью свободы [Текст] / В.А. Тарасов, М.Ю. Барановский, И.А. Дуванова, И.Д. Сальманов, Ю.Е. Павлушкина // Строительство уникальных зданий и сооружений. № 10 (37). 2015. С. 53-80.
7. Hughes T.J.R. A precis of development in computational methods for transient analysis / T.J.R. Hughes, T. Belytschko // Journal of Applied Mechanics. 1983. Vol. 50. Pp. 1033 – 1041.
8. Клаф Р. Динамика сооружений [Текст] / Р. Клаф, Дж. Пензиен. М., 1979. 320 с.

S.D. Nikolenko, S.A. Sazonova, V.J. Manohin
**PHYSICAL AND NUMERICAL MODELING OF DYNAMIC IMPACT
ON THE DESIGN**

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia

In the field of scientific research, one of the most important is the conduct of experiments. Quite often there is a need to explore different models. To create influences on the object under study that are close in real terms to the real ones, different stands are used. In particular, special platforms are most often used to create a seismic load. However, not all of them meet the requirements imposed on them by researchers. The choice and adaptation of the bench for testing beam reinforced concrete elements of specified sizes for a seismic load is carried out taking into account the possibility of varying the load over a wide range and measuring the acceleration and displacement of the structure. The purpose of the research was modeling of the seismic load on the selected bench and testing the procedure for testing concrete beams for this load, including the development of the construction of the beams and measuring devices. To achieve this goal, the universal dynamic bench was adapted for a specific type of experimental research. In particular, a method has been developed for fixing the structure and measuring instruments under investigation, as well as the method for creating a second half-wave of accelerations. The device for centering the impact site on the working trolley has been developed, which ensures equality of impacts on both pillars of the tested structure. The whole test complex was tested. A control plot of oscillation of a beam structure for a "seismic" type effect is obtained. Mathematical modeling of the beam oscillations on the action of the shock impulse load is carried out using the finite element method. The possibility and expediency of simulating a universal load of the "seismic" type with the help of a universal dynamic stand is substantiated in the work. The design of fastening of a tested element and measuring devices on a working trolley of the stand is offered and applied. A technique for testing experimental designs for a "seismic" type load is proposed and tested. Comparison of the results of numerical simulation with experiment showed satisfactory convergence.

Keywords: physical modeling, seismic load, experimental stands, experimental procedure, numerical simulation.

REFERENCES

1. SP 14.13330.2014 Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh (aktualizirovannogo SNiP II-7-81*). [Elektronnyy resurs]: Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/1200111003>
2. GOST 30546.1-98. Obshchie trebovaniya k mashinam, priboram i drugim tekhnicheskim izdeliyam i metody rascheta ikh slozhnykh konstruktsiy v chasti seysmostoykosti (s izmeneniem N 1, 2005g.). [Elektronnyy resurs]: Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/1200010027>
3. Savkov S.V. Tsentr kompleksno-seysmicheskikh ispytaniy: tekushchaya situatsiya i perspektivy razvitiya. Seysmostoykoe stroitel'stvo [Tekst] / S.V. Savkov, S.V. Demishin // Bezopasnost' sooruzheniy. 2015. No.5. pp. 1-5.
4. Shenk, Kh. Teoriya inzhenernogo eksperimenta [Tekst] / Kh. Shenk. M.: Mir, 1972. 381 p.
5. Atamuratov A.Zh. Reshenie uravneniya kolebaniy balki pri sharnirnom zakreplenii na granitsakh / A.Zh. Atamuratov // Molodoy uchenyy. 2014. No. 2. pp. 1-7. URL <https://moluch.ru/archive/61/8996/> (data obrashcheniya: 13.04.2018).
6. Tarasov V.A. Kolebaniya sterzhnevoy sistemy s odnoy stepen'yu svobody [Tekst] / V.A. Tarasov, M.Yu. Baranovskiy, I.A. Duvanova, I.D. Sal'manov, Yu.E. Pavlushkina // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. No. 10 (37). 2015. pp. 53-80.
7. Hughes T.J.R. A precis of development in computational methods for transient analysis / T.J.R. Hughes, T. Belytschko // Journal of Applied Mechanics. 1983. Vol. 50. pp. 1033 – 1041.
8. Klaf R. Dinamika sooruzheniy [Tekst] / R. Klaf, Dzh. Penzien. M., 1979. 320 p.