

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **21416**

(13) **С1**

(46) **2017.10.30**

(51) МПК

**G 01N 33/38** (2006.01)

**G 01N 3/30** (2006.01)

**G 01N 3/48** (2006.01)

(54) **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА  
В БЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕТОДОМ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

(21) Номер заявки: а 20131273

(22) 2013.10.30

(43) 2015.06.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Автор: Снежков Дмитрий Юрьевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) ВУ 16469 С1, 2012.

ВУ 15935 С1, 2012.

ВУ 11103 С1, 2008.

RU 2339945 С2, 2008.

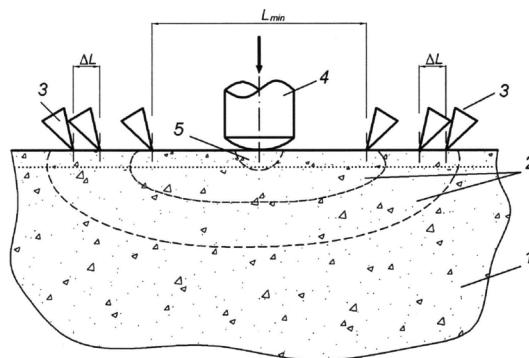
ВУ 15949 С1, 2012.

RU 2438114 С2, 2011.

(57)

Способ определения модуля упругости бетона в бетонной конструкции методом неразрушающего контроля, при котором на поверхности бетонной конструкции размечают участок контроля, в границах которого наносят удар жестким индентором с заданной кинетической энергией  $W$ , записывают диаграмму изменения текущих значений скорости индентора  $V$  от времени  $t$  в процессе удара, получают по данным диаграммы  $V = f(t)$  диаграмму зависимости контактной силы  $P$  от глубины вдавливания индентора  $\alpha$ , определяют по диаграмме  $V = f(t)$  максимальную скорость индентора  $V_0$  и скорость отскока индентора  $V_1$  по диаграмме  $P = f(\alpha)$  - максимальную контактную силу  $P_{\max}$  и остаточную глубину вдавливания  $\alpha_r$ , определяют твердость  $H$  бетона поверхностного слоя участка контроля бетонной конструкции из выражения:

$$H = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_r},$$



Фиг. 1

**ВУ 21416 С1 2017.10.30**

# ВУ 21416 С1 2017.10.30

где  $D$  - диаметр контактного наконечника индентора,

и модуль упругости  $E$  бетона поверхностного слоя участка контроля бетонной конструкции из выражения:

$$E = kH^{\frac{5}{4}} \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left( \frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала индентора,  $k \approx 1,6$ ,

далее на участке контроля устанавливают излучающий и принимающий ультразвуковые преобразователи и определяют значения времени распространения  $T$  ультразвука и расстояния  $L$  между ультразвуковыми преобразователями; сдвигают последовательно по одной линии ультразвуковые преобразователи до достижения максимального значения дифференциальной скорости  $V_{y3,d}$  распространения ультразвука в бетоне, которую определяют как отношение приращения расстояния  $\Delta L$  между излучающим и принимающим ультразвуковыми преобразователями к приращению времени распространения  $\Delta T$  ультразвука в бетоне, далее определяют модуль упругости  $E_c$  бетона бетонной конструкции из выражения:

$$E_c = 1,05 \cdot E \left( \frac{V_{y3,d,max} (L_{max} - L_{min})}{V_{y3,d,min} L_{max} - V_{y3,d,max} L_{min}} \right)^2,$$

где  $L_{min}$  - расстояние между излучающим и принимающим ультразвуковыми преобразователями, для которого зарегистрирована минимальная дифференциальная скорость ультразвука в бетоне, м;

$L_{max}$  - расстояние между излучающим и принимающим ультразвуковыми преобразователями, для которого зарегистрирована максимальная дифференциальная скорость ультразвука в бетоне, м;

$V_{y3,d,max}$  - максимальная дифференциальная скорость распространения ультразвука в бетоне,  $ms^{-1}$ ;

$V_{y3,d,min}$  - минимальная дифференциальная скорость распространения ультразвука в бетоне,  $ms^{-1}$ .

---

Изобретение относится к области строительства и может быть использовано на строительных объектах, заводах по изготовлению железобетонных изделий, а также при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений для оперативного неразрушающего определения модуля упругости тяжелого бетона в бетонных и железобетонных конструкциях и изделиях.

Известен способ определения твердости и модуля упругости бетона [1], заключающийся в том, что наносят удар жестким индентором с заданной кинетической энергией  $W$  по бетонной конструкции, записывают диаграмму изменения текущих значений скорости индентора  $V$  от времени  $t$  в процессе удара, получают по данным диаграммы  $V = f(t)$  диаграмму зависимости значений контактной силы  $P$  от глубины вдавливания индентора  $\alpha$ , определяют по диаграмме  $V = f(t)$  максимальную предупредательную скорость индентора  $V_0$  и скорость отскока индентора  $V_1$ , а по диаграмме  $P = f(\alpha)$  - максимальную контактную силу  $P_{max}$  и остаточную глубину вдавливания  $\alpha_r$ , определяют твердость бетона  $H$  и модуль упругости бетона  $E$  в соответствии с выражениями

$$H = \frac{P_{max}}{\pi D \alpha_r},$$

## ВУ 21416 С1 2017.10.30

$$E = kH^4 \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left( \frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где  $D$  - диаметр контактного наконечника индентора;

$k$  - коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала индентора,  $k \approx 1,6$ .

Недостатком данного способа являются высокая погрешность определения модуля упругости бетона в контролируемой зоне конструкции вследствие различий упруго-прочностных свойств тонкого 5...15 мм приповерхностного слоя бетона и внутренних областей бетонного массива. Указанное различие свойств бетона обусловлено, главным образом, различием условий уплотнения внешних и внутренних слоев бетонной смеси при ее укладке в форму опалубки, а также различием и нестабильностью условий тепло- и влагообмена внутренних и внешних областей твердеющего бетона конструкции при его выдерживании, из-за колебаний температуры, влажности и интенсивности движения окружающего воздуха. Оценки физико-механических свойств бетона поверхностного слоя конструкции будут искажены, соответственно, и итоговые оценки твердости и модуля упругости массива бетона контролируемой зоны конструкции приобретут дополнительную погрешность.

Задача, решаемая заявляемым способом, заключается в повышении точности и достоверности определения модуля упругости бетона железобетонных и бетонных конструкций.

Поставленная задача решается тем, что на поверхности бетонной конструкции отмечают участок контроля, в границах которого наносят удар жестким индентором с заданной кинетической энергией  $W$ , записывают диаграмму изменения текущих значений скорости индентора  $V$  от времени  $t$  в процессе удара, получают по данным диаграммы  $V = f(t)$  диаграмму зависимости контактной силы  $P$  от глубины вдавливания индентора  $\alpha$ , определяют по диаграмме  $V = f(t)$  максимальную скорость индентора  $V_0$  и скорость отскока индентора  $V_1$ , а по диаграмме  $P = f(\alpha)$  - максимальную контактную силу  $P_{\max}$  и остаточную глубину вдавливания  $\alpha_r$ , определяют твердость  $H$  бетона поверхностного слоя участка контроля бетонной конструкции из выражения:

$$H = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_r},$$

где  $D$  - диаметр контактного наконечника индентора,

и модуль упругости  $E$  бетона поверхностного слоя участка контроля бетонной конструкции из выражения

$$E = kH^4 \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left( \frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала индентора,  $k \approx 1,6$ ,

далее на участке контроля устанавливают излучающий и принимающий ультразвуковые преобразователи и определяют значения времени распространения  $T$  ультразвука и расстояния  $L$  между ультразвуковыми преобразователями; сдвигают последовательно по одной линии ультразвуковые преобразователи до достижения максимального значения дифференциальной скорости  $V_{узд}$  распространения ультразвука в бетоне, которую определяют как отношение приращения расстояния  $\Delta L$  между излучающим и принимающим ультразвуковыми преобразователями к приращению времени распространения  $\Delta T$  ультразвука в бетоне, далее определяют модуль упругости  $E_c$  бетона бетонной конструкции из выражения

$$E_c = 1,05 \cdot E \left( \frac{V_{y3,d,max} (L_{max} - L_{min})}{V_{y3,d,min} L_{max} - V_{y3,d,max} L_{min}} \right)^2,$$

где  $L_{min}$  - расстояние между излучающим и принимающим ультразвуковыми преобразователями, для которого зарегистрирована минимальная дифференциальная скорость ультразвука в бетоне, м;

$L_{max}$  - расстояние между излучающим и принимающим ультразвуковыми преобразователями, для которого зарегистрирована максимальная дифференциальная скорость ультразвука в бетоне, м;

$V_{y3,d,max}$  - максимальная дифференциальная скорость распространения ультразвука в бетоне,  $m \cdot c^{-1}$ ;

$V_{y3,d,min}$  - минимальная дифференциальная скорость распространения ультразвука в бетоне,  $m \cdot c^{-1}$ .

Сущность изобретения поясняется фигурами.

На фиг. 1 приведена схема выполнения измерений: 1 - контролируемое изделие; 2 - области бетона, участвующие в передаче ультразвука от излучающего к принимающему ультразвуковому преобразователю; 3 - излучающий и принимающий ультразвуковые преобразователи; 4 - индентор; 5 - область индентирования бетона. На фиг. 2 приведена диаграмма зависимости силы индентирования  $P$  от внедрения индентора  $\alpha$ . На фиг. 3 приведена диаграмма зависимости скорости индентора  $V$  от времени  $t$ .

Способ осуществляют следующим образом. Измерение скорости распространения ультразвука  $V_{y3}$  на размеченном участке контроля бетонной конструкции осуществляют таким образом, чтобы область бетона, участвующая в передаче ультразвука от излучающего к принимающему ультразвуковому преобразователю, включала в себя область индентирования. В процессе ультразвуковых измерений расстояние  $L$  между ультразвуковыми преобразователями увеличивают от минимального значения  $L_{min}$ , сдвигая последовательно по одной линии ультразвуковые преобразователи на расстояние  $\Delta L$ . На каждом шаге регистрируют значение дифференциальной скорости распространения ультразвука в бетоне  $V_{y3,d}$ , которую определяют как отношение приращения расстояния  $\Delta L$  между излучающим и принимающим ультразвуковыми преобразователями к приращению времени распространения  $\Delta T$  ультразвука. Из полученного ряда значений дифференциальной скорости берутся минимальное  $V_{y3,d,min}$  и максимальное  $V_{y3,d,max}$  значения, а из ряда значений расстояния между преобразователями - значения  $L_{min}$  и  $L_{max}$ , для которых зарегистрированы соответственно минимальная и максимальная дифференциальные скорости.

Рассмотрим пример реализации предлагаемого способа определения прочности бетона в конструкциях. На боковой поверхности контролируемой конструкции - монолитной балки сечением  $400 \times 250$  мм из бетона проектного класса по прочности С35/45 - производим разметку области индентирования и позиций установки ультразвуковых преобразователей участка контроля: точки установки преобразователей размечаем на прямой линии симметрично относительно области индентирования, с шагом 50 мм. В области индентирования производим удар индентором массой  $m = 0,164$  кг с кинетической энергией  $W = 1,63$  Дж. Регистрируем скорость движения индентора  $V$ . Зависимость скорости движения индентора  $V$  от времени  $t$  представлена на фиг. 2. Максимальная скорость (в момент касания поверхности бетона)  $V_0 = 4,46$   $m \cdot c^{-1}$ , скорость отскока  $V_1 = 1,85$   $m \cdot c^{-1}$ . Процессором производится обработка диаграммы  $V = f(t)$ , в результате получаем диаграмму зависимости контактной силы от глубины вдавливания индентора  $P = f(\alpha)$ , представленную на фиг. 3, из которой определяем значения максимальной силы  $P_{max} = 9,32$  кН и остаточной глубины вдавливания индентора  $\alpha_r = 328$  мкм. Вычисляем значения твердости  $H$

# ВУ 21416 С1 2017.10.30

$$H = \frac{P_{\max}}{\pi D \alpha_r} = \frac{9320}{3,1416 \cdot 0,029 \cdot 328 \cdot 10^{-6}} = 311,9 \text{ МПа}$$

и модуля упругости E

$$E = kH^{\frac{5}{4}} \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^2 \left( \frac{D^3}{W} \right)^{\frac{1}{4}} = 1,6 \cdot (311,9 \cdot 10^6)^{\frac{5}{4}} \left( \frac{4,46}{1,85} \right)^2 \left( \frac{0,029^3}{1,63} \right)^{\frac{1}{4}} = 24,1 \text{ ГПа}.$$

Определяем значения времени распространения ультразвука, одновременно меняя позиции установки излучающего и приемного преобразователей с шагом 5 см таким образом, что приращение базы измерения составило  $\Delta L = 0,1$  м. В таблице приведены значения времени распространения ультразвука T и расчетные значения скорости  $V_{y3}$  и  $V_{y3,d}$ .

База L, м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Время T, мкс	24,2	47,7	70,9	94,3	118,0
$\Delta L$ , м	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$\Delta T$ , мкс	24,2	23,5	23,0	23,4	23,7
$V_{y3}$ , м·с <sup>-1</sup>	4132	4197	4244	4253	4237
$V_{y3,d}$ м·с <sup>-1</sup>	4132	4263	4341	4280	4212

Минимальное значение дифференциальной скорости распространения ультразвука составило  $V_{y3,d,\min} = 4132 \text{ м·с}^{-1}$  для  $L_{\min} = 0,1$  м; максимальное значение дифференциальной скорости распространения ультразвука составило  $V_{y3,d,\max} = 4341 \text{ м·с}^{-1}$  для  $L_{\max} = 0,3$  м.

Определяем модуль упругости бетона  $E_c$  в бетонной конструкции

$$E_c = 1,05 \cdot E \left( \frac{V_{y3,d,\max} (L_{\max} - L_{\min})}{V_{y3,d,\min} L_{\max} - V_{y3,d,\max} L_{\min}} \right)^2 = 1,05 \cdot 24,1 \cdot \left( \frac{868,2}{805} \right)^{\sqrt{2}} = 29,4 \text{ ГПа}.$$

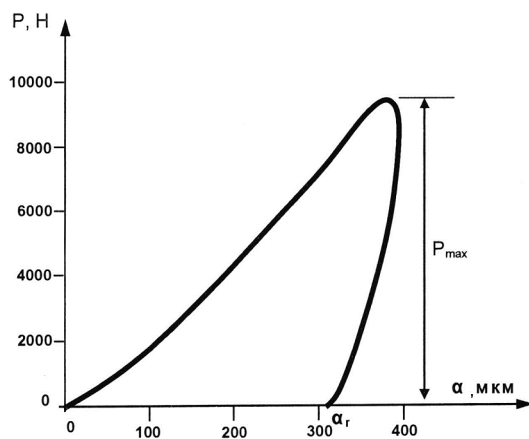
Испытание бетона в зоне контроля экспертным методом - прессовыми испытаниями образцов-кернов - дало следующее среднее значение модуля упругости:  $E_c^* = 28,5 \text{ ГПа}$ .

По отношению к оценке модуля упругости, полученной испытаниями кернов, относительная погрешность определения модуля упругости предлагаемым методом составила -  $\delta E_c = (29,4 - 28,5) / 28,5 = 0,032$  (3,2 %). Относительная погрешность для альтернативного метода составила -  $\delta E = (28,5 - 24,1) / 28,5 = 0,154$  (15,4 %).

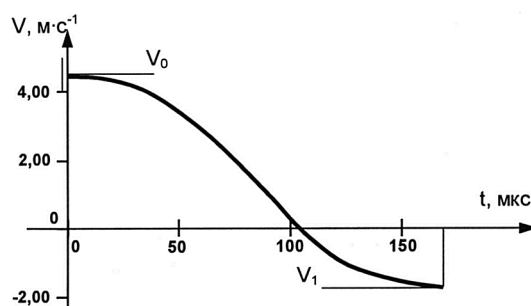
Положительный эффект данного способа достигается за счет того, что оценка модуля упругости бетона осуществляются с учетом различий упруго-прочностных свойств поверхностного слоя бетона и его внутренних областей.

Источники информации:

1. Патент ВУ 16469, МПК G 01N 33/38, 3/30, 3/48, 2012.



Фиг. 2



Фиг. 3