

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ  
СПОСОБНОСТИ ПО ГРУНТУ СВАЙ В СОСТАВЕ  
ФУНДАМЕНТА НОВОГО БЕЗОПАСНОГО  
КОНФАЙНМЕНТА НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ  
И ВЕРТИКАЛЬНУЮ НАГРУЗКИ**

Бамбура А.Н., Ковальский Р.К., Сазонова И.Р.  
ГП «Научно-исследовательский институт строительных конструкций»

Шамис Л. Б., Матченко Т. И., Фоменко А.Л.  
ПАО «Киевский научно-исследовательский и проектно-  
конструкторский институт «Энергопроект»  
г. Киев, Украина

Говоров В.А., Саллюм А.  
ГСП «Чернобыльская атомная электростанция»  
г. Славутич, Украина

**АННОТАЦИЯ:** Изложена методика моделирования свайного фундамента и определения несущей способности сваи на горизонтальную и вертикальную нагрузки на основе результатов испытаний свай.

**АНОТАЦІЯ:** Викладено методику моделювання фундаменту на палях та визначення несучої здатності паль при дії горизонтального та вертикального навантаження на основі результатів випробувань паль.

**ABSTRACT:** The method of modeling of the pile foundation and determination of pile resistance capacity when horizontal and vertical loads on the grounds of the piles test results is considered in paper.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** свайный фундамент, несущая способность, взаимодействие с основанием, групповой эффект.

## ВВЕДЕНИЕ

Новый Безопасный Конфайнмент (НБК) конструктивно решен в виде стальной арки (рис. 1). На опорах арки возникают вертикальная и горизонтальная реакции, которые передаются на свайные фундаменты из буронагнеточных свай с жесткой заделкой в ростверк. В проекте НБК исследованы четырёхрядные и трёхрядные свайные фундаменты (рис. 2).



Рис. 1. Арка НБК с затяжками для восприятия распора в процессе строительства

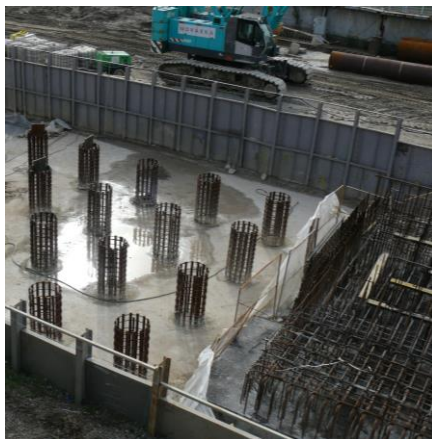


Рис. 2. Свайные фундаменты до устройства ростверка

Моделирование и расчет такого фундамента требует учета особенностей работы группы свай на горизонтальную и вертикальную нагрузки. А именно, жесткости основания и несущей способности сваи по грунту в составе фундамента. Указанные характеристики определены на основании испытаний двух свай, объединенных ростверком, для горизонтального воздействия и одиночной сваи для вертикального воздействия. Необходимость испытаний обусловлена тем, что особенности применяемых буроналивных свай большого диаметра оказывают значительное влияние на несущую способность свай по грунту, а в нормативных документах Украины отсутствуют рекомендации учета таких особенностей при выполнении расчетных обоснований.

### ОПИСАНИЕ ИСПЫТАНИЯ ОДИНОЧНОЙ СВАИ НА ВДАВЛИВАНИЕ

Нагрузка для испытаний буроналивной сваи определена по формуле:

$$N = N_{\max} \cdot \gamma_k,$$

где  $\gamma_k=1,2$  – коэффициент надежности согласно ДБН [1];  $N_{\max}$  - максимальная реакция в сваях фундамента Арки, полученная аналитически.

Для южной зоны  $N=5036$  кН, для северной зоны  $N=4338$  кН. Полученные значения превышают несущую способность буроналивной сваи по грунту  $F_d = 4039$  кН, которая определена согласно рекомендациям ДБН [1].



Рис. 3: Натуральный вид установки для испытания сваи вдавливанием

На рис. 3 показана установка для испытания сваи вдавливанием. Тестовая свая расположена посередине. Испытания вдавливанием продолжались до тех пор, пока не было выполнено одно из условий: нагрузка превысила 5036 кН или перемещения превысили 40 мм. Результаты одного испытания - график сила - перемещение приведены на рис. 4.

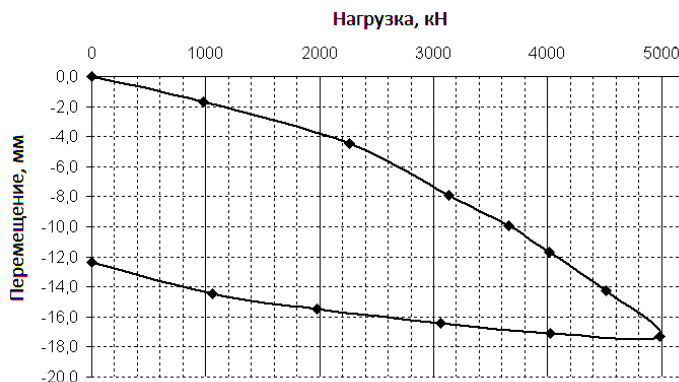


Рис. 4. График сила-перемещение, полученный в результате испытаний свай на вдавливание

В результате испытаний серии свай принято значение несущей способности сваи по грунту в составе фундамента с учетом  $\gamma_k=1,2$  равным 4160 кН.

### ОПИСАНИЕ ИСПЫТАНИЯ СВАЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ НАГРУЗКУ

Несущая способность сваи фундамента НБК на горизонтальную нагрузку  $F_{df}$  по результатам испытаний принята равной горизонтальной силе, вызывающей смещение оголовка сваи 40 мм.

На площадке НБК ЧАЭС была проведена серия испытаний на горизонтальную нагрузку рамных конструкций из двух свай, заделанных в ростverk. Схема испытания показана на рис. 5. В результате испытаний получена диаграмма сила-перемещение, пример которой приведен на рис. 6.

При смещении оголовка сваи 40 мм получено значение нагрузки  $H = 2500$  кН. Несущая способность одной сваи на горизонтальную нагрузку с учетом группового эффекта работы двух свай  $\kappa_{гр} = 1,54$  составит  $F_{df} = H/\kappa_{гр} = 1620$  кН.

Предельная горизонтальная нагрузка на сваю в составе фундамента с учетом  $\gamma_k = 1,2$  равна  $N_{пр} = 1350$  кН.

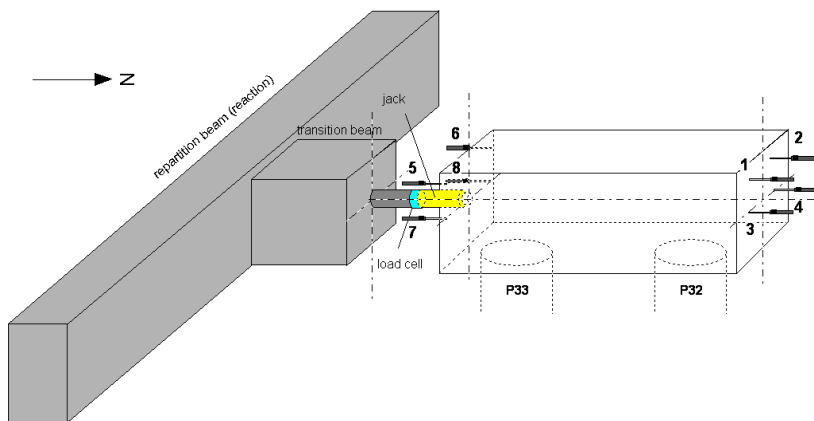


Рис. 5. Схема испытания двух свай, спаренных ростверком, на горизонтальную нагрузку

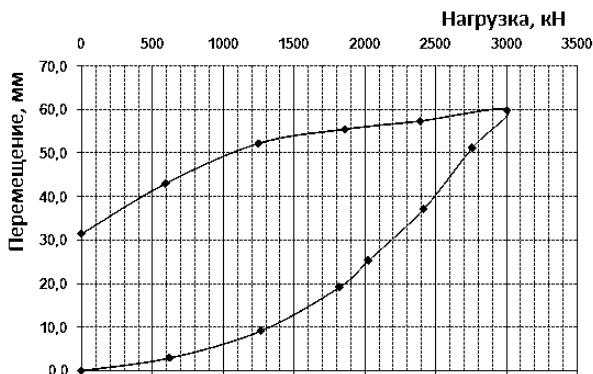


Рис. 6. График N-u, полученный в результате испытаний свай на горизонтальную нагрузку

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА, ОКРУЖАЮЩЕГО СВАИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

В расчетной модели свайного фундамента Арки НБК грунт моделировался на контактной поверхности сваи и грунта с применением на боковых поверхностях свай горизонтальных упругих КЭ связей.

Значения жесткостей связей назначены с учетом условия ограничения давления на грунт боковыми поверхностями свай величиной, равной правой части формулы 35 Приложения 1 [2], которая выражает предельное давление  $\sigma_z$  сохранения устойчивости основания.

$$\sigma_z \leq \eta_1 \eta_2 \frac{4}{\cos \varphi_1} (\gamma_1 z \operatorname{tg} \varphi_1 + \xi c_1), \quad (1)$$

где  $\sigma_z$  - расчетное давление на грунт боковой поверхности сваи;

$\gamma_1$  - расчетный удельный (объемный) вес грунта ненарушенной структуры, определяемый в водонасыщенных грунтах с учетом взвешивания в воде;

$\varphi_1, c_1$  - расчетные значения соответственно угла внутреннего трения грунта, град, и удельного сцепления грунта, принимаемые при уровне доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ ;  $\eta_1, \eta_2, \xi = 0,3$  - коэффициенты.

В соответствии с пунктом Н.8.1. ДБН [1] расчетные значения коэффициента постели  $c_z$  грунта на боковой поверхности сваи допускается определять по формуле

$$C_z = \frac{K_{np} \cdot z}{\gamma_c}, \quad (2)$$

где  $K_{np}$  - коэффициент пропорциональности,  $\text{кН/м}^4$  ( $\text{тс/м}^4$ ), принимаемый в зависимости от вида грунта, окружающего сваю, по таблице Н.8.1;

$z$  - глубина расположения сечения сваи в грунте, м, для которой определяется коэффициент постели, по отношению к поверхности грунта при высоком ростверке или к подошве ростверка при низком ростверке;

$\gamma_c$  - коэффициент условий работы принимает значение 3, если грунт рассматривается как упруго линейно-деформируемая среда.

Предварительные расчеты с учетом жесткостей КЭ связей, рассчитанных по формуле 2, показали завышенный консерватизм аналитических перемещений в сравнении с испытаниями. Для приближения значений перемещений при испытании и аналитических расчетах была выполнена корректировка произведения  $\eta_1 \cdot \eta_2$  по результатам испытания свай.

Определение  $\eta_1 \cdot \eta_2$  производится сопоставлением графиков зависимости нагрузка-перемещение Н-и, полученных в результате испытания и

аналитически при различных значениях  $\eta_1 \cdot \eta_2$ . Рассмотрены варианты  $\eta_1 \cdot \eta_2 = 1; 0,8; 0,6$ .

Для построения аналитических графиков Н-и разработана расчетная модель, приведенная на рис. 7.

Рассматривается плоская задача, свайный ростверк моделируется КЭ типа оболочка, толщиной 1,5 м, сваи моделируются стержнями круглым сечением  $D=1$  м, грунт моделируется КЭ связями. Жесткость связей  $G = C_z \cdot b_p \cdot a$ , где  $b_p = 2$  м – условная ширина сваи,  $a = 0,5$  м – длина участка,  $C_z$  определяем по формуле (2).

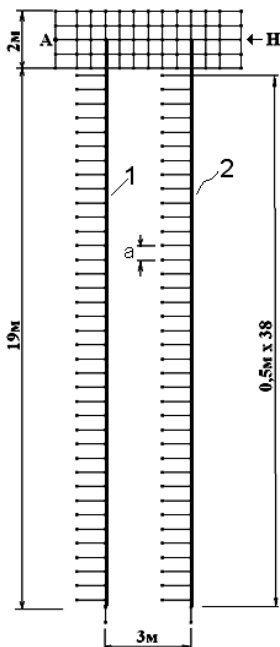


Рис. 7. Расчетная схема

В модели учитывается групповой эффект понижением жесткостей связей на свае 2. Коэффициент понижения вычислен по формуле 28 Приложения 1 [2] и для сваи 2, расположенной от сваи 1 на расстоянии 3 м, составляет 0,54. График Н-и строится по шести точкам нагружения  $H_1=500$  кН -  $H_6=3000$  кН. Перемещение  $u$  определяется в точке А. При этом жесткости горизонтальных связей определяются из условия ограничения

давления на грунт правой частью формулы (1). При напряжении в грунте выше правой части формулы (1) в итерационном процессе выполнена корректировка жесткости КЭ на каждой расчетной глубине.

$$G_{i+1} = G_i \cdot ([\sigma]_i / \sigma_i), \quad (3)$$

где  $G_{i+1}$  – откорректированная жесткость после  $i$ -той итерации;

$G_i$  – жесткость при  $i$ -той итерации;

$[\sigma]$  – допустимое давление на грунт (равно правой части формулы 35 Приложения 1 [2];

$\sigma_i$  - принятое давление при  $i$ -той итерации по результатам расчета.

Произведение  $\eta_1 \cdot \eta_2$  принимается характерным аналитическому графику, который наиболее приближен к графику испытаний. Пример приведен на рис. 8.

В расчетной модели жесткости горизонтальных связей на сваях вычисляются с учетом характерного  $\eta_1 \cdot \eta_2$ . Диапазон нагрузок  $H$  на сваи фундамента НБК разбивается на участки (например, 3 участка). В каждом участке находим среднее значение  $H$ , для которого определяется  $\eta_1 \cdot \eta_2$ . Для расчетного  $H_i$  находим  $u_i \geq u_{test}$ . По  $u_i$  определяем соответствующий график и принимаем значение  $\eta_1 \cdot \eta_2$ . Значение  $\eta_1 \cdot \eta_2$  ограничивается 1.

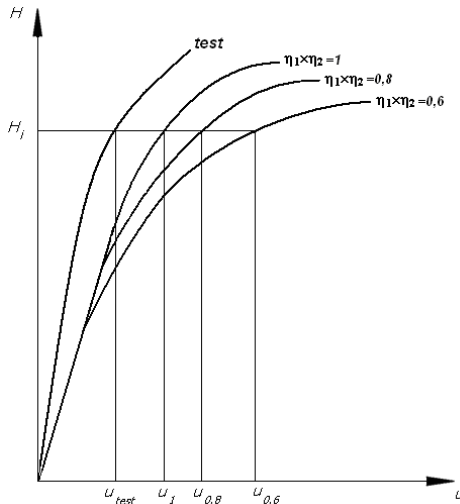


Рис. 8. Графики аналитические и испытаний



Результаты сравнения перемещений т. А, полученных аналитически и при испытании, приведены на рис. 9.

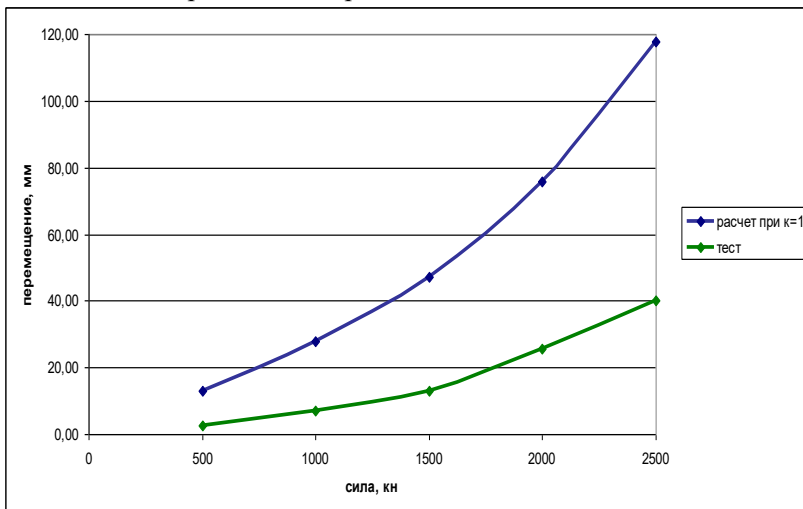


Рис. 9. Перемещения, полученные аналитически и при испытании группы свай

В расчетной модели фундамента НБК жесткости горизонтальных связей всех свай вычислены с учетом  $\eta_1 \cdot \eta_2 = 1$ . Вычисления выполняются в итерационном процессе по условию ограничения давления на грунт по формуле (3) по следующему алгоритму.

1. Расчет жесткости связей по формуле:

$$K_{i+1,m} = K_{i,m} \times ([\sigma]_m / \sigma_{i,m}),$$

где индексы обозначают:  $i$  – номер свай,  $k$  – номер итерации,  $m$  – номер связи (слоя грунта);

$\sigma$  и  $[\sigma]$  – давление на грунт по результатам расчетов и допустимое давление на грунт боковой поверхностью свай, определенное по формуле (1).

2. Расчет реакций в связях модели «основание – свайный фундамент – сооружение» и получение реакций в связях.

3. Расчет  $\sigma_{i,m}$

4. Проверка условия  $0,95 \leq [\sigma] / \sigma_{i,m} \leq 1,05$

При невыполнении условия – переход к п.1. Иначе – итерационный процесс закончен, жесткости связей определены.

Кроме того, в п. 2 алгоритма учитывалось взаимодействие свай при восприятии горизонтальных нагрузок – групповой эффект. В Украинских НД не приведены рекомендации учета группового эффекта свайного куста при горизонтальных нагрузках. Модель фундамента НБК разработана с

применением метода понижения жесткостей горизонтальных связей вследствие группового эффекта, учет которого изложен в Приложении 1 [2]. Понижающий коэффициент  $\alpha_i$ , определяется по формуле:

$$\alpha_i = \gamma_c \prod_{j=1} \left\{ 1 - \frac{d}{r_{ij}} \left[ 1,17 + 0,36 \frac{x_j - x_i}{r_{ij}} - 0,15 \left( \frac{x_j - x_i}{r_{ij}} \right)^2 \right] \right\},$$

где  $\gamma_c$  - коэффициент, учитывающий уплотнение грунта при погружении свай и принимаемый  $\gamma_c=1$  для не забивных видов свай;

$d$  - диаметр или сторона поперечного сечения свай, м;

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2},$$

$x_j, y_j$  - то же, для  $j$ -й свай. где  $x_i, y_i$  - координаты оси  $i$ -й свай в плане, причем горизонтальная нагрузка приложена в направлении оси  $x$ ;  $x_j, y_j$  - то же, для  $j$ -й свай.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА ПОД КОНЦОМ СВАИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

В расчетной модели свайного фундамента арки НБК сопротивление грунта в вертикальном направлении моделировалось с применением вертикальных упругих КЭ связей под нижними концами свай.

Жесткости связей с учетом группового эффекта можно определить по формулам Приложения П ДБН [1].

В расчете фундамента НБК жесткости связей были рассчитаны с учетом результатов испытания свай на вдавливание и группового эффекта по следующему алгоритму.

1. Расчет средней вертикальной нагрузки на одну сваю в составе фундамента по формуле:

$$P_0 = \Sigma V / N,$$

где  $N$  – количество свай в фундаменте;

$\Sigma V$  – суммарная вертикальная нагрузка на сваи с учетом веса ростверка для основного сочетания нагрузок.

2. Определение осадки свай при нагрузке  $P_0$  по графику испытания свай на вдавливание.

3. Определение жесткости связи в составе фундамента по формуле

$$K_{0i} = (P_0) / S_i.$$

4. Корректировка значений жесткостей связей в модели.

5. Расчет модели «основание - фундамент на сваях - сооружение» для вычисления реакций в связях  $P_i$ .

6. Определение осадки каждой сваи ( $S_i$ ) по формулам Приложения П [1]

$$s_i = s(N_i) + \sum_{j=1} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_1}.$$

7. Определение жесткости КЭ связи ( $K_i$ ) по формуле:

$$K_{i,k} = P_{i,k} / S_{i,k}$$

8. Проверка условий

$$0,90 \leq K_{i,k} / K_{i,k-1} \leq 1,10$$

$$0,95 \leq P_{i,k} / P_{i,k-1} \leq 1,05$$

$$0,98 \leq S_{i,k} / S_{i,k-1} \leq 1,02$$

При невыполнении какого-либо условия - переход к п. 4, иначе – итерационный процесс закончен, жесткости связей определены.

В расчете фундамента НБК предусматривалось, что превышение несущей способности по грунту в одной свае не приводит к отказу фундамента вследствие перераспределения вертикальных реакций среди свай группы. В этом случае выполнена корректировка жесткостей вертикальных связей в итерационном процессе по следующему алгоритму.

1. Расчет жесткости связей по формуле

$$K_{i,k+1} = K_{i,k} \times (P_U / P_{i,k}),$$

где индекс  $i$  – номер сваи,  $k$  – номер итерации;

$P$  и  $P_U$  - реакция в свае и предельная нагрузка на сваю.

2. Расчет модели «основание - фундамент на сваях - сооружение» и вычисление реакций в связях  $P_i$ .

3. Проверка условия

$$P_{i,k} / P_U \leq 1,05.$$

При невыполнении условия - переход к п.1. Иначе – итерационный процесс закончен, жесткости связей определены.

## ВЫВОДЫ

В результате расчетов южного и северного фундаментов Арки НБК с приведенными методами моделирования взаимодействия свай и основания получены следующие результаты:

Критерий	Предельное значение критерия	Максимальное расчетное значение для фундамента Арки НБК	
		северного	южного
$S_{\max}$	150 мм	38 мм	30,3 мм
$U_{\max}$	60 мм	21 мм	45,7 мм
$V_{\max}$	4170 кН	4188 кН	4197 кН
$H_{\max}$	1352 кН	1212 кН	1382 кН

Результаты получены с высокой консервативной оценкой: несущая способность одиночной сваи по грунту на вертикальную нагрузку занижена (рис. 4); расчетные горизонтальные перемещения завышены (рис. 9). Выполненные исследования показали необходимость дополнения украинских норм проектирования рекомендациями по учету:

- несущей способности свай на горизонтальную нагрузку;
- группового эффекта при горизонтальных нагрузках;
- моделирования взаимодействия свай с основанием при горизонтальных нагрузках.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Основи та фундаменти будинків і споруд. Основні положення проектування. Зі змінами №1 і №2: ДБН В.2.1-10-2009. - [Чинні від 2009-01-07]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 161 с. - (Будівельні норми України).
2. Свайные фундаменты: СНиП 2.02.03-85. – [Действует с 1987-01-01]. – М.: Госстрой России, 46 с.
3. Грунты. Методи польових випробувань палей: ДСТУ Б В.2.1-1-95 (ГОСТ 5686-94). – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Мінбуд України. – IV, 57 с. – (Державний стандарт України).
4. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань: ДСТУ Б В.2.1-27. - [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України. – III, 11 с. – (Державний стандарт України).
5. SIP-N-RB-22-D02–RTE 007-00 Отчет о результатах испытания спаренных буройнъекционных свай P32 и P33. Северная зона.
6. SIP-N-KP-22-C02-CLN-016 / 99-925.100.008.OT00 Проект нового безопасного конфайнмента (НБК). Лицензионный пакет ЛП-5. Отчетный документ D4.1. Расчет фундамента сервисной зоны Арки, ред. А, статус INT.

## **REFERENCES**

1. Change 1. DBN V.2.1-10-2009. Foundations structures. – K.: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2011. – 54 P. (Ukr)
2. Building regulations. SNIP 2.02.03-85. Pile foundations. (Rus)
3. DSTU B V.2.1-1 (GOSN 5686-94) Soils. Field test methods by piles. (Ukr)
4. DSTU B V.2.1-27 Piles. Determination of bearing capacity on the results of field trials. (Ukr)
5. SIP-N-RB-22-D02–RTE 007-00. A report on the results of testing of paired CFA piles P32 and P33. North Zone. (Rus)
6. SIP-N-KP-22-C02-CLN-016 / 99-925.100.008.OT00 A report D 4.1. Calculation of foundations service zone Arches. Ed. A. Status INT. (Rus)

Статья поступила в редакцию 21.07.2016 г.