

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 624.155:624.042]:631.442.4

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261218.10.442

**ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА R  
ПОД НИЖНИМ КОНЦОМ ЗАБИВНОЙ (ВДАВЛИВАЕМОЙ) СВАИ  
И СВАИ ОБОЛОЧКИ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

МОТОРНИЙ А. Н.<sup>2</sup>, *маг., ст. науч. сотр.*,

МОТОРНИЙ Н. А.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup>Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: press.pgasa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup>Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>3</sup>Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы изменения физико-механических характеристик грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя при погружении свай сваебойным агрегатом в глинистые грунты. Дается обоснование изменения удельного сцепления глинистого грунта  $C$  с учетом изменения электромолекулярных сил в массиве подстилающего слоя при передаче усилий уплотненным ядром на подстилающий (уплотненное ядро) его слой.

После каждого удара молота по голове сваи формируется «отказ» сваи, который принимается нами основным показателем, где учитывается масса сваи и масса ударной части молота (их соотношение) с учетом, что масса ударной части молота должна быть не меньше массы сваи.

Рассмотрен вопрос использования той же аналогичной компрессионной зависимости при определении изменения угла внутреннего трения  $\varphi = f$  («а»,  $I_L$ ) грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя. По предварительно заданном «отказе» «а» и показателя текучести  $I_L$  вычисляются частные значения удельного сцепления  $C$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  подстилающего уплотненное ядро слоя. Результаты вычислений сведены в таблицы № 1 для изменения удельного сцепления  $C$  и № 2 для изменения угла внутреннего трения  $\varphi$ . Для конкретных значений прочностных показателей  $C$  и  $\varphi$  грунта подстилающего слоя необходимо проинтерполировать табличные данные по соответствующему конкретному значению величины отказа «а» и показателя текучести  $I_L$ , которые определяются в процессе погружения сваи сваебойным агрегатом. По имеющимся частным значениям, проинтерполированным прочностным показателям грунта подстилающего слоя  $C$ ,  $\varphi$  и глубине расположения «подошвы» уплотненного ядра  $d$  вычислят расчетное сопротивление грунта  $R$ , подстилающего уплотненное ядро слоя, используя решения проф. Н. П. Пузыревского или методику, представленную в ДБН В.2.1-10-2009 (формула Е.1) по тому же решению.

Имея площадь уплотненного ядра (горизонтальная проекция)  $A$  и расчетное сопротивление  $R$  грунта подстилающего слоя, вычисляют несущую способность «свай»  $F_d$  или свайного фундамента по формуле:

$F_d = R \cdot A$  с учетом коэффициентов условий работы в зависимости от сложившейся эксплуатационной ситуации.

**Ключевые слова:** *уплотненное ядро; подстилающий слой; несущая способность; расчетное сопротивление; «отказ» сваи; показатель текучести; голова сваи; релаксация; коэффициент релаксации; лессовые грунты; просадочные грунты*

**ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОГО ОПОРУ R  
ПІД НИЖНІМ КІНЦЕМ ЗАБИВНОЇ (ЗАДАВЛЮВАНОЇ) ПАЛІ  
І ПАЛІ ОБОЛОНКИ У ГЛИНИСТИХ ГРУНТАХ**

БОЛЬШАКОВ В. И.<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, проф.*,

МОТОРНИЙ А. М.<sup>2</sup>, *маг., ст. наук. співроб.*,

МОТОРНИЙ М. А.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: press.pgasa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup>Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>3</sup>Кафедра основ і фундаментів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

**Анотація.** Розглядаються питання зміни фізико-механічних характеристик ґрунту, що підстилає ущільнене ядро шару ґрунту під час заглиблення паль палезабивним агрегатом у глинистих ґрунтах. Дається обґрунтування зміни питомого зчеплення глинистого ґрунту  $C$  з урахуванням зміни електромолекулярних сил у масиві ґрунту підстильного шару при передачі зусиль ущільненим ядром на шар ґрунту, що підстилає ущільнене ядро.

Після кожного удару молота по голові палі формується «відмова» палі «а», яка приймається нами головним показником, в якому враховується маса палі і маса ударної частини молота (їх співвідношення) з урахуванням, що маса ударної частини молота повинна бути не меншою за масу палі.

Розглядаються питання використання тієї ж аналогічної компресійної залежності для визначення зміни кута внутрішнього тертя  $\varphi$  підстильного шару ґрунту під ущільненим ядром  $\varphi = f(\langle a \rangle, I_L)$ . За попередньо заданими значеннями «відмови» «а», показника текучості  $I_L$  приватне значення питомого зчеплення  $C$  і кута внутрішнього тертя  $\varphi$  шару ґрунту який підстилає ущільнене ядро. Результати розрахунків наведені в таблиці № 1 (для зміни питомого зчеплення  $C$  і № 2 для зміни показника кута внутрішнього тертя  $\varphi$ . Для конкретного значення міцнісних показників  $C$  і  $\varphi$  ґрунту підстильного шару ґрунту необхідно проінтерполювати табличні дані за відповідними конкретними показниками значень величини «відмови» палі «а» і показника текучості  $I_L$ , які заміряються і визначаються в період пруження паль палезабивним агрегатом. За визначеними приватним значенням, проінтерполюваним міцнісним показником підстильного шару ґрунту  $C$  і  $\varphi$ , і глибини розташування підшви ущільненого ядра  $d$  визначають розрахунковий опір ґрунту  $R$ , що підстилає ущільнене ядро шару ґрунту, використовуючи рішення проф. М. П. Пузиревського або методу, прийняту ДБН В.2.1-10-2009 для того самого рішення.

Маючи площу ущільненого ядра (горизонтальна проекція)  $A$  і розрахунковий опір ґрунту  $R$  підстильного шару, визначають (розраховують) несну здатність палі  $F_d$  або пальового фундаменту за формулою  $F_d = R \cdot A$  з урахуванням коефіцієнтів умови роботи залежно від експлуатаційних умов.

**Ключові слова:** ущільнене ядро; підстилюючий шар; несуча здатність; розрахунковий опір; «відмова» палі; голова палі; показник текучості; релаксація; коефіцієнт релаксації

## JUSTIFICATION OF EQUIPMENT RESISTANCE OF THE SOIL “R” UNDER THE LOWER END OF THE FUNERAL (INCLUDABLE) PILT AND PILED SHELLS IN CLAY GROUNDS.

BOLSHAKOV V. I.<sup>1</sup>, *Dr. Sc (Tech).*, *Prof.*

MOTORNUI A. N.<sup>2</sup>, *master, senior researcher*

MOTORNUI N. A.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Ass. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Materials and Materials Processing, State Higher Educational Establishment «Pridneprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 745-23-72, e-mail: press.pgasa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>2</sup> Department of bases and foundations, State Higher Educational Establishment «Pridneprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

<sup>3</sup> Department of bases and foundations, State Higher Educational Establishment «Pridneprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, phone +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473.

**Abstract.** The issues of changing the physicommechanical characteristics of the soil of the underlying compacted core layer are considered when piling unit is immersed in clay soils by a pile driving unit. The substantiation of the change in the specific cohesion of the clay soil  $C$  is given, taking into account the change in the electromolecular forces in the array of the underlying layer during the transfer of forces by the compacted core to the underlying (compacted core) of its layer. After each blow of the hammer on the pile head, a «failure» of the pile is formed, which is accepted by us as the main indicator, which takes into account the mass of the pile and mas-shock part of the hammer (their ratio), taking into account that the mas-shock part of the hammer should be not less than the pile weight.

The question of using the same similar compression dependence when determining the change in the angle of internal friction  $\varphi = f(\langle a \rangle, I_L)$  of the soil of the underlying core layer is considered. For a predetermined «failure» «а» and a yield stress indicator  $I_L$ , the specific values of specific adhesion  $C$  and internal friction angle  $\varphi$  of the underlying core layer are calculated. the results of calculations are summarized in Tables No. 1 for changing the specific clutch  $C$  and No. 2 for changing the angle of internal friction  $\varphi$ . For specific values of strength indicators  $C$  and  $\varphi$  of the soil of the underlying layer, it is necessary to interpolate the tabular data on the corresponding specific value of the failure val-

ue «а» and the turnover rate  $I_L$ , which are determined in the process of piling the pile driving unit. According to the available values of the interpolated strength indicators of the soil of the underlying layer  $C$ ,  $\varphi$  and the depth of the «sole» of the compacted core  $d$ , the calculated soil resistance  $R$  is calculated, underlying the compacted core of the layer using the solutions of prof. N. Puzyrevsky or the methodology presented in DBN B.2.1-10-2009 (formula E.1) by the same decision.

Having the compacted core area (horizontal projection)  $A$  and the calculated resistance  $R$  of the soil of the underlying layer, the bearing capacity of the «pile»  $F_d$  or pile foundation is calculated by the formula  $F_d = R \cdot A$  taking into account the coefficients of working conditions depending on the current operational situation.

**Keywords:** compacted core, underlying layer, bearing capacity, design resistance, pile failure, creep rate, head fell, relaxation, relaxation coefficient

**Введение.** Анализируя действующие нормативные материалы по расчету и проектированию свайных фундаментов и здания начала 1960-х годов (СНиП II Б.5-62 «Свайные фундаменты из забивных свай»; Временные указания по проектированию и устройству свайных фундаментов из коротких забивных свай (СН.216-62) и региональные документы по проектированию свайных фундаментов, а также переизданные в 1971 году СНиП II Б.5-67\* и последующие переиздания СНиП II.17-77, СНиП 2,02,03-85 издания Госстроя СССР и современное переиздание ДБН В.2.1-10-2009, с изменениями и дополнениями, изданными «Міністерством регіонального розвитку та будівництва України», Київ-2011 р.), мы заметили, что каждое новое издание нормативных документов, перечисленных выше, обязательно отменяет предыдущее издание, начиная с СН.216-62, СНиП II Б.5-62 и другие по настоящее время.

При этом отмечено, что новые изменения во вновь созданных и переизданных нормативных документах оставляю за собой право применять расчетную схему сваи и свайного фундамента без изменения, прочностные показатели грунта под нижним концом и на боковой поверхности сваи  $R$  и  $f$  без изменения, начиная с 1930-х годов (см. табл. № 1, табл. № 3 перечисленных документов). Причем ссылок на опубликованные и внедренные в практику материалы по определению расчетного сопротивления грунта под нижним концом свай  $R$  и сил трения грунта на боковую поверхность ствола сваи  $f$  не представляется, за исключением работ проф. А. А. Луга.

Учитывая, что в 1960–1965 годы вычислительная техника только начала внедряться в практику расчетов, выполненная статисти-

ческая обработка собранных проф. А. А. Луга и его коллективом материалов, по расчетным сопротивлениям  $R$  под нижним концом свай и сил трения грунта  $f$  на боковую поверхность ствола сваи не исключала погрешностей. В том числе расчетная схема сваи принималась традиционной – стержень проходит грунтовую среду без учета формирования уплотненного ядра, вокруг острия и ствола сваи.

Авторы статьи предлагают измененную расчетную схему относительно традиционной расчетной схемы сваи, а именно: в процессе погружения сваи сваебойным агрегатом начинает формироваться уплотненное ядро, которое служит (как бы) рабочим наконечником погружаемой сваи и которое передает давление от нагрузки от (сооружения) здания на нижние слои грунта (ниже острия) через площадь уплотненного ядра (горизонтальная проекция).

Так как вместе со сваем погружается образующееся в процессе погружения сваи ядро, которое формируется под углом  $\varphi_{cp}/4$ , начиная от головы сваи, погруженной в грунт, до острия сваи с общей (длиной) глубиной, равной  $h = l_{cb} \cdot (\operatorname{tg} \frac{\varphi_{cp}}{4} + l_{ac}) = l_{cb} (1 + \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4})$ , линейные размеры основания уплотненного ядра составляют  $v_{я} = l_{я} = 2l_{cb} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4}$ , а площадь ядра, передаваемая нагрузку от сваи на подстилающий слой  $A = (2l_{cb} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{cp}}{4})^2$ , уже не может считаться стремящейся к минимуму  $\rightarrow 0$ , а имеет внушительные, относительно острия сваи и сечения ствола размеры, и с этим необходимо считаться. Тогда в конечном итоге мы приходим к схеме передачи нагрузки внутри упругого полупространства через ограниченную площадь  $A$ , что меняет и напряженное состояние массива грунта в плоскости

острия не по Миндлину как сосредоточенная нагрузка внутри упругого полупространства, а как распределенная по ограниченной площади внутри упругого полупространства.

**1. Обоснование изменения (увеличения) удельного сцепления глинистого грунта при погружении свай сваебойным агрегатом или статическим вдавливанием.** Рассматривается третий этап погружения свай сваебойным агрегатом, соответствующий времени, когда после каждого нового удара молота по голове сваи грунт в формирующемся уплотненном ядре уплотняется до плотности  $\rho$  ( $\text{т/м}^3$ ), при которой грунт переходит в водонасыщенное состояние ( $S_r = 1$ ) при естественной влажности  $W$ . Далее процесс погружения сваи после каждого удара молота по голове сваи происходит за счет вытеснения энергией удара воды из пор грунта, деформации массива, составляющей энергии удара молота по голове сваи (формирование отказа сваи), то есть формируется энергетический баланс при погружении сваи сваебойным агрегатом, который записывается равенством  $E_m = E_1 + E_2$ , где  $E_m$  – энергия удара молота по голове сваи;

$E_1$  – работа, затрачиваемая на выдавливание воды из пор грунта;

$E_2$  – энергия, затрачиваемая на деформацию массива грунта, объем пор которого освободился от воды за счет вытеснения ее из пор грунта, составляющей энергией молота  $E_1$ .

После каждого удара молота по голове сваи и формирования отказа сваи деформации массива грунта под сформированным уплотненным ядром происходит уменьшение расстояния между агрегатами глинистых частиц массива грунта (возможно, на молекулярном уровне), что приводит к притяжению частиц грунта на молекулярном (агрегатном) уровне и далее к увеличению сил сцепления между глинистыми частицами (агрегатами).

Так как рассматривается третий этап погружения свай, грунт в уплотненном ядре находится в водонасыщенном состоянии, то для такого состояния возможно применение

теории (гипотезы) электромолекулярных сил притяжения между частицами, которые действуют на весьма близком расстоянии от поверхности частиц. Величина этих сил у поверхности минеральных частиц, определяемая молекулярным притяжением частиц, очень большая, но по мере удаления от этих частиц быстро (снижается) стремится к нулю  $\rightarrow 0$ .

У самой поверхности минеральных частиц в водонасыщенном грунте электромолекулярные силы велики и достигают 100 и более кПа, а молекулы воды, окружающие минеральные частицы в водонасыщенном грунте, подвергаются таким большим силам притяжения, что оказываются прочно связанными с поверхностью частиц и их не удается (практически невозможно) отделить от минеральных частиц даже (центробежными) центрифугированием, где развиваются усилия, превышающие давление от собственного веса грунта в несколько тысяч раз.

Это вместе с формированием связанной воды формирует и увеличивает внутренние силы удельного сцепления между агрегатами глинистых частиц, которые обратно пропорциональны диаметрам частиц. Этим и объясняется тот факт, что удельное сцепление в глинистых грунтах всегда в несколько раз больше, чем в песках. А в монтмориллоновых и бентонитовых глинах силы удельного сцепления между агрегатами глинистых частиц, которых в массиве находится до 60 – 70 %, достигают от 70 до 100 кПа при естественном состоянии (естественной влажности).

На основании вышеизложенного предполагается, что в связи с формированием электро-молекулярных сил, возникающих в массиве глинистого грунта при погружении свай сваебойным агрегатом, формированием уплотненного ядра (уплотненной платформы) происходит сокращение расстояний между агрегатами (глинистыми частицами), что приводит к увеличению сил притяжения между глинистыми частицами (агрегатами) и увеличению удельного сцепления грунта ( $C$ , кПа). С использованием указанных предпосылок аналитическая зависимость

изменения (увеличения) сил удельного сцепления грунта подстилающего слоя в процессе погружения свай сваебойным агрегатом может быть записана в виде:

$$C_i = C_n \cdot f(k, l_{cb} \cdot I_L) / a, \quad (1)$$

где:  $l_{cb}$  – активная длина свай, соответствующая длине погруженной сваи за вычетом участка сваи длиной, равной  $Z$ , с которой начинает формироваться уплотненное ядро;

$a$  – отказ сваи, принимается по данным динамических испытаний свай на момент погружения;

$I_L$  – показатель консистенции грунта подстилающего слоя на момент удара молота по голове сваи;

$C_n$  – исходное (начальное) значение удельного сцепления грунта подстилающего слоя (принимается по изысканиям);

$\psi$  – коэффициент долевого участия активной длины свай  $l_a$ , при формировании отказа сваи.  $\psi$  зависит от вида глинистого грунта  $\psi = f(I_p)$  и принимается равным:

$0,03 \leq I_p \leq 0,07$  – супесь –  $0,0001 \leq \psi \leq 0,0005$

$0,08 \leq I_p \leq 0,17$  – суглинок –  $0,0005 \leq \psi \leq 0,0009$

$0,17 \leq I_p \leq 0,30$  – глина (?) –  $0,0010 \leq \psi \leq 0,005$

$0,30 \leq I_p \leq 0,50$  – глина (?) –  $0,005 \leq \psi \leq 0,01$

$0,50 \leq I_p \leq 0,70$  – глина (?) –  $0,01 \leq \psi \leq 0,10$ .

Так как формирование «отказа» сваи от удара молота по голове сваи зависит от количества выдавленной воды из активной толщи подстилающего уплотненное ядро (платформу) слоя, коэффициент фильтрации в этом случае играет важную роль в формировании «отказа» сваи (прямо пропорциональная зависимость «отказа» от коэффициента фильтрации грунта подстилающего слоя). В этом случае проявляется обратно пропорциональная зависимость коэффициента долевого участия формирования «отказа» сваи  $\psi$  от коэффициента фильтрации  $K = f(K_f)$ . Так как коэффициент фильтрации зависит от напорного градиента  $H$  в прямо пропорциональной зависимости, то с увеличением  $K_f$  и  $H$  коэффициент долевого участия  $\psi$  соответственно уменьшается.

Таким образом, формирование удельного сцепления в подстилающем уплотненное ядро слое происходит с участием изменяемых в процессе забивки сваи характеристик

грунта этого же подстилающего слоя, а именно:

$$C_i = C_n \left(1 - \frac{\psi \cdot l_{cb} \cdot I_L}{a}\right), \quad (2)$$

где:  $I_L$  – показатель текучести этого же подстилающего слоя (величина переменная в процессе (забивки) погружения сваи);

$a$  – «отказ» сваи по данным замеров (зависит от вида грунта при постоянной энергии удара  $E$ ;

$K_f$  – коэффициент фильтрации зависит от вида глинистого грунта подстилающего слоя, его сформированного напорного градиента при постоянной энергии удара  $E$ ;

$\psi$  – как показано выше, зависит от вида грунта  $I_p$ ,  $K_f$  подстилающего слоя.

Отсюда справедливо будет зависимость формирования удельного сцепления  $C$  (кПа) подстилающего слоя выразить зависимостью

$$C_i = f(I_p, I_L, K_f, \psi, \rho, E \dots) \quad (3)$$

многофакторная зависимость.

**1.1. Представление формирования прочностных показателей глинистого грунта подстилающего слоя при погружении свай сваебойным агрегатом.** Начиная с третьего этапа погружения сваи, когда подстилающий уплотненное ядро слой становится водонасыщенным ( $S_r = 1$ ) за счет ударной нагрузки (интервал удара принимается по паспортным данным сваебойного агрегата), изменяется напорный градиент (увеличивается), в подстилающем уплотненное ядро слое. Увеличивается коэффициент фильтрации, что приводит к усилению выдавливания воды из пор грунта. Объем выдавленной воды будет равен величине объемной деформации:

$$(V_o = A_{я} \cdot a), \quad (4)$$

где:  $A$  – площадь уплотненного ядра – проекция на горизонтальную плоскость;

$a$  – деформация активного подстилающего слоя – «отказ» сваи.

Активная толщина подстилающего слоя с каждым последующим ударом молота по голове сваи будет уменьшаться на величину «отказа». После каждого удара объем активного подстилающего слоя уменьшается, причем уменьшение активной толщины подстилающего слоя погашается включением в толщу новой, еще «не деформирован-

ной» нижней части активного подстилающего слоя. При этом уменьшается объем вытесненный из пор грунта воды после каждого последующего удара, что приводит к уменьшению «отказа» при всех последующих ударах. При этом следует учесть, что после каждого удара уменьшается влажность грунта на  $\Delta W$ , что приводит к уменьшению расстояний между частицами грунта, снижению показателя текучести грунта  $I_L$ .

Таким образом, при деформации подстилающего слоя изменяются прочностные показатели грунта подстилающего слоя  $C$  (кПа),  $\phi$  (град), которые и будут полностью зависеть от изменения расстояний между частицами и изменения (снижения) показателя текучести этого грунта. А так как расстояния между частицами грунта могут характеризоваться пористостью или коэффициентом пористости ( $n$ ,  $e$ ) грунта подстилающего слоя, характеристики этого грунта  $C$  (кПа),  $\phi$  (град) можно представить через показатель текучести  $I_L$  и коэффициент пористости  $e$ .

Таким образом, после каждого удара молота по голове сваи активная толща подстилающего слоя деформируется на величину равную, а – «отказу» сваи. А активная толща подстилающего слоя при передаче на него ударной нагрузки от сваебойного агрегата будет считаться (условно) равной трем диаметрам уплотненного ядра, т. е.:

$H_a = 6 l_{\text{асв}} \cdot \text{tg} \frac{\phi}{4}$  (по исходным характеристикам грунта подстилающего слоя).

Если «отказ» а сваи - неконсолидированная деформация активной толщи подстилающего слоя от передачи на него мгновенной ударной нагрузки, то объемная деформация  $D_o$  будет соответствовать объему воды, вытесненной из пор грунта активного подстилающего слоя при передаче на него ударной нагрузки. При этом влажность  $W$  грунта после каждого удара будет изменяться на величину  $\Delta W$ , равную объемной деформации:

$$V_o = A_{\text{я}} \cdot a = a \cdot \frac{[(2l_{\text{св}} \cdot \text{tg} \frac{\phi}{4}) \pi]^2}{4}, \quad (5)$$

а показатель текучести  $I_L$  грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, будет определяться по формуле:

$$\Delta I_L = (W - \Delta W - W_p) / I_p. \quad (6)$$

Причем эта величина не меняется на постоянную величину, а тоже уменьшается после каждого удара молота по голове сваи от предыдущего удара. В общей зависимости изменение показателя текучести  $I_L$  можно представить зависимостью последовательного уменьшения его значения, начиная от исходного значения  $I_L = \frac{W - W_p}{I_p}$  до последующих после каждого удара молота.  $I'_L = I_L - \Delta I'_L$ ;  $I''_L = I'_L - \Delta I''_L$ ;  $I'''_L = I''_L - \Delta I'''_L$  и т. д.

Если  $\Delta I_L$  соответствует изменению влажности после каждого удара молота, то как изменяется объемная деформация активного подстилающего слоя, который, в свою очередь, не подчиняется аналогичной схеме изменения толщины активной мощности подстилающего слоя, а остается равной

$H_a = 6 l_{\text{св}} \cdot \text{tg} \frac{\phi_{\text{ср}}}{4}$  (приблизительно). При этом длина сваи принимается равной длине погруженной сваи в грунт с вычетом (глубины) длины  $Z$ , с которой начинает формироваться уплотненное ядро:

$$Z = \frac{-f \cdot u \pm \sqrt{(f \cdot u)^2 + 4 \cdot \gamma \cdot u \cdot \sigma \cdot A}}{2 \cdot \gamma \cdot u} \quad (7)$$

и изменяется с глубиной погружения сваи (увеличивается).

С увеличением глубины погружения соответственно увеличивается: диаметр уплотненного ядра, толща активного подстилающего слоя, усиливается объемная деформация активного подстилающего слоя, которая, в свою очередь, зависит от объема вытесненной воды из пор грунта после каждого удара молота по голове сваи (при постоянной энергии удара), что приводит к уменьшению пористости ( $n$ ) или коэффициента пористости ( $e$ ), и уменьшению «отказа» сваи ( $a$ ). При этом в пределах возможной точности замера уменьшается «отказ» сваи, который можно принять непостоянным, а изменяющимся по закону:

$$"a" = S = \beta \sum \frac{\sigma_{\text{ср}} \cdot h_{\text{э.л}}}{E}, \quad (8)$$

где:  $\sigma_{\text{ср}}$  – среднее напряжение под уплотненным ядром,  $\sigma_{\text{ср}} = \frac{P_4 \cdot K}{A_{\text{я}}}$ ;

$h_{\text{э}}$  – толщина элементарного слоя деформируемого грунта (принять равным  $0,2A_{\text{я}}$ );

$A_{я}$  – проекция площади уплотненного ядра на горизонтальную плоскость:

$$A_{я} = \frac{\pi(2l_{св} \cdot tg\frac{\varphi_0}{4})^2}{4}; \quad (9)$$

$K$  – коэффициент динамичности передаваемой нагрузки,  $K = \sim 1,5$ ;

$\varphi$  – угол внутреннего трения грунта подстилающего слоя.  $\varphi_0$  принимается по данным изысканий, а последующие значения после каждого удара (с третьего этапа погружения) молота вычисляются по выражению:

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\varphi_1; \varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi_2; \varphi_3 = \varphi_2 + \Delta\varphi_3 \text{ и т. д.};$$

$\Delta\varphi$  – приращение угла внутреннего трения от каждого удара молота по голове сваи.

Как изменяется  $\Delta\varphi$ ?

Так как среднее давление под подошвой уплотненного ядра можно считать постоянным, «отказ» сваи будет зависеть от модуля деформации  $E$  подстилающего слоя на момент удара – зависимость обратно пропорциональна. Если величиной «отказа» задаться ( $a = 2; 1,8; 1,6; \dots 1,0; 0,9; 0,8 \dots 0,1$ ) см.

Для составления таблицы изменения удельного сцепления грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, при погружении сваи сваебойным агрегатом, использованы следующие физико-механические характеристики грунта подстилающего слоя:  $W_L = 0,29$ ;  $W_p = 0,17$ ;  $I_p = 0,12$ ;  $W = 0,17$ ;  $I_i = 0$ ;  $\rho_s = 2,68 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho = 1,78 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho_d = 1,52 \text{ т/м}^3$ ;  $C_0 = 25 \text{ кПа}$  на строительной площадке центральной правобережной части г. Днипра.

Таблица 1

Зависимость изменения удельного сцепления  $C$  (кПа) от «отказа» сваи  $0,1 \leq d \leq 2,0$  см и от показателя текучести  $-0,1 < I_L \leq -1,0$

$I_L$ «а» см	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	$\pm 0$ -0,01	Примечания
2,0	30,625	30,065	29,50	28,94	28,375	27,81	27,04	26,70	26,125	25,56	25,056	
1,8	31,625	30,625	30,00	29,375	28,75	28,125	27,50	26,875	26,25	25,625	25,0625	
1,6	32,03	31,325	30,625	29,925	29,22	28,91	27,81	27,110	26,41	25,700	27,070	
1,4	33,04	32,232	31,430	30,625	29,82	29,02	28,21	27,410	26,61	25,800	25,080	
1,2	34,375	33,437	32,50	31,562	30,625	29,69	28,75	27,81	26,875	25,95	25,094	
1,0	36,25	35,125	34,00	32,875	31,75	30,625	29,50	28375	27,25	26,125	25,1125	
0,9	37,50	36,25	35,00	33,75	32,50	31,25	30,00	28,75	27,50	26,250	25,125	
0,8	39,06	37,655	36,25	34,84	33,44	32,03	30,625	29,22	27,81	26,410	25,140	
0,7	41,07	39,465	37,86	36,25	34,64	33,04	31,43	29,82	28,21	26,610	25,160	
0,6	43,75	41,875	40,00	38,125	36,25	34,375	32,500	30,625	28,75	26,875	25,190	
0,5	47,50	45,25	43,00	40,75	38,50	36,25	34,00	32,50	29,50	27,25	25,225	
0,4	53,125	50,32	47,50	44,685	41,88	39,065	36,25	33,44	30,625	27,810	25,280	
0,3	62,50	52,72	60,00	51,250	47,50	43,75	40,00	36,25	31,82	28,750	25,375	
0,2	81,25	75,625	70,00	64,750	58,75	53,125	47,500	41,875	36,25	30,625	25,563	
0,1	137,5	126,25	115,00	103,75	92,50	81,625	70,00	58,75	47,50	36,250	26,125	

Для получения зависимости изменения удельного сцепления  $C$  (кПа) грунта подстилающего уплотненное ядро слоя – глинистого грунта - использованы математические решения компрессионной и Кулона-Мора зависимостей в виде:

$$C_i = C_0 \left(1 - \frac{\psi \cdot I_L \cdot l_{a,св}}{a}\right) \quad (10)$$

и с учетом, что грунт подстилающего уплотненное ядро слоя начала третьего этапа погружения сваи, находится в твердом состоянии ( $I_i$  – число отрицательное,  $I_L = 0$ ), то удельное сцепление грунта подстилающего уплотненное ядро слоя, после каждого

удара молота по голове сваи будет увеличиваться на величину

$$\Delta C_i = C_0 \left( + \frac{\psi \cdot I_L \cdot l_{св}}{a} \right), \quad (11)$$

где  $\psi$  – коэффициент долевого участия активной длины погруженной сваи при формировании «отказа» сваи, зависит от вида глинистого грунта  $\varphi = (I_p)$ ;

$I_L$  – показатель текучести глинистого подстилающего слоя на момент удара молота по голове сваи;

$l_{a,св}$  – активная длина сваи, соответствующая длине погружения сваи, за вычетом участка, длиной =  $Z$ ;

$a$  – величина «отказа» сваи (по замеру).

**2. Обоснование изменения (увеличения) угла внутреннего трения  $\phi$  глинистого грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, при погружении свай сваебойным агрегатом или статическим вдавливанием.** Используя те же направления исследования и анализа формирования характеристик подстилающего уплотненное ядро (платформу) слоя глинистого грунта при погружении свай сваебойным агрегатом, принимают за основу третий этап погружения свай, соответствующий времени, когда после каждого нового удара молота по голове сваи грунт в формирующемся уплотненном ядре уплотняется до плотности  $\rho$  ( $\text{т/м}^3$ ), при которой грунт переходит в водонасыщенное состояние при естественной влажности, т. е.:

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_s}{e} \cdot \rho_w = 1. \quad (12)$$

Далее процесс погружения свай после каждого удара молота по голове сваи происходит за счет выдавливания энергией удара воды из пор грунта, деформацией окружающего массива грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, которая (деформация) после каждого удара молота по голове сваи уменьшается за счет изменения плотности грунта подстилающего слоя (модуль деформации  $E_0$  – увеличивается, деформация уменьшается). За счет проявления деформации подстилающего слоя расстояние между частицами грунта уменьшается, что приводит к увеличению сил трения между частицами грунта, т. е.:

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_{zq} \cdot \text{tg} \phi + C, \\ a \text{tg} \phi &= (\tau - C) / \sigma_{zq}. \end{aligned} \quad (13)$$

Так как деформация подстилающего слоя проявляется только после выдавливания воды из пор грунта подстилающего слоя и перемещения воды вниз по направлению движения молота то с каждым последующим ударом молота по голове сваи деформация подстилающего слоя уменьшается на объем, равный объемной деформации подстилающего слоя. При этом объемная деформация подстилающего слоя с последующим ударом молота и передачи ударной нагрузки через уплотненное ядро (платформу) на подстилающий слой понижается и при постоянном значении классификационных показателей глинистого грунта показатель

консистенции  $I_L$  понижается (уменьшается), грунт подстилающего слоя становится твердым. При этом расстояние между частицами грунта уменьшается. Это дает право утверждать, что сопротивление сдвигу грунта увеличивается, увеличивается угол внутреннего трения грунта  $\phi$ , подстилающего уплотненное ядро (платформу) слоя. При этом:

1) площадь уплотненного ядра (горизонтальная проекция)  $A_{\text{я}} = \pi (1 - \text{tg} \phi / 4)^2$ ;

2) отказ сваи принимается по натурным замерам или может быть задан ( $a = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 \dots$ ) см;

3) объемная деформация  $D_0 = A_{\text{я}} \cdot "a"$ ; («а» – «отказ» сваи);

4) начальная плотность грунта  $\rho_d$  – принимается по данным изысканий для грунта, подстилающего уплотненное ядро (платформу) слоя;

5) природная влажность грунта подстилающего слоя  $W$  принимается по изысканиям;

6) пористость или коэффициент пористости грунта подстилающего слоя принимается по данным изысканий или вычисляется по основным характеристикам грунта;

7) степень водонасыщения грунта подстилающего слоя принимается по данным изысканий или по расчету;

8) количество воды, вмещающееся в единицу объема грунта подстилающего слоя  $v_w = n \cdot S_r$ ;

9) приращение объема воды после каждого удара  $= - (v_w - A_{\text{я}} \cdot a)$ ;

10) при этом показатель текучести  $I_L$  грунта подстилающего слоя понижается на величину  $\Delta I_L = (v_i - W_p) / I_p$ , грунт подстилающего слоя твердеет.

В комбинации процессов: уменьшение расстояния между частицами грунта (агрегатами) и снижение показателя текучести  $I_L$  грунта подстилающего слоя приводит к увеличению коэффициента трения грунта по грунту ( $f = \text{tg} \phi$ ) к увеличению угла внутреннего трения  $\phi$ . При этом расчетное сопротивление грунта подстилающего слоя  $R$  – под («нижним концом сваи») под уплотненным ядром (платформой) увеличивается и может быть определено по формуле Н. П. Пузыревского, преобразованной ДБН В.2.1-10-2009 и действовавшими СНиП к виду:



$$R = \frac{\gamma_{ci}\gamma_{cr}}{K_i}(M_\gamma \cdot b \cdot \gamma \cdot K_z + M_d \cdot d \cdot \gamma'_{II} + M_c \cdot C,$$

где для данного варианта – основания свайных фундаментов следует принять:

$\gamma_{ci}$  – коэффициент условия работы грунта подстилающего слоя (от вида грунта);

$\gamma_{cr}$  соответствующего принятым исходным данным рекомендуется принять

$\gamma_{ci} = \gamma_{cr} = 1,1$ ; так как грунт подстилающего уплотненное ядро слоя;

$K_i$  – коэффициент, принимаемый равным 1,1.

$M_\gamma, M_g, M_c$  – коэффициенты, зависящие от угла внутреннего трения подстилающего слоя  $\varphi$ , вычисляются по формулам:

$$M_\gamma = \frac{0,25\pi}{ctg\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}; M_g = 1 + \frac{\pi}{ctg\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}};$$

$$M_c = \frac{\pi \cdot ctg\varphi}{ctg\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}}$$

и сведены в таблицу Е.8, действующего ДБН В.2.1-10-2009, или в таблицы действовавших СНиП II.15-74, СНиП 2.02.01-83... и т. д.

**2.1. Основные положения по формированию частных прочностных показателей грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, при погружении свай сваебойным агрегатом.** Как уже сообщалось выше, начиная с третьего этапа погружения свай (подстилающий слой грунта под уплотненным ядром становится водонасыщенным ( $S_r = 1$ ), за счет ударной нагрузки, передаваемой через уплотненное ядро на подстилающий слой, изменяется напорный градиент  $H$  этого слоя, т. е. увеличивается напорный градиент в подстилающем уплотненное ядро слое грунта. При этом увеличивается коэффициент фильтрации  $K_\phi$  этого слоя, что приводит к увеличению объема выдавливаемой воды из пор грунта  $A_\gamma \cdot a = v_w$ .

Активная толща подстилающего слоя с каждым последующим ударом молота уменьшается на величину отказа  $a$ , потому что после каждого удара молота по голове сваи объем активного подстилающего слоя уменьшается, причем уменьшение активной толщины подстилающего слоя погашается «включением» в толщу новой еще «недеформируемой» части активного подстилающего слоя.

При этом уменьшается объем вытесненной из пор грунта воды после каждого по-

следующего удара молота, уменьшается деформация подстилающего уплотненное ядро слоя. Следует учесть, что после каждого удара уменьшается влажность грунта на  $\Delta W$ , что приводит, за счет проявляющейся деформации слоя, к уменьшению расстояний между частицами грунта, понижению показателя текучести  $I_L$  грунта.

Таким образом, после каждого удара молота по голове сваи активная толща подстилающего слоя деформируется на величину, равную «отказу»  $a$  сваи. А активная толща подстилающего слоя при передаче на него ударной нагрузки от сваебойного агрегата будет считаться равной (условно) трем диаметрам уплотненного ядра.

То есть  $H_a = 3 \cdot 2l_{cb} \cdot tg \frac{\varphi}{4}$  (характеристики по исходным данным грунта подстилающего слоя). Если «отказ» сваи – это неконсолидированная деформация активной толщи подстилающего слоя от передачи на него мгновенной ударной нагрузки, то объемная деформация  $D_o$  будет соответствовать объему воды, вытесненной из пор грунта активного подстилающего слоя при передаче на него ударной нагрузки. При этом влажность грунта  $W$  после каждого удара будет (уменьшаться) изменяться на величину  $\Delta W$ , равную объемной деформации  $|v_o = A_\gamma \cdot a| = (a \cdot 2l_{cb} \cdot tg \frac{\varphi}{4} \cdot \pi)^2$ , а показатель текучести  $I_L$  грунта подстилающего уплотненное ядро слоя будет определяться по формуле:

$$\Delta I_L = W - \Delta W - W_p / I_p, \quad (14)$$

причем этот показатель не меняется на постоянную величину, а также уменьшается после каждого удара молота по голове сваи от последующего удара на расчетную величину. А так как расстояние между частицами грунта могут характеризоваться пористостью или коэффициентом пористости ( $n$  или  $e$ ) грунта подстилающего слоя, то характеристики этого грунта  $C$  (кПа) и  $\varphi$  (град) можно представить через показатель текучести  $I_L$  и коэффициент пористости  $e$ .

В сложившейся ситуации с каждым последующим ударом молота по голове сваи проявляется неконсолидированная деформация активной толщины подстилающего уплотненное ядро слоя, за счет уплотнения ее активной толщи и изменения деформационных характеристик грунта активной толщи

(увеличения модуля деформации), а также сокращений расстояния между частицами грунта, что приводит к увеличению сил тре-

ния грунта по грунту  $\tau = \sigma_{zq} \cdot tg\varphi + C$  (изменению в сторону увеличения) угла внутреннего трения  $\varphi$  и удельного сцепления  $C$ .

Таблица 2

*Зависимость коэффициента  $\xi$  от вида грунта подстилающего слоя*

№ п/п	Вид грунта	Содержание глинистых частиц, %	Число пластичности $I_p$	Коэффициент фильтрации $K_\phi$	м/сутки	$\xi$ – долевое участие
1	супесь	$3,0\% \leq \delta \leq 10\%$	$0,01 \leq I_p \leq 0,07$	$10^{-6} \leq K_\phi \leq 10^{-3}$ (см/сек = 8,64 м/сутки)	$0,08 < K_\phi$	$0,0010 < \xi \leq 0,0050$
2	суглинок	$10\% < \delta \leq 30\%$	$0,07 < I_p \leq 0,17$	$10^{-7} \leq K_\phi \leq 10^{-5}$ см/сек		$0,0001 < \xi \leq 0,005$
3	глина четвертичная	$30\% \leq \delta \leq 50\%$	$0,17 < I_p \leq 30$	$10^{-9} \leq K_\phi \leq 10^{-7}$ см/сек	$10^{-6} \leq K_\phi \leq 10^{-4}$	$0,00001 \leq \xi \leq 0,00005$
4	глина третичная монтмориллонит	$50\% \leq \delta \leq 70\%$	$0,30 < I_p \leq 50$	$10^{-11} \leq K_\phi \leq 10^{-9}$ см/сек	$10^{-8} \leq K_\phi \leq 10^{-6}$	$0,000001 < \xi \leq 0,000005$
5	глина третичная бентонит	$70\% < \delta$	$0,50 < I_p \leq 0,70$	$10^{-14} \leq K_\phi \leq 10^{-11}$ см/сек	$10^{-11} \leq K_\phi \leq 10^{-8}$	$0,0000001 < \xi < 0,0000005$
			$0,70 < I_p$	$K_\phi < 10^{-14}$ см/сек	$K_\phi < 10^{-11}$	$0,0000005 < \xi < 0,0000009(10)$

Таблица 3

*Изменение угла внутреннего трения  $\varphi$  (частные значения) грунта подстилающего уплотненное ядро слоя от величины «отказа» сваи  $a$  и показателя текучести  $I_L$*

«а» см $I_L$	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	$\pm 0$
2,0	25,90	25,35	25,10	24,80	24,00	24,30	24,0	23,80	23,50	23,20	
1,8	26,60	25,60	25,30	25,00	24,70	24,45	24,15	23,85	23,60	23,25	
1,6	26,90	25,90	25,60	25,25	24,95	24,60	24,30	24,00	23,65	23,30	
1,4	27,10	26,30	25,95	25,60	25,20	24,90	24,50	24,10	23,75	23,35	
1,2	27,80	26,90	26,45	26,00	25,60	25,20	24,70	24,30	23,85	23,45	
1,0	28,75	27,65	27,15	26,60	26,10	25,60	25,10	24,50	24,00	23,50	
0,9	29,40	28,20	27,60	27,00	26,45	25,90	25,30	24,70	24,15	23,60	
0,8	30,20	28,80	28,20	27,55	26,90	26,25	25,60	24,90	24,30	23,65	
0,7	31,45	29,65	28,90	28,20	27,50	26,70	25,95	25,20	24,50	23,75	
0,6	32,65	30,75	29,90	29,00	28,20	27,30	26,45	25,60	24,70	23,85	
0,5	34,50	32,30	31,80	30,25	29,20	28,40	27,15	26,10	25,10	24,00	
0,4	37,40	34,65	33,35	32,10	30,80	29,50	28,20	26,90	25,60	24,30	
0,3	42,10	38,50	36,80	35,10	33,35	31,65	29,90	28,20	26,45	24,70	
0,2	51,75	46,25	43,70	40,55	38,50	40,00	33,35	30,80	28,20	25,85	
0,1	80,50	69,60	64,40	59,25	54,00	48,90	43,70	38,50	33,30	28,20	

Так как все деформационные процессы грунта, расположенного под подошвой уплотненного ядра, ведут к изменению (снижению) «отказа» сваи (зависимость обратно пропорциональна), целесообразно было бы найти зависимость изменения прочностных показателей (угла внутреннего трения  $\varphi$ ), подстилающего уплотненное ядро слоя грунта от «отказа» сваи, то есть  $\varphi = f(a)$

с известной уже обратно пропорциональной зависимостью. Согласно Г. К. Корн и Т. К. Корн (справочник по математике), а также Бронштейну и Семендяеву (справочник по математике), зависимость угла внутреннего трения  $\varphi$  от показателя текучести  $I_L$  и от «отказа» сваи  $a$  может быть представлена выражением в виде:

$$\varphi_i = \varphi_o \left(1 - \frac{l_{cb} \cdot I_L \cdot \xi}{a}\right), \quad (15)$$

где:  $\varphi_o$  – угол внутреннего трения грунта подстилающего слоя (принимается по изысканиям);

$I_L$  – показатель текучести грунта, подстилающего ядро слоя на момент последующего удара молота по голове сваи;

$l_{cb}$  – активная длина погружаемой сваи (для нашего варианта  $l_{cb} = 9,0$  м);

$\xi$  – коэффициент долевого участия активной длины сваи при формировании «отказа» сваи, зависит от вида грунта подстилающего слоя (табл. 2).

Для составления таблицы зависимости изменения угла внутреннего трения  $\varphi$  подстилающего уплотненное ядро слоя при погружении свай сваебойным агрегатом использованы физико-механические характеристики грунта подстилающего слоя строительной площадки правобережной центральной части г. Днипро со следующими показателями:  $W_L = 0,29$ ;  $W_p = 0,17$ ;  $I_p = 0,12$ ;  $W = 0,17$ ;  $I_L = 0$ ;  $\rho_s = 2,68$  т/м<sup>3</sup>;  $\rho = 1,78$  т/м<sup>3</sup>;  $\rho_d = 1,52$  т/м<sup>3</sup>;  $C_o = 25$  кПа;  $\varphi_o = 23^\circ$ .

*Примечание:*

Полученные результаты определения угла внутреннего трения  $\varphi$  подстилающего уплотненное ядро слоя глинистого грунта, приведенные в таблице 3, с использованием «компрессионной» зависимости  $\varphi_i = f(l_{cb,a}, I_L, \xi)$  и определенные значения удельного сцепления грунта  $C$  того же подстилающего уплотненное ядро слоя, с использованием той же зависимости:

$C_i = f(l_{cb,a}, I_L, \psi)$ , как частные значения для данного грунта не являются догмой и могут быть откорректированы по скорректированному значению коэффициента долевого участия  $\psi$  – для удельного сцепления –  $C_i$ , и  $\xi$  – для угла внутреннего трения –  $\varphi$ .

Для этого следует использовать частные значения классификационных показателей  $I_p$  глинистого грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, указанные в отчете об инженерно-геологических изысканиях для строительства на заданной площадке, выполненных сертифицированной изыскательской организацией. Корректировку коэффициента  $\psi$  и  $\xi$  – долевого участия формирования «отказа» сваи  $a$  следует выполнять по формулам:

$$\psi_i(\xi_i) = \frac{\psi_o(\xi_o) \cdot I_{p \min}}{I_{p \max}} \quad \text{– для супесей, суглинков, глин легких;}$$

$$\psi_i(\xi_i) = \frac{\psi_o(\xi_o) \cdot I_{p \max}}{I_{p \min}} \quad \text{– для супесей, суглинков, глин тяжелых,}$$

где:  $\psi_o(\xi_o)$  – табличные значения коэффициентов долевого участия формирования «отказа» сваи  $a$ ;

$I_{p \min}$  – меньшее граничное значение числа пластичности грунта подстилающего слоя;

$I_{p \max}$  – большее граничное значение числа пластичности грунта подстилающего слоя;

$\psi_i(\xi_i)$  – скорректированные коэффициенты долевого участия формирования «отказа» сваи  $a$ .

**3. Определение несущей способности свай.** Так как нами предлагается измененная расчетная схема сваи не как стержень, защемленный в грунте, воспринимающий нагрузку от надстройки и передающий эту нагрузку на нижние слои грунта путем сопротивления грунта по острию (лобовое сопротивление) и трением грунта на боковую поверхность ствола сваи, а как стержень, заземленный в грунте, воспринимающий нагрузку от надстройки и передающий эту нагрузку через уплотненное ядро (платформу), сформированное вокруг острия сваи, на нижние слои грунта, являющиеся подстилающим рабочим слоем для уплотненного ядра. Уплотненное ядро в этом случае служит как фундамент, передающий нагрузку от надстройки на нижний подстилающий слой грунта. Глубина заложения условного фундамента равняется отметке острия сваи плюс радиус уплотненного ядра, т. е.

$$d = l_{cb} \left(1 + tg \frac{\varphi_{cp}}{4}\right) \text{ от данной поверхности.}$$

На основании вышеизложенного предлагается следующая последовательность определения несущей способности сваи:

- Определяются геометрические размеры уплотненного ядра (диаметр, радиус) по исходным характеристикам грунта, окружающего сваю:

$$D = 2l_{cb} \cdot tg \frac{\varphi_{cp}}{4}; \quad r = l_{cb} \cdot tg \frac{\varphi_{cp}}{4}. \quad (16)$$

- Вычисляется глубина заложения подошвы «условного фундамента» относительно подошвы ростверка по формуле:

$$d_p = l_{cb} \left(1 + tg \frac{\varphi}{4}\right). \quad (17)$$

- Определяется глубина заложения подошвы «условного фундамента» относительно дневной поверхности  $d = l_{св} + d_p$ .

- По инженерно-геологическому разрезу и глубине заложения подошвы «условного фундамента» устанавливается вид грунта, подстилающего уплотненное ядро (глинистого грунта) и определяется коэффициент долевого участия формирования «отказа» сваи, согласно представленным таблицам 1, 3.

- По замеренному «отказу» сваи и показателю текучести подстилающего слоя определяется угол внутреннего трения  $\varphi$  грунта подстилающего слоя.

- По определенному значению угла внутреннего трения подстилающего слоя вычисляются безразмерные коэффициенты (или принимаются по таблицам)

$$M_\gamma = \frac{0,25\pi}{ctg\varphi + \varphi - \pi/2}; M_g = 1 + \frac{\pi}{ctg\varphi + \varphi - \pi/2};$$

$$M_c = \frac{\pi \cdot ctg\varphi}{ctg\varphi + \varphi - \pi/2};$$

( $\varphi$  – радиан).

- Вычисляется по уже известным характеристикам подстилающего слоя –  $\gamma$  т/м<sup>3</sup>; диаметра уплотненного ядра –  $D = 2l_{св} \cdot tg \frac{\varphi}{4}$ , удельному сцеплению  $C_i$ , расчетное сопротивление  $R$  грунта подстилающего слоя, служащего основанием уплотненного ядра (уплотненной платформы) по действующим формулам ДБН.В.2.1-10-2009:

$$R = \frac{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2}}{K} (M_\gamma \cdot D \cdot \gamma \cdot K_z + M_d \cdot d \cdot \gamma \cdot M_c \cdot C);$$

- Имея расчетное сопротивление грунта основания  $R$  и площадь «подошвы фундамента» (горизонтальная проекция основания уплотненного ядра), вычисляют несущую способность сваи  $F_d$ .

$$F_d = K_F \cdot R \cdot A, \text{ (кН), т,} \quad (18)$$

где:  $K$  – коэффициент условий работы сваи с учетом уплотненного ядра;

$R$  – расчетное сопротивление грунта подстилающего слоя (основания);

$A$  – площадь уплотненного ядра (горизонтальная проекция).

Коэффициент условий работы  $K$  зависит от длины сваи.

**Выводы.** Задаваясь целью упростить расчет несущей способности забивных свай в глинистых грунтах, приходим к варианту учета (длительной) изменения прочности

грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя во времени, т. е. к учету изменения напряженного состояния массива грунта от воспринимающих им нагрузок от «свайного» фундамента при сформированной деформации (установившейся постоянной деформации, т. е. учету релаксации подстилающего уплотненного ядра массива глинистого грунта. При этом следует учесть, что после проявления процесса релаксации (снижения напряжений) начинает, в свою очередь, проявляться процесс реформации (т. е. восстановления) исходного состояния массива глинистого грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя. Это приводит к формированию нового витка графика стабилизации упругих свойств глинистого грунта.

При постоянно действующей статической нагрузке (после погружения сваи) от эксплуатируемого здания процесс релаксации и реформации массива грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, приводит к установившемуся для подстилающего слоя пределу уплотнения, исчерпывающему остаточные деформации, и формированию только упругих при действии на массив грунта постоянных нагрузок.

Хворолевым впервые было установлено и сделано предположение, что изменение сопротивления глинистого грунта сдвигу во времени связано с удельным сцеплением  $C$  и не зависит от угла внутреннего трения  $\varphi$ .

А полное удельное сцепление  $C$  может быть представлено как состоящее из двух компонентов:  $C = C_v + C_u$ .

Учитывая вышеизложенное, нами предлагается определять расчетное сопротивление грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, с учетом изменения прочностных характеристик этого грунта в процессе погружения свай сваебойным агрегатом.

Основным показателем для определения прочностных характеристик грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, принята величина «отказа» сваи  $a$ , получаемая при погружении свай сваебойным агрегатом, величина ударной части молота, которая по весу не менее веса сваи (кН). При этом для контроля нет необходимости проводить пробную забивку сваи, а выполнять контроль (замерять величину «отказа»  $a$  в процессе проектного погружения свай.

Для составления таблицы частных значений изменения прочностных показателей грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, выбраны показатели:

- «отказ» сваи ( $a = 0,001 \div 0,02$  м);

- показатель текучести грунта подстилающего слоя  $I_L$ . Так как формирование уплотненного ядра вокруг острия сваи нами принимается с третьего этапа погружения сваи ( $W \leq W_p$ ), показатель текучести грунта подстилающего слоя  $I_L$  будет находиться в пределах  $I_L < 0$ .

С нами принят интервал  $0 \leq |I_L| \leq -1,0$ . С учетом того, что грунт в уплотненном ядре находится постоянно в твердом состоянии, и в таком же твердом состоянии находится пограничный слой между уплотненным ядром и подстилающим ядро слоем;

- коэффициент долевого участия при формировании «отказа» сваи ( $a$ ) –  $\psi$ , который зависит от вида глинистого грунта подстилающего слоя (число пластичности  $I_p$  и зернового состава глинистого грунта) и представлены в таблице 2.

Учитывая предположение Хворалева, что изменение сопротивления сдвигу во времени связано с удельным сцеплением  $C$  и практически не зависит от угла внутреннего трения  $\phi$ , полученное значение  $\phi$  расчетом не претерпевает (не релаксирует) изменения во времени и остается практически постоянным, за основу при принятии частного значения  $\phi = f(a)$  остается постоянным и для практических целей следует принимать без учета времени  $t$ .

Для удельного сцепления  $C$  следует ввести коэффициент релаксации  $r$ , зависящий от времени  $r = f(t)$  и полученное расчетом значение  $C$  корректируется коэффициентом  $r$  как произведение  $C = C \cdot r$ . Коэффициент релаксации  $r$  подобен коэффициенту консолидации  $K$ , который определяется по формуле:

$$K = K_\phi \cdot (1 + l_{св}) / a \cdot \rho_w,$$

где:  $K_\phi$  – коэффициент фильтрации грунта подстилающего слоя;

$l_{св}$  – активная длина сваи;

$a$  – коэффициент сжимаемости;

$\rho_w$  – плотность воды ( $т/м^3$ ).

Если релаксация – это изменение напряженного состояния массива грунта при постоянной деформации во времени, т. е.

$\sigma = f(t)$ , то коэффициент релаксации показывает, с какой скоростью изменяются напряжения в массиве грунта (при постоянной деформации для данного вида грунта – супесь, суглинок, глина) – кПа/час, кПа/сутки, кПа/год и зависит от исходных параметров грунта подстилающего уплотненное ядро слоя (принимается по данным изысканий ( $\rho_s$  кН/м<sup>3</sup>,  $\rho$  кН/м<sup>3</sup>,  $W$ ,  $W_L$ ,  $W_p$ ,  $\rho_d$ ,  $e$ ,  $E$  МПа).

Коэффициент релаксации  $r$  (Па/т, кПа/т, МПа/т) определяется по формуле:  $r = \frac{\sigma \cdot (1+e)}{t \cdot \beta}$

– для супесей и суглинков и  $r = \frac{\sigma \cdot (1+e) \cdot \beta}{t}$  –

для глин. Здесь  $\beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu^2}$ ,

$\mu$  – коэффициент боковой деформации.

### Последовательность определения несущей способности сваи

1. По заданному компрессионному изменению удельного сцепления  $C$  грунта подстилающего уплотненное ядро слоя определяется частное значение удельного сцепления  $C$  в зависимости от «отказа» сваи  $a$  и показателя текучести  $I_L$  глинистого грунта

$$C_i = C_0 \left(1 - \frac{\psi \cdot I_L \cdot l_{св}}{a^n}\right).$$

2. Аналогично, по тому же компрессионному закону определяется частное значение измененного угла внутреннего трения  $\phi$  грунта подстилающего уплотненное ядро слоя, по зависимости

$$\phi_i = \phi_0 \left(1 - \frac{l_{св} \cdot I_L \cdot \xi}{a^n}\right).$$

3. Определяются геометрические размеры уплотненного ядра по характеристикам грунта, формирующего уплотненное ядро в процессе погружения сваи –  $D_{я}$ ,  $I_{я}$ ;

$D_{я} = l_{св} \cdot tg \frac{\phi_{ср}}{4}$ , грунта, соответствующего  $I_L = 0$ . При естественной влажности  $W$ , т. е. плотность грунта вокруг острия сваи ( $e$ ,  $\rho_a$ ) соответствует состоянию, когда  $W = W_p$  (началу формирования уплотненного ядра).

4. Определяется глубина расположения подошвы уплотненного ядра:  $d = l_{св} + r_{ядра}$ .

5. Вычисляет расчетное сопротивление  $R$  грунта, подстилающего уплотненное ядро слоя, с использованием решения проф. Н. П. Пузыревского (или методику ДБН.В.2.1-10-2009, где так же используется это же решение).

6. Вычисляется (сопротивление сваи) несущая способность сваи:

$$F = R \cdot A_{\text{я}} = R \cdot \frac{\pi D_{\text{я}}^2}{4}. \quad (19)$$

7. Вычисляется возможная величина осадки подстилающего уплотненное ядро слоя по существующим методикам, принимаемым в ДБН.В.2.1-10-2009 или СНиП:

$$S = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zpi} - \sigma_{zpi}) \cdot h}{E} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zpi}}{E_{e,i}} \cdot h. \quad (20)$$

8. Определяется возможное сопротивление оседанию сваи (или свайного фундамента):  $F = U_{\text{я}} \cdot S \cdot f$ ,

где:  $U$  – периметр уплотненного ядра по максимальному диаметру  $U = \pi \cdot D_{\text{я}}$ ;

$S$  – возможная величина осадки;

$f$  – силы трения окружающего уплотненное ядро грунта по поверхности уплотненного ядра, принимаются по показателю те-

кучести  $I_L = 0$  и глубине расположения подошвы уплотненного ядра от поверхности природного рельефа.

9. Вычисляется полная несущая способность сваи:

$$F_d = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}}^2}{4} \cdot R + U_{\text{я}} \cdot S \cdot f. \quad (21)$$

10. По вычисленной полной несущей способности сваи  $F_d$  и передаваемых на свайный фундамент нагрузок  $N$ ,  $M$ ,  $Q$  определяется количество свай в свайном фундаменте  $n$ , выполняется распределение свай в плане; рассчитывается возможная нагрузка на одну сваю; выполняется расчет и проектирование ростверка согласно действующим нормативным документам.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свайные фундаменты. Нормы проектирования : СНиП II-Б.5-67\* / Госстрой СССР. – [Действие завершено 01.01.1979]. – Москва, 1968. – 31 с.
2. Свайные фундаменты. Нормы проектирования : СНиП II-17-77 / Госстрой СССР. – [Действие завершено 01.01.1987]. – Москва, 1978. – 48 с.
3. Свайные фундаменты : СНиП 2.02.03-85 / Госстрой СССР. – [Взамен СНиП II-17-77 ; введ. 1987-01-01]. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
4. Об'єкти будівництва та промислової продукції будівельного призначення. Основи та фундаменти будинків і споруд. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. – [Введ. вперше зі скасуванням на території України СНиП 2.02.01-83 ; чинні від 2009-07-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 107 с.
5. Бронин В. Н. Теория ползучести грунтов. Конспект лекций для слушателей факультета повышения квалификации преподавателей / В. Н. Бронин ; Ленинградский ордена Труд. Красного знамени инж.-строит. ин-т ; Мин-во Высш. и среднего спец. образования РСФСР. – Ленинград, 1978. – 52 с.
6. Свайные фундаменты / Н. М. Готов, А. А. Луга, К. С. Силин, К. С. Завриев. – Москва : Транспорт, 1975. – 432 с.
7. Добровольский К. И. Материалы для расчета оснований и фундаментов. Расчет свайных оснований Вып. 1. Аналитически-статический метод определения сопротивления свай / К. И. Добровольский. – Тифлис : Типолитограф. Правления ж. д. ЗСФСР, 1929. – 153 с. : рис., табл.
8. Кириллов В. С. Основания и фундаменты / В. С. Кириллов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1980. – 392 с.
9. Костерин Э. В. Основания и фундаменты / Э. В. Костерин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высш. школа, 1978. – 375 с.
10. Курдюмов В. И. Краткий курс оснований и фундаментов / В. И. Курдюмов. – Изд. 3-е. – Санкт-Петербург : Типография Ю. Н. Эрлих, 1902. – 297 с.
11. Маковский Л. В. Городские подземные транспортные сооружения : учеб. для вузов / Л. В. Маковский. – Москва : Стройиздат, 1979. – 472 с.
12. Маслов Н. Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними) : учеб. пособие для вузов / Н. Н. Маслов. – Москва : Стройиздат, 1977. – 320 с.
13. Моторный А. Н. Напряженно-деформированное состояние однородного массива грунта от нагрузки, передаваемой через ограниченную в плане площадь, приложенную внутри упругого однородного массива грунта / А. Н. Моторный, В. И. Большаков, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – № 3. – С. 22–30.
14. Моторный А. Н. Напряженно-деформированное состояние основания свайных фундаментов на лессовых просадочных грунтах при замачивании просадочной толщи снизу-вверх (подтопление территории) / А. Н. Моторный, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2014. – № 2. – С. 20–29.
15. Современные проблемы свайного фундаментостроения в СССР // Сборник тез. докл. Всесоюзного совещания-семинара / ВНИИ оснований и подзем. сооружений им. Н. М. Герсеванова ; Нац. ком. по механике грунтов и фундаментостроению ; под ред. А. А. Бартоломея. – Пермь : Перм. политехн. ин-т, 1988. – 149 с.
16. Моторный А. Н. Современные представления несущей способности забивных свай (по результатам погружения и работы, свай в грунте) / А. Н. Моторный, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2014. – № 8. – С. 32–42.

17. Цытович Н. А. Механика грунтов : краткий курс / Н. А. Цытович. – 4-е изд., вновь перераб. и доп. – Москва : Госстройиздат, 1963. – 636 с.
18. Опыт возведения сооружений методом «стена в грунте» / А. Л. Филахтов, Г. К. Лубенец, Н. В. Писанко, М. Г. Янкулин. – Киев : Будівельник, 1981. – 234 с.
19. Корн Г. К. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. К. Корн, Т. К. Корн ; пер. со 2-го амер. перераб. изд. И. Г. Арамановича [и др.] ; под общ. ред. И. Г. Арамановича. – Москва : Наука, 1973. – 831 с.

## REFERENCE

1. Pile foundations. Design standards: SNiP II-B.5-67 \* / Gosstroy of the USSR. - [Action completed 01/01/1979]. - Moscow, 1968. - 31 p.
2. Pile foundations. Design standards: SNiP II-17-77 / Gosstroy of the USSR. - [Action completed 01/01/1987]. - Moscow, 1978. - 48 p.
3. Pile foundations: SNiP 2.02.03-85 / Gosstroy of the USSR. - [Instead of SNiP II-17-77; enter 1987-01-01]. - Moscow: TsITP Gosstroy USSR, 1986. - 48 p.
4. Ob'kti budivnitstva and industrial production budivnogo priznachennya. Establish the foundations of budinki i sporud. Bottom up the foundations of the Sporud. The main provisions of the project: DBN V.2.1-10-2009. - [Enter For the first time on the territory of Ukraine SNiP 2.02.01-83; Chin vid 2009-07-01]. - Kyiv: Ministry of Regions of Ukraine, 2009. - 107 p.
5. Bronin VN Theory of soil creep. Summary of lectures for students of the faculty of advanced training of teachers / VN Bronin; Leningrad Order of Labor. Red Banner-no engineering.-Builds. in-t; Ministry of Higher. and secondary specials. Education RSFSR. - Leningrad, 1978. - 52 p.
6. Pile foundations / N. M. Glotov, A. A. Luga, K. S. Silin, K. S. Zavriev. - Moscow: Trans-port, 1975. - 432 p.
7. Dobrovolsky KI. Materials for the calculation of bases and foundations. Calculation of pile foundations. 1. Analytical-static method for determining the resistance of piles / K. I. Dobrovolsky. - Tiflis: Tipo-litgr. Board g. d. TSFSR, 1929. - 153 p. : fig.
8. Kirillov V.S. Foundations and foundations / V.S. Kirillov. - Ed. 2nd, Pererab. and add. - Moscow: Transport, 1980. - 392 p.
9. Kosterin, E. V. The Foundations and Foundations / B.. V. Kosterin. - Ed. 2nd, Pererab. and add. - Moscow: Higher. School, 1978. - 375 p.
10. Kurdyumov V. I. Short course of foundations and foundations / V. I. Kurdyumov. - Ed. 3rd - St. Petersburg: Yu.N. Erlich Printing House, 1902. - 297 p.
11. Makovsky L.V. Urban Underground Transport Buildings: studies. for universities / L.V. Makovsky. - Moscow: stroiizdat, 1979. - 472 p.
12. Maslov NN. Ground mechanics in construction practice (landslides and control): studies. assists for universities / N. N. Maslov. - Moscow: stroiizdat, 1977. - 320 p.
13. Motorny A.N. The stress-strain state of a homogeneous array of soil from a load transmitted through a limited in plan area applied inside an elastic homogeneous array of soil / A.N. Motorny, V.I. Bolshakov, N.A. Motorny // News of Pridniprovs-koi of the state academy of buddies and architects. - 2017. - № 3. - P. 22–30.
14. Motorny A.N. The stress-deformed state of the foundation of pile foundations on loess subsiding soils when soaking the subsidence stratum from bottom to top (flooding of the territory) / A.N. Motorny, N. A. that architecture: st. sciences. Ave. - Dnipropetrovsk, 2014. No. 2. - P. 20–29.
15. Modern problems of pile foundation construction in the USSR // Collection of mes. report All-Union Workshop Meeting / All-Union Scientific Research Institute of Grounds and Underground. structures to them. N.M. Gersavanova; Nat com on soil mechanics and foundation engineering; by ed. A. A. Bartholomew. - Perm: Perm. polytech. Inst, 1988. - 149 p.
16. Motorny A.N. Modern views of the carrying capacity of driven piles (based on the results of diving and work, piles in the ground) / A.N. zb sciences. pr. - Dnipropetrovsk, 2014. - № 8. - p. 32–42.
17. Tsytovich N. A. Mechanics of soil: a short course / N. A. Tsytovich. - 4th ed., Again pererab. and add. - Moscow: Gosstroyizdat, 1963. - 636 p.
18. Experience of erection of structures using the “wall in soil” method / A. L. Filakhtov, G. K. Lubenets, N. V. Pisancko, M. G. Yankulin. - Kiev: Budivelnik, 1981. - 234 p.
19. Korn GK Handbook of mathematics for scientists and engineers. Definitions, theorems. formulas / G. K. Korn, T. K. Korn; per. from the 2nd Amer. reclaiming ed. I. G. Aramanovich [et al.]; under total ed. I. G. Aramanovich. - Moscow: Science, 1973. - 831 p.

*Рецензент: Башев В. Ф., д-р фіз.-мат. наук, проф.*

Надійшла до редколегії: 21.11.2018 р.