

# Технология и организация строительного производства

УДК 624.152.5 + 624.131

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГИИ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА, СКВАЖИНООБРАЗОВАТЕЛЯ И ГРУНТА В СИСТЕМЕ ВЗРЫВОФУГАСНОГО ГРУНТОВЫТЕСНЕНИЯ СКВАЖИН В ОСНОВАНИЯХ НАБИВНЫХ СВАЙ

*Л.М. Борозенец*

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований по изучению взаимодействия энергии продуктов взрыва, скважинообразователя и грунта в процессе взрывофугасного грунтовытеснения скважин в основаниях набивных свай.

*Ключевые слова:* энергия, взрыв, скважинообразователь, корпус, фугасник, грунт, взрывофугасное вытеснение, скважина, основание, свая, взаимодействие, статика, динамика, кинематика, система.

### Введение

Раскрытие сущности механического взаимодействия элементов системы «машина-грунт» в рабочем процессе даёт возможность выбора правильного подхода к проектированию взрывофугасного грунтовытесняющих скважинообразователей. С этой целью система, состоящая из корпуса, фугасника и грунта, анализируется с позиций статике, динамики и кинематики [1, 2]. Применительно к настоящей работе:

- в статике определяются активные силы, связи между материальными точками, реакции связей или пассивные силы и равновесие системы;
- в динамике рассматриваются прямолинейное движение материальных точек и силы в качестве причины поступательного движения;
- в кинематике исследуются законы прямолинейного поступательного движения материальных точек без отражения причин движения, при этом искомыми величинами являются путь, скорость и ускорение.

### Статика корпуса, фугасника и грунта

В работе применяется взрывофугасный грунтовытесняющий скважинообразователь СВГ-216/840. Его принципиальная материальная схема изображается на рис. 1, а. На схеме в качестве материальных тел представлены фугасник 1, корпус 2 и грунт 3. Тела условно принимаются за материальные точки с сосредоточенными массами, соответственно,  $m_1$ ,  $m_2$ , к этим массам приложены активные силы тяжести  $P_1$  и  $P_2$ , направленные вертикально вниз. При установке машины-скважинообразователя в исходное положение на дневной поверхности грунта 3 посредством связи наконечника, опирающегося на грунт, в грунте

генерируется реакция связи, или пассивная сила  $N$  направленная вертикально вверх. При грунтовытеснении скважины 4 связь между машиной и грунтом осуществляется через наконечник камуфлетника 5, газы взрыва 6 и головную часть оживальной формы фугасника 1. Схема сил, действующих в статике, представлена на рис. 1, б.

Условие статического равновесия системы взаимодействующих материальных точек

$$N \leq R_c, \quad (1)$$

где  $N$  – реакция грунта на силу тяжести машины;  $R_c$  – предельное статическое сопротивление грунта вдавливанию засилению фугасника.

Реакция грунта на силу тяжести машины

$$N = P_1 + P_2. \quad (2)$$

При воздействии силы импульса взрыва  $F$  в камере взрывания условия статического состояния рассматриваются отдельно для корпуса и фугасника с грунтом. Статическое состояние корпуса сохраняется до момента достижения силой импульса взрыва значения силы тяжести корпуса, что описывается равенством:

$$F_i = P_2, \quad (3)$$

где  $F_i$  – значение возрастающего давления импульса силы взрыва в камере взрывания.

Состояние покоя фугасника с грунтом определяется зависимостью:

$$F_i + P_1 + P_2 = R_c. \quad (4)$$

Таким образом, активные силы, связи, реакции и условия равновесного состояния системы материальных точек машины и грунта определены.

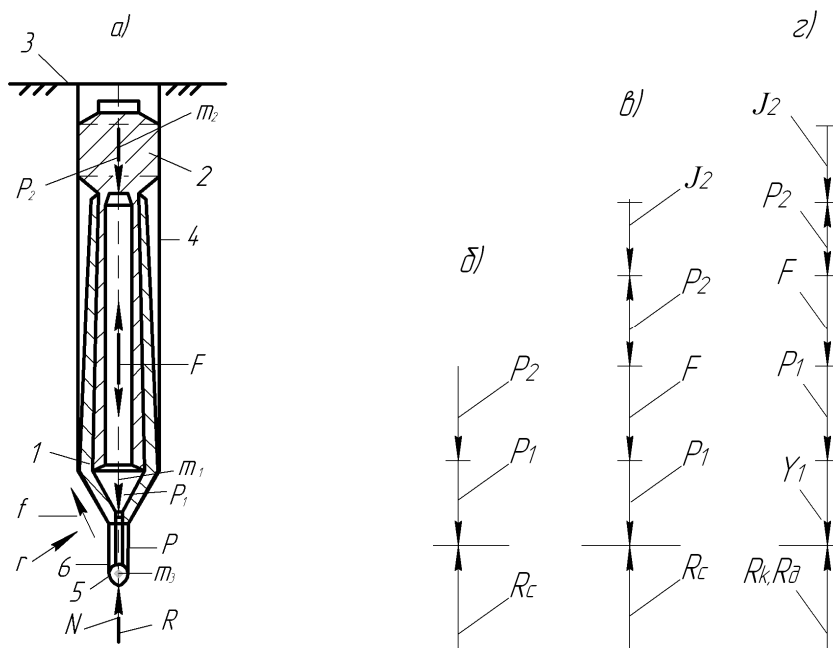


Рис. 1. Схемы: а – принципиальная материальная грунтовытесняющей машины; б, в, г – силовые, соответственно, в статике, динамике корпуса, кинематике машины и грунта

**Динамика системы скважинообразователя и грунта**

В процессе приложения импульса силы взрыва  $F$  в камере взрывания статическое состояние корпуса сохраняется до момента достижения силой значения, равного силе  $P_2$ . В следующий граничный момент времени действия силы  $F_i$  корпус переходит в движение. В соответствии с началом Д'Аламбера в каждый момент времени силы, приложенные к материальной точке, уравниваются силами инерции. В этой системе проявляется сила инерции корпуса  $J_2$ . Это кажущаяся сила, возникающая как следствие ускорения. Причиной ускорения являются активные силы. Во взаимодействии силы инерции и активные силы обеспечивают динамическое равновесие. Динамическая схема сил, действующих на корпус, изображается на рис. 1, в. Взаимодействие сил описывается следующим уравнением:

$$P_1 + P_2 + J_2 - F + F - R_c = 0. \tag{5}$$

Фугасник, опирающийся на грунт, сохраняет статическое состояние до момента достижения нагрузки, равной сопротивлению грунта  $R_c$ . При соблюдении условия

$$P_1 + P_2 + J_1 > R_c \tag{6}$$

фугасник с присоединённым грунтом переходит в движение. В это время возникают силы инерции фугасника  $J_1$  и грунта  $J_3$ . Грунт приобретает квазистатическое сопротивление  $R_k$ , которое перерастает до предела условного динамического по мере роста силы импульса взрыва  $F$ . Квазистатическое сопротивление грунта обеспечивается трением  $f$  и распорным давлением  $R$  по боковой по-

верхности наконечника камуфлетника и головной части оживальной формы фугасника, реактивным давлением газов взрыва  $P$ , истекающих в грунт, и силы инерции массы грунта  $J_3$ , перемещаемого при физическом заселении фугасника в него, моделируемого сосредоточенной массой  $m_3$ , присоединённой к острию фугасника. Квазистатическое сопротивление грунта взрывофугасному заселению фугасника является пассивной силой и выражается равенством:

$$R_k = F_0 (f + r + P) + J_3, \tag{7}$$

где  $F_0$  – рабочая площадь боковой поверхности наконечника камуфлетника и головной части оживальной формы фугасника. Квазистатическая и динамическая схемы сил, действующих на машину и на грунт, изображаются на рис. 1, г. Их взаимодействия выражаются следующими равенствами:

– квазистатического сопротивления

$$P_1 + P_2 + J_2 + F - F - J_1 - R_k = 0; \tag{8}$$

– динамического сопротивления

$$P_1 + P_2 + J_2 + F - F - J_1 - R_d = 0. \tag{9}$$

Силы инерции направлены в сторону, противоположную ускорению тела, и определяются по формуле:

$$J = ma, \tag{10}$$

где  $m$  – масса тела;  $a$  – ускорение движения тела.

Рассматривается график изменения удельного квазистатического давления газов взрыва в камере. Из этого графика выделяется та часть давления, от которого совершается рабочий ход фугасника и газов взрыва. Это давление ограничивается значениями  $f_{и}, f_{10}$  и  $f_k$ . Выделенное давление изображается линейным графиком зависимости на рис. 2.

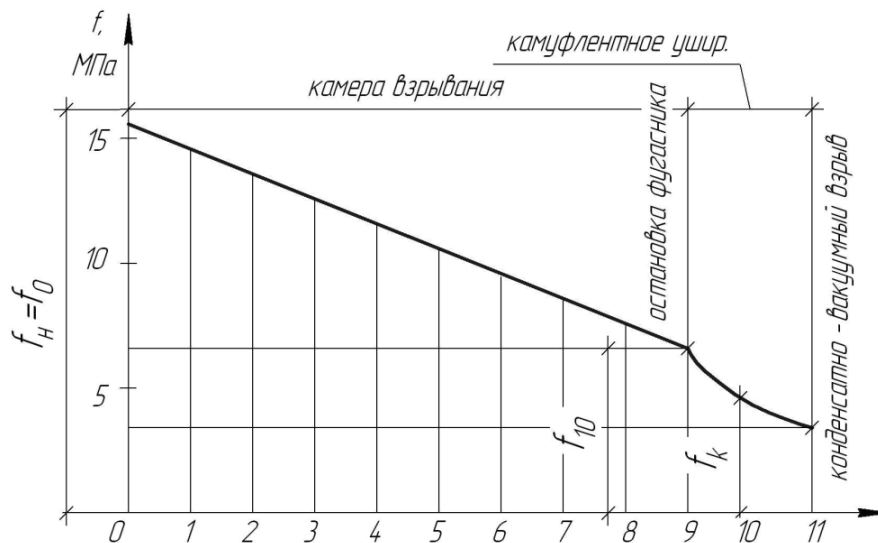


Рис. 2. График изменения удельного давления в процессе рабочего хода фугасника и газов взрыва в камуфлетной полости

Глубина засиления фугасника в грунт по оси абсцисс в пределах давлений  $f_n$  и  $f_{10}$  разбивается на промежутки. По графику в точках разбивки берутся удельные давления  $f_i$ . В точке 10 фугасник останавливается при равенстве импульса взрыва в камере и в камуфлетной полости. Равенство имеет следующий вид:

$$f_{10}S_{р.п} = f_k S_{ф}, \quad (11)$$

где  $S_{р.п}$  – площадь поперечного сечения рабочей полости фугасника;  $S_{ф}$  – площадь рабочего сечения фугасника (формователя скважины).

Мгновенные значения импульса силы газов взрыва

$$F_i = f_i S_{п.ф}, \quad (12)$$

где  $S_{п.ф}$  – площадь поперечного сечения рабочей полости фугасника.

Мгновенные значения силы инерции для фугасника и корпуса, соответственно,

$$J_i = F_i + p_1 + R_d; \quad (13)$$

$$J_i = F_i - p_2. \quad (14)$$

Следует рассмотреть перемещение корпуса под действием импульса силы взрыва вверх или его отдачу. С отдачей связана непроизводительная потеря проектного продольного хода фугасника при физическом засилении его в грунт. Чтобы сообщить телу ускорение и обеспечить его движение с определённой скоростью, необходимо совершить работу. Сила, производящая работу с фугасником и с корпусом, соответственно

$$F_1 = F \frac{m_2}{m_1}; \quad (15)$$

$$F_2 = F \frac{m_1}{m_2}. \quad (16)$$

Уравнение динамического равновесия

$$P_2 - F_2 + J_2 + F_1 - J_1 + P_1 - R_d = 0. \quad (17)$$

В случае состояния покоя корпуса сила инерции  $J_2 = 0$ , а уравнение (17) преобразуется в следующий вид:

$$P_2 = F_2 + R_d - P_1 = 0. \quad (18)$$

Равенство (18) является условием сохранения состояния покоя корпуса в системе, на основании которого делается заключение о том, что сила тяжести корпуса должна быть равна или больше действующей на корпус силы взрыва, пропорциональной массе фугасника, и силы динамического сопротивления грунта засилению фугасника, за вычетом силы тяжести фугасника.

#### Кинематика фугасника и корпуса в грунте

Кинематика машины и грунта рассматривается на примере движения фугасника, которое является прямолинейным: в начале пути неравномерно ускоренным, а затем неравномерно замедленным. Соблюдение условия отсутствия отдачи корпуса обуславливает его применение материалоемким и громоздким, что во многом при эксплуатации является нежелательным. Следовательно, с целью уменьшения массы корпуса имеется необходимость допущения оптимального значения отдачи корпуса.

Мгновенные ускорения прямолинейного движения фугасника выражаются из уравнений (10) и (14) соотношением:

$$a_i = \frac{F_i + P_i - R_d}{m_1}. \quad (19)$$

Средние ускорения

$$a_n = 0,5(a_i + a_{i+1}), \quad (20)$$

где  $a_i$  – мгновенное ускорение в данной точке;

$a_{i+1}$  – мгновенное ускорение в последующей смежной точке данного промежутка пути.

Время движения по каждому отрезку пути

$$t_n = \left( \frac{2S_n}{a_n} \right)^{0,5} \quad (21)$$

Приращение скорости по каждому участку пути

$$\Delta V_n = a_n t_n \quad (22)$$

Скорость движения по отрезкам пути рассчитывается как слева, так и справа

$$V_n = V_{n-1} + a_n t_n \quad (23)$$

Время движения по интервалам пути

$$t_n = \frac{2S_n}{V_n} \quad (24)$$

По полученным значениям скорости и времени движения строится график их зависимости, который представляется на рис. 3. По графику определяется область экстремума, т. е. момента перехода фугасника с ускоренного движения на замедленное. Путь, пройденный фугасником:

$$S_n = 0,5(V_{n-1} + V_n) t_n \quad (25)$$

Поскольку на фугасник действует переменная сила газов взрыва, то общий закон движения можно найти путём решения задач математической физики. Частные решения при конкретных начальных условиях получаются с помощью численных методов. Среднее ускорение в течение некоторого промежуточного времени

$$a_n = \frac{V_n - V_{n-1}}{\Delta t} \quad (26)$$

При условии, что среднее ускорение мало отличается от мгновенного в конечный момент времени  $t = t_n$ , значение средней скорости

$$V_n = V_{n-1} + a_n \Delta t \quad (27)$$

Средняя скорость движения за данный промежуток времени численно равняется отношению перемещения к промежутку времени

$$V_n = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_n - S_{n-1}}{\Delta t} \quad (28)$$

Из уравнения (28) перемещение

$$S = S_{n-1} + V_n \Delta t \quad (29)$$

Равенство (29) является законом движения фугасника. Строится экспериментальный график зависимости «время–путь»  $S = f(t)$ . График изображается на рис. 4. Путь прохождения фугасника определяется по формуле (25).

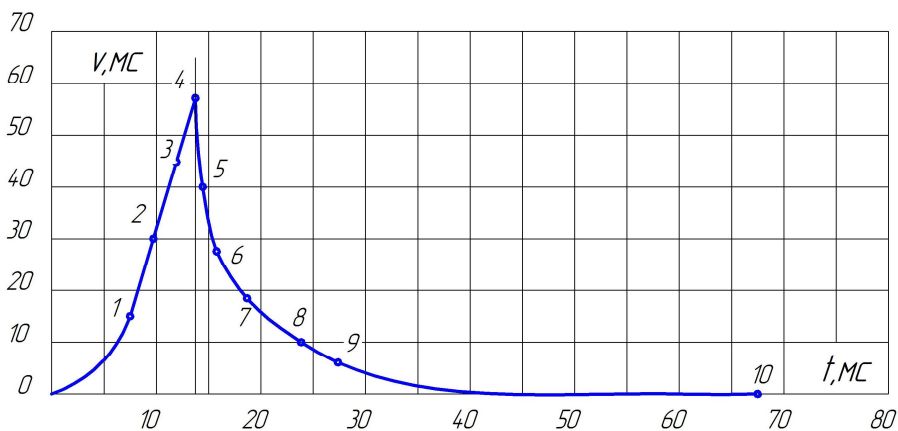


Рис. 3. График зависимости «время–скорость» движения фугасника в грунте

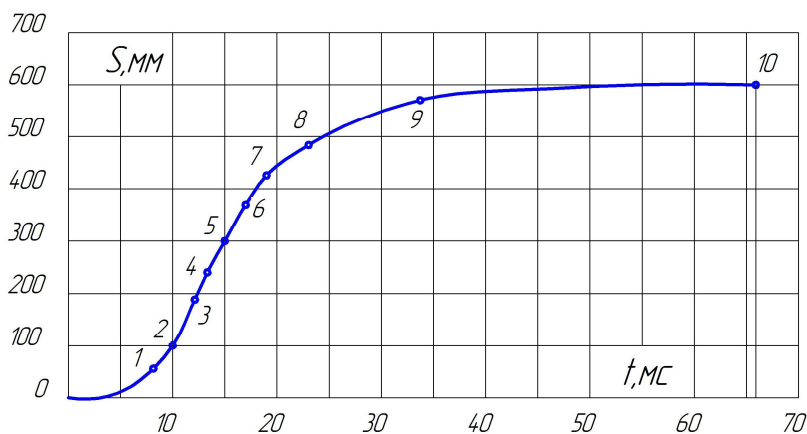


Рис. 4. График зависимости «время–путь» движения фугасника в грунте

Движение корпуса рассчитывается по методике определения движения фугасника с некоторыми дополнениями. Дополнения обусловлены продолжением движения корпуса после точки 10 при расширении камуфлетной полости до точки 11, в которой происходит конденсатно-вакуумный взрыв. По результатам примера расчета на рис. 5 построен график зависимости «время–скорость», на рис. 6 – расчётный и экспериментальный графики зависимости «время–путь» движения корпуса.

Анализ графиков «время–путь» движения корпуса показывает следующее:

- до достижения силой импульса взрыва в интервале точек 8–9 значения, равного динамическому сопротивлению грунта, отдача корпуса составляет 25 мм; при конденсатно-вакуумном взрыве в точке 11 – 153 мм;

- включение грунтовых анкеров в работу останавливает движение корпуса, при этом сила сопротивления анкеров превосходит силу сопротивления взрывофугасному вытеснению грунта;

- если оснастить взрывную камеру выпускными окнами газов взрыва и снижать давление выпуском газов до атмосферного при рабочем ходе в интервале точек 8–9, равном 510 мм, то потеряется 90 мм пройденного фугасником пути, однако при этом отдача корпуса составит всего 20–30 мм, а масса корпуса может быть уменьшена до 30 % по сравнению с расчётной при нулевой отдаче корпуса.

### Выводы

1. Впервые теоретически, экспериментально и практически проанализирована система взрывофугасного скважинообразователя, состоящая из корпуса, фугасника и грунта с позиций статики, динамики и кинематики.

2. Статическое состояние корпуса сохраняется до момента достижения силой импульса взрыва значения силы его тяжести, а фугасника – с момента достижения силой импульса взрыва величины силы сопротивления грунта его внедрению.

3. Сила тяжести корпуса должна быть равной или больше действующей на корпус силы взрыва,

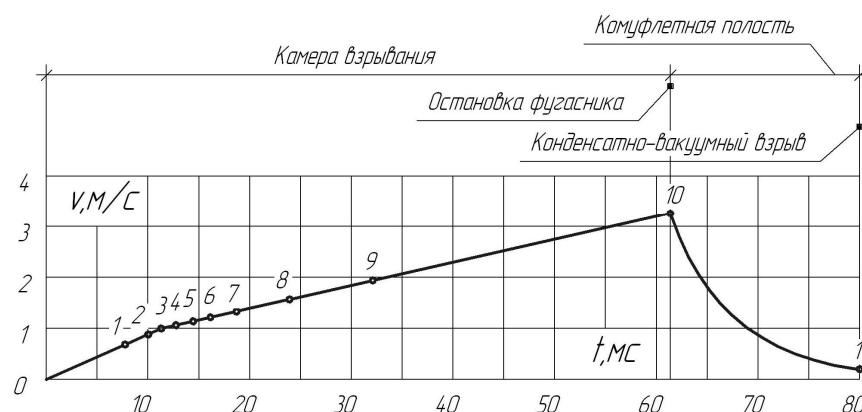


Рис. 5. График зависимости «время–скорость» движения корпуса

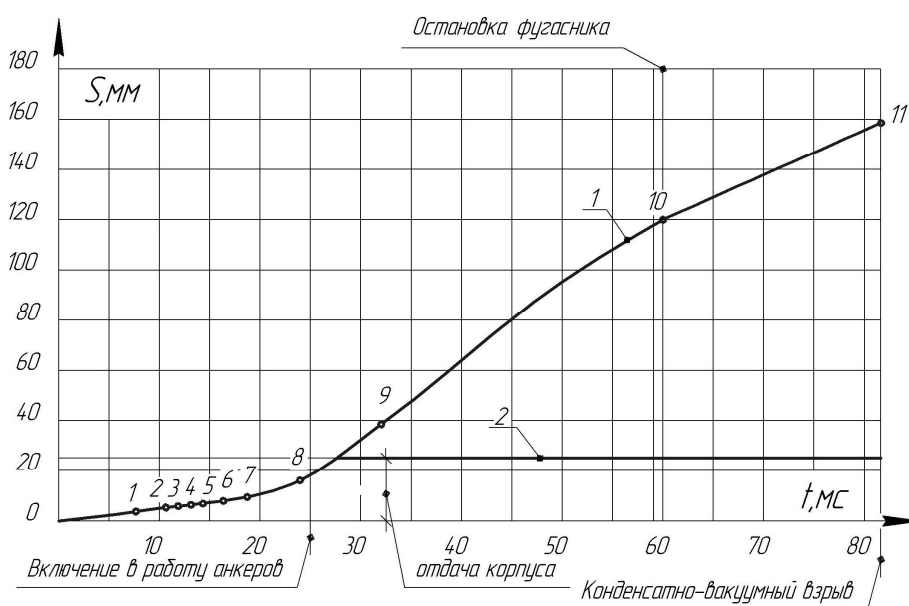


Рис. 6. Графики зависимости «время–путь» движения корпуса:  
1 – расчётный; 2 – экспериментальный

пропорциональной массе фугасника и силы динамического сопротивления грунта засилению фугасника, за вычетом силы тяжести фугасника.

4. При уменьшении силы тяжести корпуса по отношению к равнодействующему значению силы импульса взрыва пропорционально увеличивается величина отдачи корпуса, на значение которой уменьшается производительный ход фугасника, однако при этом масса корпуса может быть уменьшена до 30 % по сравнению с расчетной при нулевой отдаче корпуса, что значительно снижает металлоемкость и громоздкость корпуса.

#### Литература

1. Борозенец, Л.М. Основы расчёта силовой системы импульсной проходки скважин в грунтах / Л.М. Борозенец // Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений: материалы 5 Всесоюзной конференции. Т. 1. – Ташкент; М.: ВНИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1981. – С. 177–179.

2. Борозенец, Л.М. Повышение несущей способности оснований набивных свай взрывофугасным вытеснением грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.М. Борозенец. – Пермь: ПГТУ, 1994. – 25 с.

**Борозенец Леонид Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Архитектурно-строительного института, Тольяттинский государственный университет, tsp@tltsu.ru

Поступила в редакцию 28 января 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Construction Engineering and Architecture"  
2014, vol. 14, no. 4, pp. 34–39**

## THE INTERACTION OF ENERGY OF EXPLOSIVE PRODUCTS, HOLE-FORMATION AND SUBSOIL IN THE SYSTEM OF HIGH-EXPLOSIVE DISPLAYED SOIL OF HOLES IN THE BASEMENTS OF CAST-IN-PLACE PILES

*L.M. Borozenets, Architecture and Construction Institute, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, tsp@tltsu.ru*

**This article presents the results of the experimental and theoretical analysis of the interaction of energy of explosive products, hole-formation and subsoil in the system of high-explosive displayed soil of holes in the basements of cast-in-place piles.**

*Keywords: energy, explosion, high-explosive shell, subsoil, high-explosive displacement, hole, basement, pile, interaction, statics, dynamics, kinematics, system.*

#### References

1. Borozenets L.M. [Bases of calculation power system pulse sinking wells in the soils]. *Dinamika osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy: mat. 5 Vsesoyuznoy konferentsii* [Dynamics of bases and foundations and underground structures: Mat. the 5th all-Union conference]. Moscow, VNIIOСП im. N.M. Gersevanova Publ., 1981, vol.1, pp. 177–179 (in Russ).

2. Borozenets L.M. *Povyshenie nesushchey sposobnosti osnovaniy nabivnykh svay vzryvoфugasnym vytesneniem gruntov*. Avtoref. kand. diss. [Increasing the carrying capacity of grounds of piles vzryvoopasnym displacement of soils. Abstract of cand. diss.]. Perm, PGТУ Publ., 1994. 25 p.

Received 28 January 2014