



УДК 624.151.6

**М.Ю. Шеменков** – аспирант

Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ФУНДАМЕНТОВ В ВЫТРАМБОВАННЫХ КОТЛОВАНАХ С ГРУНТОМ ОСНОВАНИЯ И ИХ РАСЧЕТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОНДИРОВАНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье выполнен анализ взаимодействия горизонтально нагруженного фундамента с грунтом основания. Представлены основные подходы к выбору исходных параметров и результаты численного моделирования взаимодействия горизонтально нагруженных фундаментов в вытрамбованных котлованах с окружающим грунтом с использованием программного комплекса PLAXIS. Предложены расчетная схема и метод расчета горизонтально нагруженных фундаментов в вытрамбованных котлованах с использованием статического зондирования.

**M. Yu. Shemenkov** – post-graduate student

Ufa State Petroleum Technical University (USPTU)

## **INVESTIGATION OF INTERACTION OF LATERALLY LOADED FOUNDATIONS IN TAMPED PITS WITH BASE SOIL AND THEIR DESIGNING BY USING OF CPT**

### **ABSTRACT**

In this paper the analysis of interaction of laterally loaded foundations with the base soil is performed. The main approaches regarding choice of initial parameters and the results of numerical modeling of interaction of laterally loaded foundations in tamped pits with surrounding soil by using of PLAXIS program are presented. The designing scheme and method of computation of laterally loaded foundations in tamped pits by using of CPT is suggested.

Учитывая факторы, обуславливающие совместную работу фундаментов и их оснований, можно выбрать наиболее рациональное решение фундамента в технико-экономическом отношении. Эту задачу решают пирамидальные фундаменты, выполняющие две функции: при забивке они уплотняют подстилающий и окружающий грунт, создавая искусственное основание, и передают на него нагрузку от здания или сооружения.

Исследования пирамидальных свай показали, что характер их совместной работы с грунтом основания кардинальным образом отличается от работы призматических свай равного объема.

Известно [1], что свая, работающая по «жесткой» схеме под действием горизонтальной нагрузки, поворачивается вокруг некоторой точки поворота  $O$ . При этом грунт, находящийся перед сваей выше и со стороны задней грани ниже точки поворота, уплотняется с образованием ядра некоторой формы.

Как известно, при устройстве фундаментов в вытрамбованном котловане (ФВК) вокруг них образуются области деформации грунта с зонами уплотнения по боковой поверхности и ниже плоскости острия.

При сбрасывании трамбовки грунт вытесняется и перемещается в области наименьшего сопротивления. В зависимости от свойств и состояния грунта, размеров

и формы ствола фундамента такие области образуются вокруг боковой поверхности и ниже его подошвы. При этом происходит уплотнение грунта до некоторой критической плотности с последующим вытеснением (выпором) его на поверхность. Таким образом, часть грунта, вытесненного ФВК при его устройстве, расходуется на уплотнение, часть – на выпор.

В насыщенных водой глинах и суглинках уплотнение происходит в основном в результате отжатия поровой воды, как правило, достаточно медленно. Поэтому в процессе погружения трамбовки уплотнение грунта вокруг нее незначительно, уплотнение происходит в основном вследствие отжатия воды из пор вверх и вдоль ствола трамбовки. Основная зона деформаций грунта в рассматриваемом случае находится на некотором расстоянии от оси фундамента и характеризуется смещением частиц в стороны и вверх в результате частичного выпора, вызывающего поднятие планировочной отметки котлована. Частичный выпор глинистых грунтов приводит к их перемятию, что нарушает природную структуру, тем самым снижая сопротивление сдвигу.

Численное моделирование работы системы «грунтовое основание – фундамент» с помощью пакета прикладных программ PLAXIS позволило оценить напряженно-деформированное состояние



фундаментов в вытрамбованных котлованах и выявить зоны развития пластических деформаций с учетом роста нагрузки на фундамент. При этом рассмотрены две конструктивные особенности ФВК (без втрамбованного щебня и с втрамбованным щебнем) и выполнена оценка величины перемещения нижнего конца фундамента в вытрамбованном котловане в зависимости от объема втрамбованного щебня и грунтовых условий.

Выполненные численные исследования позволили установить следующее:

- эпюра нормальных давлений изменяется по глубине фундамента по параболическому закону;
- максимальные значения давлений (вершина параболы) находятся на глубине  $0,4-0,6h$  (где  $h$  – глубина ФВК) от уровня поверхности грунта;
- точка нулевых перемещений вертикальной оси фундамента смещается в низ фундамента в зависимости от действующей горизонтальной нагрузки и при наличии втрамбованного щебня приближается к основанию фундамента;
- в связи с тем, что потеря устойчивости грунтов основания у горизонтально нагруженных ФВК происходит при весьма значительных перемещениях, несущая способность горизонтально нагруженных ФВК с уширенным основанием определяется величиной горизонтального перемещения в уровне поверхности грунта.

Одной из главных причин невысокой надежности всех методов расчета в фундаментостроении является недостаточно высокая точность методов определения характеристик грунта, которые используются в расчетных формулах. Основные требования, предъявляемые к методам определения характеристик грунта, – это возможность получения их в условиях естественного залегания грунтов на любой требуемой глубине, допустимая стоимость и высокая скорость их получения. Этим требованиям наилучшим образом отвечает статическое зондирование.

В начальный период применения зондирования принималось, что величины сопротивления грунта при внедрении зонда равны сопротивлению грунта по боковой поверхности сваи и под ее нижним концом. Дальнейшее использование статического зондирования при расчете свай выявило некоторое несоответствие между величинами сопротивления грунта, полученными зондированием, и работой сваи под нагрузкой. Поэтому возникла необходимость введения в расчетные формулы коэффициента перехода от зонда к свае.

Большинство исследований было выполнено применительно к забивным призматическим сваям. Однако в связи с тем, что схема работы в грунте пирамидальной сваи отличается от сваи постоянного по глубине сечения, полученные зависимости для расчета призматических свай по данным зондирования не пригодны для свай пирамидальной формы.

В рамках поставленной цели – разработки метода расчета горизонтально нагруженных ФВК с использованием статического зондирования – решалась задача исследования закономерностей перехода от сопротивлений грунта, полученных зондированием, к несущей способности горизонтально нагруженных ФВК с использованием результатов исследования деформаций грунтового массива вокруг ФВК.

При устройстве ФВК при падении трамбовки происходит приложение на грунт ударной нагрузки. Динамическая нагрузка передается на содержащиеся в грунте, который является трехфазной системой, твердые частицы (скелет), воду и воздух. При этом в грунте происходят необратимые деформации в виде перемещений его отдельных частиц.

Известно, что процесс вытрамбовывания котлованов в различных грунтах в зависимости от их физико-механических характеристик и формы трамбовки протекает по-разному и состоит из следующих этапов: уплотнения грунта с формированием уплотненной зоны, продавливания уплотненной зоны, вытеснения грунта в стороны, выпора его вверх и в стороны, а также разуплотнения грунта на стенках и дне котлована. Обычно отдельные этапы процесса вытрамбовывания котлованов осуществляются одновременно или в определенной последовательности.

Объем вытесненного грунта при вытрамбовывании котлована превышает необходимый объем грунта для создания уплотненной зоны. Вследствие этого образуется избыток вытесненного грунта, который вначале перемещается в стороны, а затем вверх, из-за чего на поверхности вокруг вытрамбовываемого котлована возникает выпор околосвайного грунта.

При выпирании вверх грунт разрыхляется, нарушается его контакт с боковой поверхностью и, как следствие, уменьшаются контактные напряжения. При этом в грунте вблизи котлована разрушаются структурные связи и снижается сопротивляемость грунта под нагрузкой. При втрамбовывании жесткого материала (в данном случае щебня) основание утолщается, возникает уширенная зона.

Из вышеизложенного следует, что выпирание и связанное с ним разрыхление грунта при вытрамбовке скважины, несмотря на пирамидальность трамбовки, обуславливающую обжатие грунта боковыми гранями при осадке от нагрузки, приводят к снижению сопротивления грунта на боковой поверхности фундамента. Поэтому использование данных статического зондирования грунтов для расчета ФВК возможно лишь с введением поправочных коэффициентов, в той или иной степени учитывающих особенности работы ФВК.

В известных методах расчета, разработанных в институте [2-4], были использованы коэффициенты перехода  $b_f$  и  $b_R$  (соответственно от сопротивления



трению и нормального сопротивления), полученные по результатам исследования штампонабивных свай. Однако ФВК отличаются от штампонабивных свай небольшой относительной глубиной, и на несущую способность ФВК большое влияние оказывают деформации грунта (выпор), возникающие вблизи поверхности грунта и на поверхности при устройстве фундамента. Поэтому представляют интерес исследования деформационной зоны грунтового основания вокруг ФВК.

При расчете горизонтально нагруженных ФВК используется только сопротивление грунта под наконечником зонда  $q_s$ , поэтому дальнейшие исследования направлены на определение коэффициентов перехода  $b_R$  от данных зондирования к нормальным напряжениям.

С помощью компьютерного моделирования изучались закономерности формирования уплотненных зон в процессе устройства фундамента и получения предельного состояния уплотненного основания при действии на фундамент горизонтальной нагрузки и была выполнена оценка напряжений в области предельного равновесия.

Расчет и анализ НДС активной зоны фундаментов производился в следующей последовательности: по данным полевых испытаний выявлялись зоны уплотнения грунтов околосвайного пространства, затем определялись деформационные и прочностные характеристики грунтов и измерялись напряжения в околосвайном массиве.

Из полученных расчетных деформационных схем следует, что при погружении трамбовки вытесненный из-под нее грунт сначала перемещается вниз и в стороны. При этом грунт сначала уплотняется до некоторой критической величины, после чего в грунте образуются поверхности сдвига и происходит перемещение грунта в зону наименьшего сопротивления – на поверхность. Одна из поверхностей сдвига направлена вдоль боковой поверхности трамбовки, другая проходит внутри грунтового массива, начиная от боковой поверхности трамбовки на глубине, равной толщине выпираемой призмы грунта, с выходом на поверхность на расстоянии от грани трамбовки  $2,5-3d$ , где  $d$  – верхний размер трамбовки. Это расстояние и является границей зоны выпора.

Таким образом, при выпирании грунта вверх грунт разрыхляется, нарушается его контакт с боковой поверхностью и, как следствие, уменьшаются контактные напряжения.

При погружении трамбовки происходит перемещение частиц грунта в направлении, перпендикулярном к боковой поверхности по всей длине трамбовки, поэтому верхние слои грунта, как менее нагруженные, выпираются вверх, а нижние – уплотняются.

Выполненное численное моделирование процесса устройства ФВК подтвердило результаты натурных измерений выпора грунта и показало, что грунтовое основание претерпевает изменение, которое необходимо учитывать в расчетах несущей способности фундаментов с использованием статического зондирования путем введения поправочных коэффициентов.

Из сопоставления результатов численных исследований и испытаний натуральных фундаментов были получены коэффициенты перехода  $b_R$  от величин сопротивления под наконечником зонда при статическом зондировании к нормальным сопротивлениям на боковой поверхности ФВК в зависимости от относительной глубины расположения слоя  $z_i/l_\phi$  и от приведенной глубины расположения слоя  $z_i/\epsilon_{cp}$ , где  $\epsilon_{cp}$  – условный размер поперечного сечения фундамента,  $z_i$  – глубина расположения  $i$ -го слоя грунта.

Полученные на основе выполненных численных исследований коэффициенты перехода  $b_R$  от величин сопротивления под наконечником зонда при статическом зондировании к нормальным сопротивлениям на боковой поверхности ФВК можно использовать при расчетах горизонтально нагруженных фундаментов с использованием статического зондирования грунтов.

Известно, что по характеру деформации горизонтально нагруженный ФВК можно представить в виде абсолютно жесткого стержня, поворачивающегося вокруг некоторой точки – точки нулевых перемещений (т.н.п.). Поэтому определение глубины расположения т.н.п. является важным моментом при составлении расчетной схемы.

На рис. 1 в качестве примера приведены результаты расчетов по PLAXIS перемещения оси горизонтально нагруженного фундамента глубиной 3 м с объемами втрамбованного щебня  $V_{щ} = 0$  и  $V_{щ} = 2 \text{ м}^3$ .

На представленных эпюрах видно, что у ФВК без втрамбованного щебня ( $V_{щ} = 0$ ) т.н.п. расположена на некоторой высоте относительно подошвы фундамента. В случае наличия втрамбованного щебня ( $V_{щ} = 2 \text{ м}^3$ ) т.н.п. снижается на уровень уширенного основания.

Полученные результаты численных исследований показывают, что при принятии расчетной схемы горизонтально нагруженного ФВК необходимо учитывать объем уширенного основания. Сформированное уширение из втрамбованного щебня оказывает существенное влияние на деформационную схему фундамента, при этом месторасположение т.н.п. зависит от наличия и объема уширенного основания.

Основные положения разработанного метода расчета горизонтально нагруженных ФВК следующие.

1. Деформированную схему горизонтально нагруженного ФВК можно представить в виде заглубленного в грунт абсолютно жесткого стержня, поворачивающегося вокруг некоторой точки.

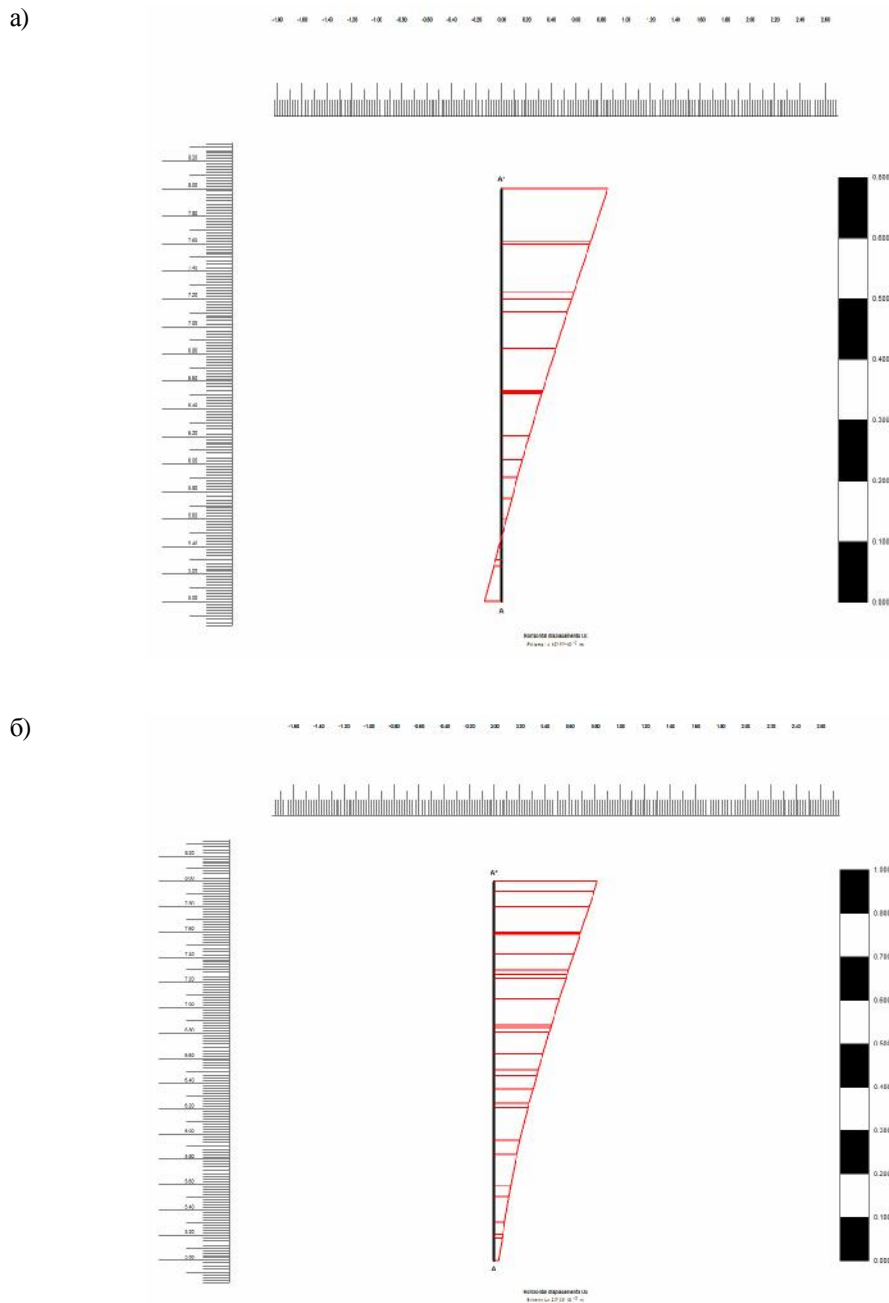


Рис. 1. Эпюра горизонтального перемещения оси ФВК при  $V_{щ} = 0$  (а) и  $V_{щ} = 2 \text{ м}^3$  (б)

2. В качестве расчетной модели грунтового основания принимается модель местных деформаций, в которой расчетным параметром основания является коэффициент постели.

3. Общее сопротивление ФВК действию горизонтальной нагрузки формируется сопротивлением грунта по боковой поверхности с противоположной стороны от действующей горизонтальной нагрузки и сопротивлением грунта в области уширенного основания, величина которого зависит от объема втрамбованного щебня.

4. В связи с тем, что ФВК применяются с уширенным основанием, при этом горизонтально

нагруженный фундамент взаимодействует с грунтом основания на значительную глубину, в расчетной схеме следует учитывать многослойность основания. При этом расчетные параметры грунта целесообразно определять с использованием данных статического зондирования.

Расчетные схемы горизонтально нагруженного ФВК представлены на рис. 2.

Важным моментом при принятии расчетной схемы горизонтально нагруженного ФВК является наличие уширенного основания. Результаты выполненных исследований показали, что уширенное основание оказывает существенное влияние на сопротивление

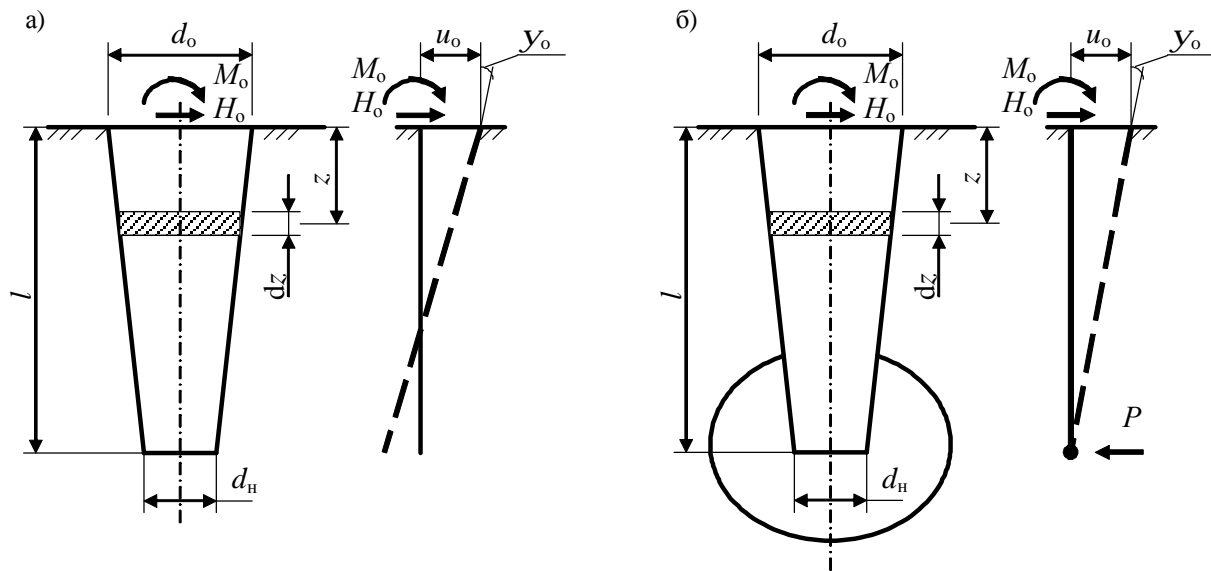


Рис. 2. Расчетные схемы горизонтально нагруженного ФВК без уширения (а) и с уширением (б)

перемещению горизонтально нагруженного ФВК. Для учета влияния уширенного основания введено понятие коэффициента уширения  $k_{\text{уш}}$ , который должен быть  $k_{\text{уш}} \leq 1$  и определяться зависимостью

$$k_{\text{уш}} = \frac{V_{\text{щ}}^{\text{факт}}}{V_{\text{щ}}^{\text{опт}}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{щ}}^{\text{факт}}$  – фактический объем втрамбованного щебня,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{щ}}^{\text{опт}}$  – оптимальный объем втрамбованного щебня,  $\text{м}^3$ .

За принят объем, создающий максимальный диаметр уширения, принимаемый в соответствии с СП 50-101-2004 равным  $2d_n$  (где  $d_n$  – диаметр трамбовки в нижнем сечении).

Из условия равновесия действующих и реактивных сил были получены формулы для определения перемещений и усилий в фундаменте при принятых граничных условиях

$$z = l, \quad M_l = 0, \quad Q_l = P k_{\text{уш}}, \quad (2)$$

где  $P$  – реактивная сила, возникающая от сопротивления уширения, определяемая по формуле (3).

$k_{\text{уш}}$  – коэффициент уширения, определяемый по формуле (1).

$$P = \frac{H_0 I_5 - M_0 I_4}{(I_5 + I_4 l) k_{\text{уш}}}. \quad (3)$$

Физический смысл  $k_{\text{уш}}$  заключается в следующем. При  $k_{\text{уш}} = 0$  (уширение отсутствует) имеет место расчетная схема, представленная на рис. 2а. При  $k_{\text{уш}} = 1$  (максимальный объем уширения) имеет место расчетная схема показанная на рис. 2б, при этом в

граничных условиях (2) добавляется  $u_l = 0$ , а  $P \neq 0$  и определяется по формуле (3). При промежуточных значениях  $0 < k_{\text{уш}} < 1$   $u_l \neq 0$  и  $P = 0$ .

Коэффициенты  $I_1 \div I_5$  определяются по формулам

$$I_1 = 12A - 6Bx; \quad I_2 = 4Cx - 6B; \quad I_3 = 4C - 3Dx;$$

$$I_4 = I_1 l + I_2; \quad I_5 = I_2 l + I_3 \quad (4)$$

$$A = C_{zi} (z_i - z_{i-1}); \quad B = C_{zi} (z_i^2 - z_{i-1}^2); \quad (5)$$

$$C = C_{zi} (z_i^3 - z_{i-1}^3); \quad D = C_{zi} (z_i^4 - z_{i-1}^4),$$

где  $z_i$  и  $z_{i-1}$  – расстояние от расчетной поверхности грунта до подошвы и кровли  $i$ -го слоя грунта, м.

$$\zeta = \frac{d_o}{12} (I_2^2 - I_1 I_3). \quad (6)$$

Коэффициент постели  $C_z$  определяется по формуле

$$C_{zi} = \frac{18R_{icp}}{(1 - \nu_i^2) d_{icp}}, \quad (7)$$

$$\text{где } R_{icp} = \frac{\sum_{j=1}^m q_{ij}}{1,25m} \quad (8)$$

$m$  – количество точек зондирования;

$q_i$  – сопротивление  $i$ -го слоя грунта под наконечником зонда по данным статического зондирования со стабилизацией установкой С-832,  $\text{кН/м}^2$ .

$d_{icp}$  – средний размер стороны сечения фундамента в  $i$ -ом слое грунта, м.

С целью оценки достоверности разработанного метода расчета выполнены сравнительные расчеты натуральных фундаментов в вытрамбованных котлованах, испытанных на горизонтальную нагрузку в различных грунтовых условиях. Сопоставление опытных и расчетных данных проводилось при фиксированном горизонтальном перемещении фундамента в уровне поверхности грунта 10 мм (см. таблицу).



**Результаты сравнительных расчетов опытных ФВК**

Фундамент	$V_{ш}, м^3$	Величина горизонтальной нагрузки $H_o$ при $u_o=10$ мм, кН		
		по испытанию	по расчету	расхождение, %
ФВК-1	1,5	223	179	-20
ФВК-2	1,0	200	178	-11
ФВК-3	0	146	128	-12
ФВК-4	4,4	107	94	-12
ФВК-5	1,0	172	145	-16

Расхождение опытных и расчетных перемещений в уровне поверхности грунта при расчете по данным статического зондирования составляет от -11 до -20%. Результаты расчетов показывают удовлетворительную сходимость с опытными данными и являются вполне приемлемыми для инженерных расчетов.

#### Литература

1. Буслов А.С. Работа свай на горизонтальную нагрузку за пределами упругости в связных грунтах. – Ташкент: ФАН, 1979. – 106 с.
2. Яковлев П.И., Готман А.Л., Курмаев Р.Г. Взаимодействие сооружений с грунтом и свайные основания. – Одесса: Астропринт, 2004. – 512 с.
3. Готман А.Л., Миткина Г.В., Шеменков Ю.М. Исследование вертикально нагруженных фундаментов в вытрамбованных котлованах и расчет их несущей способности. // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1996, №5. – С. 19-23.
4. Готман А.Л., Шеменков Ю.М. Экспериментальные исследования фундаментов в вытрамбованных котлованах при действии горизонтальной нагрузки и их расчет. // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2002, №1. – С. 12-16.