

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **033840**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2019.12.02**(51) Int. Cl. **G01M 7/08 (2006.01)**(21) Номер заявки  
**201800576**(22) Дата подачи заявки  
**2018.10.29****(54) СПОСОБ ИСПЫТАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ СВЕРХНОРМАТИВНОЙ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ**(43) **2019.11.29**

(72) Изобретатель:

(96) **2018000125 (RU) 2018.10.29**

**Однокопылов Георгий Иванович,  
Саркисов Дмитрий Юрьевич,  
Радченко Павел Андреевич,  
Галяутдинов Дауд Рашидович,  
Бутузов Егор Анатольевич (RU)**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ "ТОМСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ" (ТГАСУ) (RU)**

(56) RU-C1-2645039  
EA-B1-027864  
EA-B1-030362

(57) Изобретение может быть использовано при испытании элементов или конструкций зданий и сооружений с оценкой степени их живучести при воздействии сверхнормативной кратковременной динамической нагрузки. Испытуемую конструкцию подвергают сверхнормативному ударному воздействию через распределительную траверсу, уложенную на конструкции, и фиксируют начало и окончание ударного воздействия. Силоизмерителем определяют значение максимальной динамической нагрузки в момент разрушения строительной конструкции. С помощью датчиков измеряют и записывают мгновенные значения прогибов и ускорений в фиксированном интервале времени. Полученные данные обрабатывают с помощью измерительно-вычислительного комплекса. По значениям массы строительной конструкции, распределительной траверсы и силоизмерителя и значениям ускорений вычисляют силы инерции. Исходя из величин действующей нагрузки на испытываемую конструкцию, ее прогибов и возникающих сил инерции, находят значения работы сил в каждый момент времени в точках опирания распределительной траверсы. Затем определяют коэффициент степени живучести по формуле

$$k_{с.ж.} = \frac{\int_0^p |A(t)| dt}{\int_0^v |A(t)| / dt}$$

где  $p$  - время максимального прогиба строительной конструкции (с);  $v$  - время максимального выгиба строительной конструкции (с);  $A(t)$  - значения работы сил в заданном интервале времени. Технический результат заключается в определении коэффициента степени живучести по значениям совершаемой работы за фиксированный интервал времени и оценке по этому коэффициенту степени живучести испытываемой строительной конструкции.

**B1****033840****033840****B1**

Изобретение относится к области строительства и может быть использовано при испытании элементов или конструкций зданий и сооружений с оценкой степени их живучести при воздействии сверхнормативной кратковременной динамической нагрузки по величине коэффициента степени живучести, а также при анализе данных, полученных вследствие мониторинга зданий и сооружений при опасных природных и техногенных воздействиях силового характера.

Известен способ испытания и определения степени живучести строительных конструкций (патент RU 2477459 C1, G01M 7/08 (2006.01), опубл. 10.03.2013), согласно которому сначала резонансным методом определяют низшую собственную частоту колебаний конструкции, затем, не меняя положения испытуемой конструкции, конструкцию подвергают сверхнормативному ударному воздействию, полученные данные обрабатывают с помощью измерительно-вычислительного комплекса и фильтруют высшие гармоники собственных колебаний, соответствующие гармоникам в момент разрушения конструкции, от низшей гармоники, частота которой соответствует измеренной низшей собственной частоте колебаний конструкции, и по полученным данным судят о реальных значениях динамических параметров. После динамического нагружения испытуемую конструкцию дополнительно подвергают пошаговому статическому нагружению до полного ее разрушения и определяют величину остаточной несущей способности  $q_s$  конструкции по разности значения максимальной динамической нагрузки  $q_d$  в момент разрушения конструкции и значения приложенной максимальной статической нагрузки. Дополнительно, например, с помощью лазерной рулетки производят измерения длин строительной конструкции до и после каждого вида нагружения и определяют величины относительных деформаций. Учитывая величины относительных деформаций после динамического и статического нагружения конструкции и величины остаточной несущей способности после испытания и максимальной динамической нагрузки в момент разрушения конструкции, определяют коэффициент степени живучести конструкции.

Достоинством способа является возможность точного измерения динамической нагрузки в момент разрушения строительной конструкции, остаточного ресурса и деформаций строительной конструкции в процессе испытания. Данный способ позволяет определить коэффициент степени живучести исходя из полного значения работ (по динамическому разрушению и последующему статическому разрушению) в момент разрушения строительной конструкции. Однако данный способ при определении коэффициента степени живучести учитывает только работу в момент разрушения и не учитывает значение совершаемой работы в течение промежутка времени.

В последние годы все чаще возникает необходимость проектирования железобетонных конструкций, на которые возможно воздействие интенсивных кратковременных динамических сверхнормативных нагрузок. Такие нагрузки характеризуются резким нарастанием фронта, коротким сроком действия и волновым характером воздействия. Опасность действия на сооружения ударных волн возрастает вследствие возможных взрывов обычных взрывчатых веществ при их хранении, аварийном падении грузов, террористических актов, природных и техногенных катастроф и т.д. Возникающие при этом специфические нагрузки часто вызывают значительные повреждения конструкций, и даже их полное или частичное разрушение, которое может привести к травмам и гибели людей, а также порче дорогостоящего оборудования и, следовательно, значительным материальным затратам.

Из литературных источников (например, Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций М., Стройиздат, 1974, 207 с.) известно, что при кратковременном динамическом нагружении прочность строительных конструкций выше, чем при статическом нагружении, что объясняется изменением физико-механических характеристик бетона и арматуры по сравнению со статическим состоянием. При кратковременном динамическом нагружении происходит неравномерное развитие и определенное запаздывание деформаций по сравнению с результатами статических испытаний.

Известен способ (патент RU 2645039 C1, G01M 7/08 (2006.01), опубл. 15.02.2018), который принят за прототип, согласно которому испытуемую конструкцию подвергают сверхнормативному ударному воздействию через распределительную траверсу, силоизмерителем определяют значение максимальной динамической нагрузки в момент разрушения строительной конструкции при ударном воздействии, процесс динамического нагружения регистрируют компьютерной измерительной системой и полученные данные обрабатывают с помощью измерительно-вычислительного комплекса. При этом фиксируют начало и окончание ударного воздействия, измеряя с помощью силоизмерителя мгновенные значения кратковременной динамической нагрузки в указанном интервале времени, при этом дополнительно в этом же интервале времени определяют мгновенные значения опорных реакций с помощью датчиков опорных реакций, установленных симметрично с двух сторон испытываемого образца. Затем строят графики зависимостей относительной кратковременной динамической нагрузки и относительной суммарной опорной реакции от времени ударного воздействия. Далее определяют мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы в строительной конструкции при ударном разрушении. По коэффициентам результирующей силы и построенным графикам судят о процессе изменения напряженно-деформированного состояния строительной конструкции в интервале действия сверхнормативной ударной нагрузки, а также доле тепловых потерь в затраченной энергии на разрушение конструкции.

Достоинством способа является возможность определить величину действующей нагрузки, опорных реакций и коэффициент результирующей силы строительной конструкции в процессе испытания в

зависимости от времени ударно-волнового воздействия, но данный способ не позволяет оценить значение совершаемой работы в зависимости от времени и степень живучести строительной конструкции.

Техническая проблема, решаемая изобретением, заключается в оценке степени живучести ответственных строительных конструкций зданий и сооружений при ударно-волновом нагружении строительной конструкции.

Технический результат при реализации изобретения заключается в определении коэффициента степени живучести по значениям совершаемой работы в заданный интервал времени исходя из величин действующей нагрузки на испытываемую конструкцию, ее прогибов и возникающих сил инерции.

Технический результат достигается следующим образом. Как и по способу, принятому за прототип, согласно заявленному способу испытываемую конструкцию подвергают сверхнормативному ударному воздействию через распределительную траверсу, уложенную на конструкции в продольном направлении. Силоизмерителем определяют значение максимальной динамической нагрузки в момент разрушения строительной конструкции при ударном воздействии, фиксируют начало и окончание ударного воздействия. Одновременно в этом же интервале времени с помощью соответствующих датчиков фиксируют их мгновенные значения, процесс динамического нагружения регистрируют компьютерной измерительной системой и полученные данные обрабатывают с помощью измерительно-вычислительного комплекса.

В отличие от прототипа дополнительно судят о степени живучести испытываемой строительной конструкции, для этого с помощью датчиков ускорений и прогибомеров снимают мгновенные значения ускорений и прогибов испытываемой строительной конструкции по ее длине, в зафиксированном интервале времени ударного воздействия, определяют силы инерции  $F_{ин}$  по формуле  $F_{ин} = -ma$ , где  $m$  - масса строительной конструкции, распределительной траверсы и силоизмерителя;  $a$  - значение ускорения, определяют значение работы сил  $A(t)$  в каждый момент времени в точках опирания распределительной траверсы по формуле

$$A(t) = \frac{(F_{сил}(t)/2 + F_{ин1}(t)) * f_1(t)}{2} + \frac{(F_{сил}(t)/2 + F_{ин2}(t)) * f_2(t)}{2}$$

где  $F_{сил}(t)/2$  - половинное значение силы в месте расположения одной из опор распределительной траверсы, Н;

$F_{ин1}(t)$ ,  $F_{ин2}(t)$  - силы инерции, приведенные в места расположения соответствующих опор распределительной траверсы, Н;

$f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  - соответствующие прогибы испытываемой конструкции в этих точках, м,

о степени живучести испытываемой строительной конструкции судят по коэффициенту степени живучести  $k_{с.ж.}$ , который определяется по формуле

$$k_{с.ж.} = \frac{\int_{п}^в |A(t)| dt}{\int_0^п |A(t)|/dt}$$

где  $п$  - время максимального прогиба строительной конструкции (с);

$в$  - время максимального выгиба строительной конструкции (с).

По значениям коэффициента степени живучести судят о живучести строительной конструкции при сверхнормативном динамическом воздействии.

При действии сверхнормативной динамической нагрузки к строительным конструкциям предъявляются требования отличные от требований при действии статических нагрузок. Основным требованием, предъявляемым к несущим строительным конструкциям при аварийных воздействиях, является сохранение несущей способности, при этом прогибы и деформации в общем случае не нормируются, а, следовательно, в целях экономии при проектировании можно использовать все ресурсы пластической работы материала. По сути, конструкция должна обладать свойством живучести при воздействии на нее кратковременных динамических нагрузок. Для оценки степени живучести необходим анализ соотношения ресурса работы конструкции в области упругих и пластических деформаций и определение соответствующей величины.

Такой величиной может служить коэффициент степени живучести, а о процессе изменения напряженно-деформированного состояния можно судить по детальной информации об изменении динамической нагрузки, ускорений, прогибов, сил инерции, работы, а также энергетического параметра.

Применение заявляемого способа по сравнению со способом прототипа позволяет достоверно определить коэффициент степени живучести строительной конструкции.

Нужно отметить, что для регистрации значений сверхнормативной кратковременной динамической нагрузки обычно необходимо и достаточно одного силоизмерителя, а для фиксации значений прогибов и ускорений может использоваться любое число датчиков в зависимости от конкретной схемы приложения нагрузки.

Указанная совокупность технических признаков, характеризующая заявленный способ, получена впервые и в известных технических решениях не обнаружена, что подтверждает новизну изобретения. Изобретение соответствует условию изобретательского уровня, поскольку явным образом предложенное техническое решение не следует из уровня техники. Не выявлены из уровня техники решения, которые

имеют признаки, совпадающие с отличительными признаками заявленного способа.

Изобретение промышленно применимо, поскольку его можно многократно использовать при испытании строительных элементов или конструкций зданий, сооружений при сверхнормативных кратковременных динамических ударных нагрузках, а также при анализе данных полученных вследствие мониторинга зданий и сооружений при опасных природных и техногенных воздействиях. Разработанная методика и коэффициент степени живучести могут быть полезны также при проектировании и оценки эффективности защитных систем на податливых опорах и систем, гасящих колебания для смягчения динамического воздействия на железобетонные конструкции при сейсмических, аварийных ударных или взрывных нагрузках.

На фиг. 1 изображена модель стенда для испытания изгибаемого железобетонного элемента на сверхнормативное кратковременное динамическое воздействие.

На фиг. 2 представлен стенд для испытания изгибаемого железобетонного элемента на сверхнормативное кратковременное динамическое воздействие.

На фиг. 3 изображен график изменения работы во времени в процессе кратковременного сверхнормативного динамического воздействия для изгибаемого железобетонного элемента, по которому можно определить значение коэффициента степени живучести.

Способ выполняют следующим образом.

Испытание проводится на копровой установке 1 при помощи создающего сверхнормативную кратковременную динамическую нагрузку падающего груза 2, который изначально подвешен к бомбосбрасывателю 3. Силоизмеритель 4, установлен через распределительную траверсу 5 на экспериментальном образце 6, который установлен на двух опорах 7, закрепленных на силовом полу 8. Под образцом установлена страховка 9, а на нижней части образца установлены датчики ускорений 10 и прогибомеры 11 (количество датчиков ускорения и прогибомеров может варьироваться в зависимости от задач конкретного исследования). Процесс динамического нагружения в процессе испытания регистрируется компьютерными измерительными системами.

Применение предложенного способа рассмотрено на конкретном примере испытания изгибаемого железобетонного элемента на кратковременное сверхнормативное динамическое воздействие. На строительную конструкцию (железобетонная балка сечением 90×180 мм и длиной 2000 мм, армированная пространственным каркасом с рабочей арматурой из 4 стержней диаметром 10 мм класса А400 и шарнирно опертая на две опоры с расчетным пролетом 1800 мм) в копровой установке был сброшен груз массой 435 кг с высоты 0,5 м. Показания установленных датчиков (силоизмеритель, датчики ускорений, прогибомеры) на зафиксированном интервале времени ударного воздействия от 0 до 68 мс были зарегистрированы измерительно-вычислительным комплексом.

В дальнейшем производится обработка полученных данных, и по представленной формуле вычисляется значение коэффициента степени живучести строительной конструкции. Наглядно зависимость работы от времени показана на графике (фиг. 3), построенном на основании вычислений. Здесь для удобства отображения информации значения работы  $A(t)$  переведены в относительные единицы путем деления на максимальную величину -  $A_{\max}$  - максимальное значение работы сил на заданных перемещениях за весь временной период вычислений, Дж. Площадь  $S_1$  соответствует полной относительной энергии, а площадь  $S_2$  соответствует относительной энергии упругой деформации образца. Для получения абсолютных значений энергий из графика необходимо умножить соответствующие площади на значение  $A_{\max}$ . Перевод в относительные величины необходим для удобства использования данных при сопоставительном анализе с результатами серии аналогичных испытаний.

В графическом виде коэффициент степени живучести находится путем соотношения площади  $S_2$  к площади  $S_1$  на фиг. 3, которые вычисляются с помощью определенного интеграла  $\int_n^b |A(t)| dt$  и  $\int_0^n |A(t)|/dt$ .

Для представленного в качестве примера испытания значение площади  $S_2$  (соответствует  $\int_n^b |A(t)| dt$ ) составило 1685,486, а значение площади  $S_1$  (соответствует  $\int_0^n |A(t)|/dt$ ) - 6838,938, значение коэффициента степени живучести составило  $k_{с.ж.} = S_2/S_1 = 1685,486/6838,938 = 0,246$ .

Полученные значения коэффициентов степени живучести строительной конструкции показывают, численную оценку живучести, выраженную в соотношении энергии упругой деформации к полной энергии. Чем выше значение коэффициента, тем больше степень живучести строительной конструкции при сверхнормативном воздействии.

Предложенный способ испытания позволяет точно и достоверно получить значение коэффициента степени живучести строительной конструкции при заданном значении сверхнормативной ударной испытательной нагрузки, при изменении конструктивных параметров строительной конструкции в большую или меньшую сторону и изменении длительность импульса удара. Значения коэффициента степени живучести можно использовать как общеприменимый параметр при сопоставительном анализе отклика строительных конструкций на сверхнормативное динамическое воздействие при различных параметрах нагрузки и конструкции образцов. Заявленный способ позволяет судить о процессе изменения напряженно-деформированного состояния строительной конструкции и по снятым значениям прогибов и ус-

корней в течение времени действия сверхнормативной ударной нагрузки.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ испытания строительной конструкции при сверхнормативной кратковременной динамической нагрузке, согласно которому испытуемую конструкцию подвергают сверхнормативному ударному воздействию через распределительную траверсу, уложенную на конструкции в продольном направлении, силоизмерителем определяют значение максимальной динамической нагрузки в момент разрушения строительной конструкции при ударном воздействии, фиксируют начало и окончание ударного воздействия, одновременно в этом же интервале времени с помощью соответствующих датчиков фиксируют их мгновенные значения, процесс динамического нагружения регистрируют компьютерной измерительной системой и полученные данные обрабатывают с помощью измерительно-вычислительного комплекса, отличающийся тем, что дополнительно судят о степени живучести испытываемой строительной конструкции, для этого с помощью датчиков ускорений и прогибомеров снимают мгновенные значения ускорений и прогибов испытываемой строительной конструкции по ее длине в зафиксированном интервале времени ударного воздействия, определяют силы инерции  $F_{ин}$  по формуле  $F_{ин} = -ma$ , где  $m$  - масса строительной конструкции, распределительной траверсы и силоизмерителя;  $a$  - значение ускорения, определяют значение работы сил  $A(t)$  в каждый момент времени в точках опирания распределительной траверсы по формуле

$$A(t) = \frac{(F_{сил}(t)/2 + F_{ин1}(t)) * f_1(t)}{2} + \frac{(F_{сил}(t)/2 + F_{ин2}(t)) * f_2(t)}{2}$$

где  $F_{сил}(t)/2$  - половинное значение силы в месте расположения одной из опор распределительной траверсы (Н);

$F_{ин1}(t)$ ,  $F_{ин2}(t)$  - силы инерции, приведенные в места расположения соответствующих опор распределительной траверсы (Н);

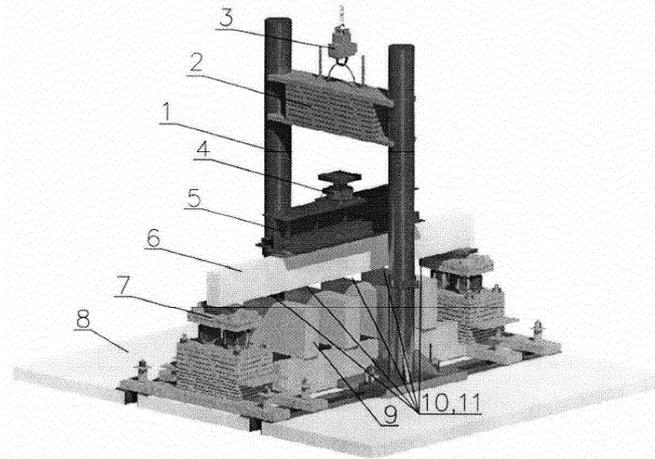
$f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  - соответствующие прогибы испытываемой конструкции в этих точках, м,

о степени живучести испытываемой строительной конструкции судят по коэффициенту степени живучести  $k_{с.ж.}$ , который определяется по формуле

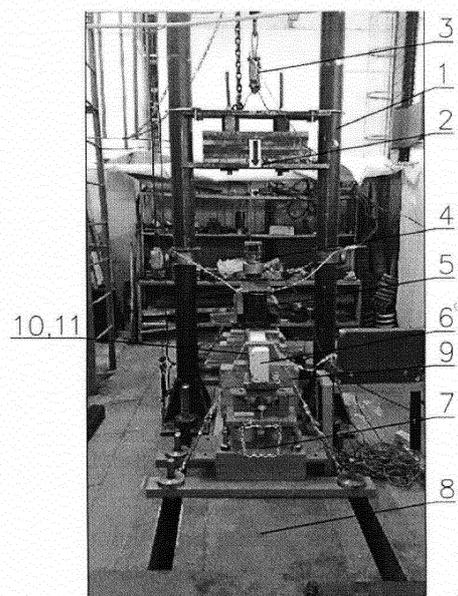
$$k_{с.ж.} = \frac{\int_0^{\pi} |A(t)| dt}{\int_0^{\nu} |A(t)| dt}$$

где  $\pi$  - время максимального прогиба строительной конструкции, с;

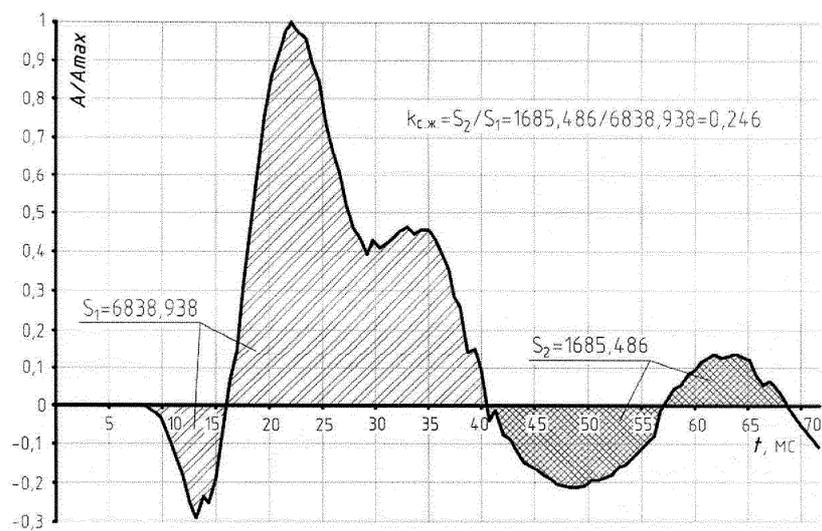
$\nu$  - время максимального выгиба строительной конструкции, с.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3