

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 624.131.23:624.15

ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВОГО МАССИВА И ПЕРЕДАВАЕМОГО НА НЕГО ДАВЛЕНИЯ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОСАДОЧНЫХ СВОЙСТВ ЛЁССОВЫХ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ И ФОРМИРОВАНИЯ СИЛ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ТРЕНИЯ P_n НА БОКОВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ СТВОЛА СВАЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ФУНДАМЕНТОВ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, *д-р техн. наук, проф.*,МОТОРНЫЙ А. Н.², *магистр*,МОТОРНЫЙ Н. А.³, *канд. техн. наук, доц.*¹Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473²Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua³Кафедра оснований и фундаментов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua

Анотация. Выполнен анализ материалов по формированию просадочных свойств эоловых отложений (Обручев, Абелев, Крутов, Мустафаев и др.) По выполненному анализу установлено, что физические свойства лёссовых просадочных грунтов, их региональные особенности (ϵ_{se} , P_{se} , W_{se} , $S_{se,g}$, $S_{se,p}$) зависят от генезиса этих осадочных отложений. В имеющихся литературных источниках (Ю. М. Абелев, В. И. Крутов ...ДБН) все региональные характеристики лёссовых просадочных грунтов принимаются по данным экспериментов, результаты которых приводятся в материалах инженерно-геологических изысканий или выполненных непосредственно авторами.

В данной статье делается попытка выразить основные и региональные характеристики просадочных грунтов аналитической зависимостью $\epsilon_{se} = f(W_t)$, где W_t – изменение влажности лёссового просадочного грунта во времени в процессе инфильтрации воды в лёссовый грунт; определиться с понятием прочность цементационных связей – «Ц» и зависимости этой прочности влажности $\text{Ц} = f(W)$; показать зависимость изменения природного давления « P_g » от изменения влажности грунта: дать трактовку или обновить существующие высказывания ведущих специалистов по этому направлению о критической влажности $W_{кр}$ (W_{np}) и о начальном просадочном давлении $P_{se} = P_{кр}$; предложить аналитическую зависимость формирования сил отрицательного трения – P_n на боковую поверхность ствола свай в зависимости от изменения влажности проседающего грунта – $P_n = f(W)$.

Даются предложения по вычислению промежуточных значений прочностных и деформационных показателей (C , φ , E) просадочного грунта находящихся в диапазоне влажности $0 \leq W \leq W_{sat}$. По вычисленным промежуточным значениям C_w , φ_w , E_w определять силы трения грунта на боковую поверхность ствола свай. Принимая во внимание, что при определении несущей способности свай в лёссовых просадочных грунтах силы трения грунта передающиеся на ствол свай « f » определяются при полном замачивании лёссового грунта, прорезаемого свай и силы отрицательного трения грунта на боковую поверхность ствола свай тоже определяются по характеристикам замоченого грунта, т.е. в первом случае $f = f_{sat}$ (при $I_L = \frac{W_{sat} - W_p}{I_p}$), во втором случае ($\tau = \sigma_{sat,zg} \cdot \text{tg } \varphi_{sat} + C_{sat}$). Так как процесс передачи сил трения грунта на боковую поверхность ствола свай отличается в этом случае только направлением передачи этих сил, то авторами предлагается: при вычислении несущей способности свай в лёссовых просадочных грунтах силы трения грунта в пределах прорезаемой лёссовой просадочной толщи не учитывать $f = 0$, что идет в резерв несущей способности свай, а силы трения грунта на боковую поверхность ствола свай при просадке толщи приравнять $P_n = 0$, так как $f = 0$, а $\tau = f$. Тогда споров о действии сил отрицательного трения на боковую поверхность ствола свай – P_n – и способов его вычисления ($P_n = U \sum \tau_i h_i$) не возникает, ведь существующая формула не отражает физический процесс проявления сил отрицательного трения – P_n . Авторами предлагается вычислять (при «необходимости») силы отрицательного трения при неполном замачивании толщи в зависимости от промежуточной влажности (W_i) вычислив предварительно промежуточные значения C_w и φ_w .

Ключевые слова: лёссовые просадочные грунты; относительная просадочность; просадочная толща; начальная критическая влажность; начальное просадочное давление; силы отрицательного трения; цементационные связи

ВПЛИВИ ЗМІНИ РЕЖИМУ ВОЛОГОСТІ ГРУНТОВОГО МАСИВУ І ПЕРЕДАВАННЯ НА НЬОГО ТИСКУ НА РЕАЛІЗАЦІЮ ПРОСАДОЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛЕСОВИХ ПРОСАДОЧНИХ ГРУНТІВ І ФОРМУВАННЯ СИЛ НЕГАТИВНОГО ТЕРТЯ P_n НА БІЧНУ ПОВЕРХНЮ СТОВБУРУ ПАЛЬ І ІНШИХ ВИДІВ ФУНДАМЕНТІВ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, *д-р техн. наук, проф.*,

МОТОРНИЙ А. М.², *магістр*,

МОТОРНИЙ М. А.³, *канд. техн. наук, доц.*

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

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

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

Аннотация. Виконаний аналіз матеріалів по формуванню властивостей просадочних еолових відкладень (Обручев, Абелевий, Крутов, Мустафаев та ін.). По виконаному аналізу встановлено, що фізичні властивості лесових просадочних ґрунтів, їх регіональні особливості (ϵ_{se} , P_{se} , W_{se} , $S_{se, g}$, $S_{se, p}$) залежать від генезису цих осадочних відкладень. У наявних літературних джерелах (Ю. М. Абелев, В. І. Крутов ... ДБН) усі регіональні характеристики лесових просадочних ґрунтів приймаються за даними експериментів, результати яких наводяться в матеріалах інженерно-геологічних досліджень або виконаних безпосередньо авторами.

У цій статті робиться спроба виразити основні і регіональні характеристики просадочних ґрунтів аналітичною залежністю $\epsilon_{se}=f(W_t)$, де W_t – зміна вологості лесового просадочного ґрунту в часі в процесі інфільтрації води в лесовий ґрунт; визначитися з поняттям міцність цементационних зв'язків – Π , і залежності цієї міцності від вологості $\Pi = f(W)$; показати залежність зміни природного тиску P_g від зміни вологості ґрунту: дати трактування або відновити існуючі висловлювання провідних фахівців з цього напрямку про критичну вологість $W_{кр}$ ($W_{пп}$) і про початковий просадочний тиск $P_{se} = P_{кр}$; запропонувати аналітичну залежність формування сил негативного тертя – P_n на бічну поверхню стовбура паль залежно від зміни вологості просідаючого ґрунту – $P_n = f(W)$.

Даються пропозиції з розрахунку проміжних значень міцнісних і деформаційних показників (C_ϕ , E) просадочного ґрунту, що знаходяться в діапазоні вологості $0 \leq W \leq W_{sat}$. По розрахованим проміжним значенням C_w , ϕ_w , E_w визначати сили тертя ґрунту на бічну поверхню стовбура палі. Зважаючи, що при визначенні несучої здатності палі, в лесових просадочних ґрунтах сили тертя ґрунту f , що передаються на стовбур палі, визначаються при повному замочуванні лесового ґрунту, що прорізається палею і сили негативного тертя ґрунту на бічну поверхню стовбура палі теж визначаються за характеристиками замоченого ґрунту, тобто в першому випадку $f = f_{sat}$ (при $I_L=W_{sat} - W_p$), у другому випадку ($\tau=\sigma_{sat, zg} \cdot \text{tg}\phi_{sat} + C_{sat}$). Оскільки процес передачі сил тертя ґрунту на бічну поверхню стовбура палі відрізняється в цьому випадку тільки напрямом передачі цих сил, то авторами пропонується: при обчислення несучої здатності палі, в лесових просадочних ґрунтах сили тертя ґрунту в межах лесової просадочної товщі, що прорізається, не враховувати $f = 0$, що йде в резерв несучої здатності палі, а сили тертя просідаючого ґрунту на бічну поверхню стовбура палі при тій, що просіла товщі прирівняти $P_n = 0$, оскільки $f = 0$, а $\tau = f$. Тоді суперечок про дію сил негативного тертя на бічну поверхню стовбура палі – P_n – і способів його обчислення ($P_n = \sum \tau_i h_i$) не виникає, адже існуюча формула не розкриває фізичний процес прояву сил негативного тертя – P_n . Авторами пропонується обчислювати (при необхідності) сили негативного тертя при неповному замочуванні товщі залежно від проміжної вологості (W_i) вичисливши заздалегідь проміжне значення C_w і ϕ_w .

Ключевые слова: лесові ґрунти просадочників; відносна просадочність; товща просадочника; початкова критична вологість; початковий тиск просадочника; сили негативного тертя; зв'язки цементациї

INFLUENCE OF CHANGES IN THE HUMIDITY CONDITIONS OF THE SOIL MASS AND PRESSURE TRANSMITTED ON IT FOR THE IMPLEMENTATION OF THE COLLAPSING PROPERTY OF THE LOESS COLLAPSING SOILS AND FORMATION OF NEGATIVE FRICTION

FORCES P_N ON THE SIDE SURFACE OF THE PILE SHAFT AND OTHER KINDS OF FOUNDATIONS

BOLSHAKOV V. I.¹, *Grand PhD in Technical Sciences, prof.*,

MOTORNY A. N.², *Master*,

MOTORNY N. A.³, *Cand. Tech. Sci., Assoc.*

¹Department of Materials and Materials Processing, State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskogo str., 24-A, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

²Department of bases and foundations, State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua.

³Department of bases and foundations, State Higher Educational Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Tel. +38 (0562) 756-33-43, e-mail: A.motorchik@i.ua.

Abstract. It is executed the materials analysis on forming of collapsing properties of eolian sedimentations (Obrychev, Abelian, Krytov, Mustafaev and other). On the executed analysis is set, that physical properties of loess collapsing soils, their regional features (ϵ_{se} , P_{se} , W_{se} , $S_{se,g}$, $S_{se,p}$) depend on genesis of these basic sedimentations. In present literary sources (Abelian U., Krytov V... DBN) all regional descriptions of loess collapsing soils are accepted from data of experiments results over of which are brought in materials of engineer-geological researches or executed directly by authors.

In this article is given a shot to express basic and regional descriptions of collapsing soils analytical dependence of $\epsilon_{se}=f(W_t)$, where W_t – time-history of humidity of loess collapsing soil in the process of infiltration of water in loess soil; determined with a concept durability of cementation connections – « Π » and dependences of this durability of humidity of $\Pi=f(W)$; to show dependence of change of natural pressure of « P_g » on the change of soil humidity: to give interpretation or renew the existent utterances of leading specialists to this direction about critical humidity of W_{kp} (W_{np}) and about initial sagging pressure of $P_{se}=P_{kp}$; to offer analytical dependence of forming of negative friction forces – P_n on the side of barrel of piles depending on the humidity change of collapsing soil – $P_n=f(W)$.

It is given suggestions on calculation of intermediate values of strength and deformation indexes (C , φ , E) of collapsing soil being in the range of humidity $0 \leq W \leq W_{sat}$. On the calculated intermediate values C_W , φ_W , E_W determine the soil friction forces on the side surface of the pile shaft. Whereas, at determination of bearing strength of piles in loess collapsing soils of soil friction forces that is transmissible on a pile shaft of « f » are determined at the complete soakage of the loess soil cut through by a pile and negative friction forces of soil on the side of pile shaft are too determined on descriptions of moistened soil, i.e. in first case $f = f_{sat}$ (under $I_L = \frac{W_{sat}-W_p}{I_p}$), in second case ($\tau = \sigma_{sat,zg} \cdot \text{tg } \varphi_{sat} + C_{sat}$). Because the process of transmission of soil friction forces on the side of pile shaft differs in this case only by the transmit-direction of these forces, then offered authors: at calculation of bearing strength of pile in loess collapsing soils of soil friction force within the limits of the cut through loess collapsing layer not to take f into account 0, that goes to reserve of bearing strength of pile, and soil friction forces on the side of pile shaft at collapsing of layer to equate $P_n=0$, because $f=0$, and $\tau=f$. Then spores about operating of negative friction forces on the side of pile shaft – P_n – and the methods of its calculation ($P_n = U \sum \tau_i h_i$) do not arise up, in fact existent formula does not reflect the physical process of display of negative friction forces – P_n . It is suggested to calculate (if «necessary») forces of negative friction authors at the incomplete soakage of layer depending on intermediate humidity (W_i) calculating preliminary intermediate values C_W и φ_W .

Keywords: *loess просадочные soils; relative просадочность; просадочная layer; initial critical humidity; initial просадочное pressure; forces of negative friction; cementation connections*

Введение. Согласно гипотезе ак. В. А. Обручева (эоловая гипотеза) лёссовые просадочные грунты образовались путем оседания кварцевой пыли переносимой ветром из пустынных областей по направлению действия ветра (муссоны), заполнениями этой пылью неровностей земной поверхности (ущелья, впадины и др.), частичное или полное промачивание осевшей (в ущелье или впадинах) пыли за один цикл (т. е. за пол года) толщиной

5 ÷ 10 см дождевыми водами в которых присутствуют карбонатные, а может и в комплексе соли, (пыль) промачивается раствором солей чисто карбонатными, а после испарения влаги происходит цементация (карбонатными солями находившимися в дождевой воде) отложившейся за один цикл пыли (5 – 10 см за пол года) с образованием прочной «корки», практически рыхлой (естественное оседание пыли с пористостью равной 45 –

50 %, а может быть больше). Оседающая в последующих циклах пыль практически не влияет на деформацию сформировавшейся «корочки». Таким образом за четвертичный период Кайнозойской эры сформировалась толща цементированной пыли (в зависимости от района земной поверхности, от интенсивности оседания пыли и существовавших «неровностей» земной поверхности) мощностью от 10 – 15 м до 100 ÷ 150 м. Эта цементированная пыль и сформировала верхние слои земной поверхности, называемой лессами (первичные отложения) и лёссовые суглинки и супеси (вторичные переотложенные лёссы). В зависимости от состава цементационных солей и примесей к ним (карбонатные – растворимые в воде и с примесями к ним силикатных, слаборастворимых или не растворимых в воде) образовавшаяся толща лёссовых грунтов может иметь неодинаковую (неравномерную) размокаемость в воде, неодинаковую растворимость цементационных связей.

Так как осевшая кварцевая пыль цементировалась в процессе генезиса, растворимыми в воде карбонатными цементами, то при попадании воды в такой грунт, происходит растворение цементационных связей, грунт (лесс, лёссовый суглинок) становится бесформенным, аморфным, потерявшим прочностные характеристики цементов и проявляет дополнительные деформации – просадки – при передаче на него нагрузки и от сооружения и собственного веса.

При действии постоянного источника замачивания массива грунта, в том числе лёссового массива, проявление просадочных деформаций протекает не сразу после замачивания толщи, а затрачивается определённое время на инфильтрацию воды в грунт, взаимодействие воды с минеральными частицами формирующими массив грунта, размокание цементующих минеральные, частицы грунта вяжущих, проявление просадки, преодолевая при этом силы сопротивления перемещению замоченного грунта вниз (просадка) и

другие факторы (время замачивания). Все эти процессы зависят от физико-механических свойства лёссового грунта (природная влажность грунта W , плотность грунта ρ т/м³, плотность частиц грунта ρ_s (т/м³) и всех производных характеристик: плотность сухого грунта ρ_d (т/м³), пористости грунта – « n », коэффициента пористости « e », степени водонасыщения S_r , влажности полного водонасыщения W_{sat} и механических характеристик исследуемого грунта: C (кПа), C_{sat} (кПа); φ (град), φ_{sat} (градус); E (МПа), E_{sat} (МПа); μ , μ_{sat} , минералогического состава лёссового массива, и его взаимодействие с водой и влияние этого взаимодействия на гидрофильные и гидрофобные свойства минералов, формирующих исследуемый грунтовый массив. Это в свою очередь влияет на коэффициент фильтрации (от $W_o \leq W \leq W_{sat}$) грунта. Учтёшь все перечисленные факторы на проявление просадочных деформаций лёссового массива представляет определенные трудности. В связи с этим влияние изменения влажностного режима на проявление просадочных свойств грунтового массива будет рассматривается дискретно, считая остаточные деформации постоянными. При этом учитывая все влажностные показатели лёссового грунта, от твердого до текучего $0 \leq I_l \leq 1$ и степени водонасыщения S_r , для соответствующего состояния грунта, необходимо учитывать также и региональные показатели влажности – W_{se} , W_{sat} . А так как W_{sat} – влажность при полном водонасыщении (при $S_r = 1$), которая непосредственно зависит от коэффициента пористости e : ($W_{sat} = \frac{e}{\rho_s} \cdot \rho_w$), с увеличением плотности грунта – « e » уменьшается, влажность при полном водонасыщении уменьшается и может достичь состояния при котором $W_{sat} < W_p$, грунт при полном водонасыщении находится в твёрдом состоянии $I_l < 0$, грунт при полном водонасыщении является не просадочным.

В литературных источниках специалистов и учёных, занимающихся просадочными грунтами за последние

20 – 25 лет подобные вопросы не рассматривались и на конференциях и семинарах не выносились для всеобщего обсуждения. В связи с этим авторами данной статьи выносятся следующие вопросы, затрагивающие проблемы зависимости изменения влажностного режима грунтового массива и передаваемого на него давления на реализацию просадочных свойств лёссовых просадочных грунтов и формирование отрицательного трения P_n на боковую поверхность ствола свай и других видов фундаментов и подземных сооружений; а именно:

1. Взаимосвязь относительной просадочности ε_{se} и физико-механических характеристик лёссового просадочного грунта (C, φ, E, μ, ρ).

2. Взаимосвязь относительной просадочности грунта ε_{se} и критериальной влажности лёссов в зависимости от его генезиса.

3. Влияние природного давления P_g на проявление просадочных деформаций лёссовых просадочных грунтов.

4. Взаимосвязь относительной просадочности лёссовых просадочных грунтов ε_{se} и начального просадочного давления P_{se} .

5. Цементационные связи и их роль в формировании прочностных показателей лёссовых просадочных грунтов.

6. Зависимость прочностных и деформационных C, φ, E показателей лёссовых просадочных грунтов от влажности W_i и её влияние на формирование сил отрицательного трения P_n лёссового просадочного грунта на боковую поверхность ствола свай и других видов фундаментов и подземных сооружений.

1. Взаимосвязь относительной просадочности грунта и его деформационных характеристик (по данным ДБН и ДСТУ).

Согласно ГОСТ 23161-79 относительную просадочность ε_{se} лёссового просадочного грунта определяют в лабораторных условиях на компрессионном приборе по методу двух кривых: определяется деформация образца грунта на

компрессионном приборе при заданных сжимающих нагрузках с заданным интервалом $\Delta P=50\text{кПа}$ и строится график зависимости осадки образца от заданной нагрузки $\Delta h=f(\Delta P)$; при естественной влажности $= W$. Параллельно, на таком же приборе проводятся испытания образца грунта при таком же интервале нагрузки $\Delta P=50\text{кПа}$, при условии полного водонасыщения – $W_i = W_{sat}$. На том же графике по координатах $h_i \rightarrow \Delta P_i$ строится «кривая» осадки $= \Delta h'=f(\Delta P)$. Относительную просадочность $= \varepsilon_{se}$ определяют по соотношениям:

$$\varepsilon_{se,i} = \frac{\Delta h'}{h} - \frac{\Delta h}{h},$$

где: $\frac{\Delta h'}{h}$ – относительная деформация образца грунта от заданной нагрузки P_i для образца грунта в водонасыщенном состоянии $W = W_{sat}$;

$\frac{\Delta h}{h}$ – относительная деформация образца грунта в компрессионном приборе при естественной влажности $W = W_i$.

Согласно критерию (ДСТУ) определяется степень просадочности просадочного лёссового грунта – $\varepsilon_{se,i}$.

Учитывая, что деформационные характеристики грунтов определяется на таких же компрессионных приборах, то данные по определению относительной (просадочности) сжимаемости грунтов при естественной влажности $= W_i$ и влажности полного водонасыщения $= W_{sat,i}$ используются для определения деформационной характеристики грунта – модуля деформации E_i по схеме:

$$a = \frac{\Delta e}{\Delta P} = \frac{\Delta h}{h \cdot \Delta P} \cdot (1 + e);$$

$$a' = \frac{\Delta e'}{\Delta P} = \frac{\Delta h'}{h \cdot \Delta P} \cdot (1 + e);$$

откуда получаем: $E_i = \frac{1+e_i}{a}$; $E' = \frac{1+e}{a'}$;

$$E = \frac{(1+e) \cdot \beta}{a} = \frac{(1+e) \cdot h \cdot \Delta P \cdot \beta}{\Delta h \cdot (1+e)} = \frac{h \cdot \Delta h}{\Delta h} \cdot \beta;$$

для водонасыщенного образца:

$$E' = \frac{\beta \cdot (1+e)}{a'} = \frac{\beta \cdot (1+e) \cdot h \cdot \Delta P}{\Delta h' \cdot (1+e)} = \frac{h \cdot \Delta P \cdot \beta}{\Delta h'};$$

Приравнявая относительную деформацию $\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{\Delta h'}{h \cdot \Delta P \cdot \beta} - \frac{\Delta h}{h \cdot \Delta P \cdot \beta}$ и

учитывая, что $\frac{\Delta h'}{h} - \frac{\Delta h}{h} = \varepsilon_{se,i}(\Delta P_i)$ получим:

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \varepsilon_{se} \cdot \Delta P \cdot \beta, \text{ откуда}$$

$$\frac{E-E'}{E' \cdot E} = \frac{1}{\Delta P \cdot \beta} \cdot \left(\frac{\Delta h'}{h} - \frac{\Delta h}{h} \right); \frac{E-E'}{E' \cdot E} = \frac{\varepsilon_{se}}{\Delta P \cdot \beta}$$

$$\text{и } \varepsilon_{se} = \frac{(E-E') \cdot \Delta P \cdot \beta}{E \cdot E'} \text{ или } \varepsilon_{se} = \frac{(a'-a) \cdot \Delta P}{1+e},$$

где a – коэффициент сжимаемости (Мпа);

Δe – приращение коэффициента пористости;

ΔP – интервал нагрузки (кПа);

Δh – деформация образца грунта (см) от давления ΔP для грунта естественной влажности (W);

E – модуль деформации образца грунта. Компрессионный при естественной влажности (W);

a' , $\Delta h'$, E' , $\Delta e'$ – те же показатели при полном водонасыщении ($W = W_{sat}$);

h – высота образца грунта в компрессионном приборе (мм, см);

β – безразмерный коэффициент, учитывающий невозможность проявления боковых деформаций в компрессионном приборе $\beta = 1 - \frac{2 \cdot \mu^2}{1-\mu}$

μ – коэффициент боковой деформации $\mu = \frac{\xi}{1 + \xi}$;

ξ – коэффициент бокового давления $\xi = tg^2 \cdot (45 - \frac{\varphi}{2})$;

φ – угол внутреннего грунта.

2. Взаимосвязь относительной просадочности ε_{se} лёссового просадочного грунта и критериальной влажности W_i

2.1. Критериальные влажности (согласно ДСТУ и ДБН) и их роль в проявлении просадочных деформаций лёссовых просадочных грунтов.

Определение: Критериальная влажность – это такое количество воды в грунте, которое обеспечивает выполнение (проявление) отдельных природных физических и механических процессов в грунтах, используемых нами при реализации природных явлений, физических и механических проявлений происходящих с грунтами, при использовании их в строительстве как оснований зданий, наземных и подземных сооружений и как строительный материал.

(Предел раскатывания – W_p ; предел текучести – W_L ; \bar{W} – критическая влажность, контролирующая прочность грунта и непосредственно влияющая на прочностные характеристики грунта; $W_{кр}$ – влажность которая обеспечивает проявление просадочных деформаций лёссовых просадочных грунтов.)

Рассмотрим одну из перечисленных выше критериальных влажностей – начальная критическая влажность – $W_{кр}$ (критическая) – которая способствует проявлению просадочных деформаций лёссовых просадочных грунтов. По мнению авторов настоящей статьи:

1. Это влажность лёссового просадочного грунта, (л.п.г.) при которой начинает проявляться относительная ε_{se} просадочность и равна $\varepsilon_{se}=0,01$, при передаче на лёссовый просадочный грунт заданного давления P_i . Критическая влажность обратно пропорциональная передаваемому на лёссовый просадочный грунт давлению = P_i .

2. По Н. Я. Денисову. Критическая влажность ($W_{кр}$) – это влажность грунта при которой возникает просадка, близкая, а иногда несколько ниже максимальной молекулярной влажёмкости $W_{м.м.в.} \approx W_p$.

3. Б. И. Чёрный указывает что просадки лёссовых грунтов г. Грозного проявляется при определённой величине влажности, которая зависит от давления на грунт.

4. В. И. Крутов утверждает, что начальная влажность тесно связана с начальным просадочным давлением [$w_{se} = f(P_{se})$] представляет собой минимальное давление на грунт при максимальном значении начальной влажности.

5. Критическая влажность – $W_{кр}$ – это влажность лёссового просадочного грунта, при которой начинают проявляться просадочные явления в лёссовом просадочном грунте с относительной просадочностью $\varepsilon_{se} = 0,01$ при передаче на грунт фиксированного давления P_i . При $P_i < P_{se}$ грунт не просадочный при любом значении W . При $0 < P \leq P_i$ и $P_g < P \leq P_i$ за критерий принимается – $P_{крит} = P_g$ и

получается, что давление – P_g – является критериальным, и грунт при $P \leq P_g$ не просадочный и за основу принимается $P_i = P_g$ – нижняя эпюра суммарного давления ($P_g + P_i$), где дополнительное давление практически не влияет на проявление просадочных деформаций, а просадка проявляется только от P_g .

Трактовка проф. А. А. Мустафаева по вопросу $W_{кр}$. «Согласно исследованиям В. И. Крутова, начальная критическая влажность тесно связана с начальным просадочным давлением (P_{se}) и обычно применяемое понятие начального давления при максимальном значении начальной влажности». Данная трактовка имеет нестыковку, а именно:

1. По В. И. Крутову «Начальное просадочное давление – $P_{пр}$ – представляет собой минимальное давление от фундамента или собственного веса грунта при котором начинает проявляться, при полном водонасыщении, просадка грунта».

2. По В. И. Крутову – «начальная просадочная влажность $W_{пр}$ – это влажность, при которой просадочные лёссовые грунты, находящиеся в напряжённом состоянии от внешней нагрузки фундаментов или собственного веса начинают проявлять просадочные свойства».

Согласно данному определению (по В. И. Крутову) критическая влажность ($W_{кр}$), никак не связана с «начальным просадочным давлением ($P_n = P_{se}$)», а просто связана с внутренним напряжением в грунте, возникающие в грунте при передаче на него нагрузки от «фундаментов или его собственного веса, обратно-пропорциональной зависимостью \rightarrow с увеличением напряжений в грунте уменьшается начальная критическая влажность ($W_{кр} = f(\sigma)$; $\sigma \uparrow \rightarrow W_{кр} \downarrow$). Это связано с процессом разрушения цементационных связей между пылеватыми частицами лёссового грунта, т.е. чем больше влажность лёссового грунта тем (сильнее) в большей мере «размокают» цементационные связи между пылеватыми частицами, тем меньше требуется усилие

(напряжение) для их разрушения. Поэтому для каждого напряжённого состояния – σ_i – будет соответствовать «своя» критическая влажность ($W_{кр}$). Эти показатели связаны между собой обратно-пропорциональной зависимостью и «сообща» участвуют в проявлении просадочных деформаций лёссового просадочного грунта.

3. Взаимосвязь начальной критической влажности – $W_{кр}$ и начального просадочного давления $P_n = P_{se}$

Следует оговориться, что речь идет в этом параграфе только о просадочных грунтах. Это свойство лёссовых грунтов определяется, предварительно, по показателю П, определяемому по формуле:

$$П = \frac{e_L - e}{1 + e} \text{ или } I_{ss} = \frac{e_L - e}{1 + e},$$

где: e – коэффициент пористости грунта природного сложения;

e_L – коэффициент пористости соответствующий влажности грунта на границе текучести, и определяется по формуле: $e_L = W_L \times \frac{\rho_s}{\rho_w}$

Согласно руководству показатель «П» для заданного вида грунта, величина постоянная ($П = const$), поэтому этот показатель используется только для предварительного отнесения данного вида грунта к просадочным или не просадочным.

Даже используя выражение «П» или « I_{ss} » для предварительной оценки просадочности лёссовых грунтов, мы заблаговременно вводим специалистов-проектировщиков в заблуждение, которое в последствии может привести к существенным ошибкам при проектировании, которые могут привести в эксплуатационный период к значительным материальным и моральным потерям. Ведь коэффициент пористости « e » зависит от плотности упаковки отдельных микро и макрочастиц в массиве грунта в процессе его генезиса, и не зависит от влажности, а зависит от количества частиц уложенных природой в единицу объема формирующегося массива грунта. Поэтому для «предварительной» оценки показателя просадочности целесообразно использовать коэффициент пористости « e » и одну из

влажностей классификационных показателей грунта или минерального состава грунта (например – число пластичности «I_p» или показатель текучести «I_L»).

А. А. Мустафаев увлажнение лёссового грунта представляет через источник замачивания в виде траншеи или котлована с сохранением постоянного уровня воды в траншее (котловане) ($H = const$).

Уравнение условия равновесия (баланса) воды в траншее (котловане) имеет вид:

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} = \frac{Q(t)}{\delta_0(t)} - \Pi(x,t) \cdot \frac{\partial y_0(x,t)}{\partial t} - y_0(x,t) \cdot \frac{\partial \Pi(x,t)}{\partial t}$$

и с учётом, что увлажнение толщи просадочного грунта ведётся при постоянном напоре «Н» в котловане и представляется уравнением:

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} = 0.$$

При этом вся подаваема в траншею (котлован) вода идёт на инфильтрацию, поэтому:

$$\frac{Q(t)}{b(t)} = \Pi \cdot \frac{\partial y_0(x,t)}{\partial t} + y_0(x,t) - \frac{\partial \Pi(x,t)}{\partial t}.$$

Увлажнение толщи просадочного грунта ведётся периодически [$Q(t) = 0$]

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} - \Pi(x,t) \cdot \frac{\partial y_0(x,t)}{\partial t} - y_0(x,t) \cdot \frac{\partial \Pi(x,t)}{\partial t}.$$

4. Влияние природного давления P_g на проявление просадочных деформаций лёссовых просадочных грунтов.

Необходимо сразу оговорится, а передается ли это давление $= P_g = \gamma \cdot z$ с заданной глубины «z» на нижележащие слои грунта? Если передается, то как?, а если не передается, то почему?

Если давление от собственного вес массива грунта передается не через неограниченную в плане площадь массива грунта, ($l = b \rightarrow \infty$), а через реальную площадь массива на реальную площадь подстилающего слоя ($A = l \cdot b$), то для того, чтобы собственный вес грунта фиксированной толщины передавался на фиксированную нижележащую

подстилающую толщу грунта, необходимо задать вертикальное перемещение фиксированного массива грунта заданной толщи к заданным характеристикам данного грунта с учётом сил сопротивления перемещению заданного грунтового массива $= R_s = u \cdot f \cdot z$

где: u – периметр поперечного сечения выделенного нами массива грунта;

f – силы трения грунта по грунту: $f = \tau = \sigma_{zg} \cdot \operatorname{tg} \varphi + C$;

σ_{zg} – собственный вес выделенного массива грунта: $\sigma_{zg} = \gamma \cdot z = P_g$;

γ – удельный вес грунта;

z – фиксированная толщина слоя грунта;

C – удельное сцепление грунта (принимается по материалам изысканий).

Если силы сопротивления перемещению массива грунта $R_f = u \cdot f \cdot z$, то для собственного веса передающегося на заданный подстилающий слой от сверху лежащего массива грунта будет равняться:

$$P'_g = P_g - R_s = \gamma \cdot z - u \cdot z \cdot (\sigma_{zg} \cdot \operatorname{tg} \varphi + C)$$

Таким образом на выделенный нами массив подстилающего слоя грунта передаётся давление от вышележащего массива грунта в виде разности:

$$P'_g = P_g - R_s,$$

и теперь относительная просадочность лёссового просадочного грунта от нагрузки равной собственному весу будет определяться не от давления $P_g = \gamma \cdot z$, а от давления $P'_g = P_g - R_s$, что конечно меняет относительную просадочность $\varepsilon'_{se,g}$, которая конечно, (заранее можно сказать), будет на много отличаться в меньшую сторону и может оказаться, что на данный момент $\varepsilon'_{se,g}$ будет меньше выбранного нормативными документами критерия ($\varepsilon'_{se,g} = 0,01$) и грунт будет считаться не просадочным. А в особых случаях P'_g на определённой глубине «z» $P'_g = P_g - R_s = 0$, откуда и определяется нейтральная глубина, с которой начинается формироваться арочный эффект по М. М. Протодьяконову, по которому глубина «z» нейтральной зоны, вычисляется из условия равновесия массива грунта в пределах ограниченной площадки.

Условие равновесия перемещающегося столба грунтового массива имеет вид:

$$(P_{zg} \cdot \operatorname{tg} \varphi + C) \cdot U \cdot z = \gamma \cdot z \cdot A$$

или $(\gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg} \varphi + C) \cdot U \cdot h = \gamma \cdot h \cdot A$
 после раскрытия уравнения получаем:

$$Uz \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg} \varphi + C = \gamma \cdot A$$

откуда определяем глубину на которой уравниваются силы трения грунта перемещающегося столба грунтового массива весом перемещающегося массива грунта:

$$Z = \left(A - \frac{C \cdot U}{\gamma} \right) \cdot \frac{1}{U \cdot \operatorname{tg} \varphi} =$$

$$= \frac{A}{U \cdot \operatorname{tg} \varphi} - \frac{C}{\gamma \cdot U \cdot \operatorname{tg} \varphi} = \left(\frac{A}{U} - \frac{C}{\gamma} \right) \cdot \operatorname{ctg} \varphi.$$

5. **Взаимосвязь относительной просадочности – « ε_{se} » и начального просадочного давления – « P_{se} ».**

Начальное просадочное давление – это такая нагрузка на лёссовый просадочный грунт – « P » при действии которой начинают проявляться просадочные свойства лёссового грунта с значением относительной просадочности $= \varepsilon_{se}=0,01$, при степени водонасыщения $0,8 \leq S_r \leq 1,0$.

Для данного вида и состояния грунта начальное просадочное давление – P_{se} – является величиной постоянной и используется при вычислении возможных просадочных деформаций при замачивании лёссовой просадочной толщи, как от передаваемого дополнительного давления = « P_0 » и давления от собственного веса грунта. P'_g – с учётом сил трения при передаче давления от собственного веса через «ограниченную» площадь:

$$P'_g = P_g - u \cdot z \cdot f.$$

Примером использования начального просадочного давления P_{se} в расчётах может быть определение коэффициента условия работы основания « K_{se} », при вычислении суммарных просадочных деформаций просадочной толщи при её замачивании и передаче на неё нагрузки от суммарного давления – $P_{0,z}$ – или нагрузки от собственного веса грунта $= P_g$.

Суммарная просадка просадочной толщи согласно действующим ДБН вычисляется по формуле:

$$S_{se} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{se,i} \cdot h_i \cdot K_{se}$$

$$K_{se} = 0,5 + 1,5 \cdot (P - P_{se}) / P_0,$$

где: P_{se} – начальное просадочное давление (по данным изысканий);

P – среднее давление под подошвой фундамента, передаваемое на просадочный грунт;

P_0 – условное давление принимаемое равным $= P_0=100$ кПа.

При передаче на просадочный грунт только давления от собственного веса грунта и вычисления от его действия просадки от собственного веса при ширине фундамента $H_{se} \leq 15$ м $K_{se} = 1$. Следует оговориться, что коэффициент K_{se} не всегда отражает те функции которые ему предназначены, увеличивая величину просадки S_{se} до весьма больших значений, которые практикой не подтверждается ($0,5 \leq S_{se} \leq 1,5 \div 2,0$ м).

Поэтому целесообразно было бы принять в ДБН В.2.1-10-2009, (пункт Д.16), критерии K_{se} одинаковыми как для нагрузки от собственного веса P_g . Ведь просадочной толще –« H_{se} » – пока не важно какая нагрузка передаётся на неё, главное что эта нагрузка создаёт напряжённое состояние внутри массива, которое принуждает деформироваться массив лёссового просадочного грунта при замачивании его водой с разрушением при этом цементационных связей между частицами грунта.

Прочность цементационных связей – это такая нагрузка передаваемая на лёссовый просадочный грунт, создающая напряжённое состояние в массиве грунта, от действия которой цементационные связи начинают терять целостность с раскрытием микротрещин в сформированной (природой) структуре, которые ведут к разрушению структуры цементационных связей. Основным фактором влияющим на прочность цементационных связей сформированных природой карбонатными цементами (растворимыми в воде), является влажность грунта и химический состав

цементационных связей, их взаимодействие с водой (растворимые, слаборастворимые, и не растворимые). Эти показатели зависят от генезиса лёссовых грунтов, который (генезис) в свою очередь зависит от территориальных факторов и периода формирования лёссовой толщи, а также реологических свойств грунта.

Анализом материалов изысканий выполненных государственным и «частными» сертифицированными организациями на территориях сложенных лёссовыми просадочными грунтами установлено, что в зависимости от влажности лёссового грунта $W \gg W_p$ изменяются (в определённой зависимости) прочностные C, φ и деформативные E пока что не увязаны аналитическими зависимостями $C = f(W), \varphi = f(W), E = f(W)$. Это требует аналитического определения зависимости изменения прочностных и деформационных региональных характеристик лёссового грунта от изменения его влажности $C(W), \varphi(W), E(W)$.

Зная, по данным изысканий, исходные (начальные и конечные) значения прочностных и деформационных характеристик $C \rightarrow C_{sat}; \varphi \rightarrow \varphi_{sat}; E \rightarrow E_{sat}$, устанавливаются зависимости промежуточных значений C, φ, E от влажности $C(W), \varphi(W), E(W)$.

Полученные зависимости дают возможность дифференцировать распределение сил отрицательного трения грунта при просадке – $R_{п}$ на боковые поверхности ствола свай, подпорных стенок и других подземных сооружений («стена в грунте», опускные колодцы, буровые опоры и др.)

Если продифинцировать силы трения на боковую поверхность ствола сваи при проявлении просадочных явлений в зависимости от влажности проседаемого грунта, увязав данное явление с зависимостью региональных прочностных характеристик лёссового просадочного грунта, от влажности $C = f(W); \varphi = f(W)$, то выявляется что силы отрицательного трения « $R_{п}$ » подчиняются обратно-

пропорциональной зависимости по отношению к изменению влажности лёссового просадочного грунта, т. е. с увеличением влажности $W_{se} \leq W_i \leq W_{sat}$, силы отрицательного трения « $R_{п}$ » снижаются к значениям

$$R_{п} = U \sum \tau_{i,sat} \times h_i = U \sum (\sigma_{zg,sat} \cdot tg \varphi_{sat} + C_{sat}) \cdot h_i.$$

Проф. А. А. Мустафаев лёссовый просадочный грунт рассматривает как сжимаемое упруго-вязкопластичное тело с квазизотропной и квазиоднородной непрерывной структурой, уравнение состояния для которого имеет вид:

$$\sigma = \sigma^U + \sigma^B = \sigma^y; e = e^y + e^B; e^B = e^B,$$

где: индексы «У», «В», «П» при напряжениях и деформациях обозначают упругий, «вязкий» и «пластичный» состояния.

После соответствующих преобразований и дополнений проф. А. А. Мустафаев получает результирующее напряженное состояние, которое имеет вид:

$$\sigma = C - \rho_d(1 + e)y + W(y, z) + \lambda(e_y + \frac{2}{3}\mu(2 - f)) \frac{\partial e_y}{\partial t}.$$

Для варианта неполного замачивания лёссовой просадочной толщи до влажности $W_{кр} \leq W \leq W_{sat}$, предварительно изменение прочностных и деформативных характеристик лёссового просадочного грунта C (кПа), φ (град), E (МПа) изменяющимся по закону (математической) кривой второго порядка, например: удельное сцепление C_W изменяется по закону:

$$C_W = C_H - C_H \cdot I_L(2W_{sat} - W_i),$$

где: C_H – значение удельного сцепления соответствующего природной влажности;

I_L, W_L, W_P, I_P – принимаются по данным изысканий;

W_{sat} – влажность лёссового просадочного грунта при полном водонасыщении

$$W_{sat} = \frac{e \cdot \rho_w}{\rho_s};$$

e – коэффициент пористости лёссового грунта: $e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d};$

Для примера опробуем данную зависимость $C_W = f(W)$ на массиве суглинка лёссового со следующими физико-механическими характеристиками:

- плотность частиц грунта – $\rho_s = 2,68 \text{т/м}^3$;
- плотность грунта естественная – $\rho = 1,68 \text{т/м}^3$;
- природная влажность грунта – $W = 0,16 \text{(д. е.)}$;
- влажность на границе текучести – $W_L = 0,28 \text{(д. е.)}$;
- влажность на границе раскатывания – $W_P = 0,16 \text{(д. е.)}$;
- число пластичности лёссового грунта $I_P = 0,12 \text{(д. е.)}$;
- показатель текучести (консистенции) $I_L = \pm 0,00$;
- плотность сухого грунта $\rho_d = 1,45 \text{т/м}^3$;
- коэффициент пористости $e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d$; $e = 0,85$;

- влажность водоначищенного грунта $W_{sat} = 0,32 \text{(д. е.)}$

- удельное сцепление $C_H = \text{(начальное сцепление)}$;
 $C_H = 25 \text{кПа}$;

- модуль деформации $E_H = 14,0 \text{МПа}$;

- угол внутреннего трения $\varphi_H = 23^\circ$.

Соответствующие показатели водонасыщенного грунта: $C_{sat} = 15 \text{кПа}$ (для водонасыщенного грунта) $\varphi_{sat} = 19^\circ$; $E_{sat} = 5,2 \text{МПа}$ (для водонасыщенного грунта).

Подставляя в принятые зависимости $C_W = C_H - C_H \cdot I_{Li}(2W_{sat} - W)$ значения приведённых показателей при заданной влажности « W_i » получаем значение удельного сцепления C_W , при заданных по данным изысканий $C_H = 25 \text{кПа}$; $C_{sat} = 15 \text{кПа}$. Результаты вычислений для C_W сведены в таблицу № 1.

$$C_W = C_H - C_H \cdot I_L(2W_{sat} - W_i).$$

Таблица № 1

Зависимость удельного сцепления C от влажности

W	$I_L = \frac{W - W_P}{I_P}$	$2W_{sat} - W$	$1 - (-I_L)(2W_{sat} - W)$	C_W
0	-1,333	0,64	1+0,8512	46,25
0,02	-1,166	0,62	+1,7233	43,10
0,04	-1,000	0,60	+1,6000	40,00
0,06	-0,833	0,58	+1,4833	37,08
0,08	-0,666	0,56	+1,3733	33,33
0,10	-0,500	0,54	+1,2700	31,75
0,12	-0,333	0,52	+1,1716	29,22
0,14	-0,1666	0,50	+1,0830	27,08
0,16	$\pm 0,000$	0,48	$\pm 0,000$	25,00
0,18	+0,1667	0,46	-0,07767	23,08
0,20	+0,3333	0,44	-0,1466	21,33
0,22	+0,5000	0,42	-0,2100	19,75
0,24	+0,6667	0,40	-0,2600	18,50
0,26	+0,8333	0,38	-0,3165	17,09
0,28	+1,0000	0,36	-0,3600	16,00
0,30	+1,1667	0,34	-0,3964	15,09
0,32	+1,3334	0,32	-0,4266	14,33
0,34	+1,5000	0,30	-0,5550	
0,36	+1,6666	0,28	-0,3333	

Для случая, когда влажность грунта превышает влажность полного водонасыщения $W > W_{sat}$ образуется

свободная вода, которая формирует свободно фильтрующий слой воды не подчиняющийся приведённой выше

зависимости по изменению удельного сцепления.

По указанной выше схеме для заданной нами зависимости изменения угла внутреннего трения грунта от влажности $\varphi_W = \varphi_H - \varphi_H I_L (W_{sat} - \frac{W}{2})$ выполнено

численное определение значения угла внутреннего трения φ_W , и представлено в таблице № 2

$$\varphi_W = \varphi_H - \varphi_H I_L \left(W_{sat} - \frac{W}{2} \right).$$

Таблица 2

Зависимость угла внутреннего трения φ от влажности

W	$I_L = \frac{W - W_P}{I_P}$	$2W_{sat} - 0.5W_i$	$\varphi' = \varphi_H - I_L (W_{sat} - \frac{W_i}{2})$	$\varphi_W = \varphi_H - \varphi'$
0	-1,3333	0,32	-9,32=10	33°
0,02	-1,1666	0,31	-8,30=8,0	31°
0,04	-1,0000	0,30	-6,90=7,0	30°
0,06	-0,8333	0,29	-5,60=6,0	29°
0,08	-0,6666	0,28	-4,30=4,0	27°
0,10	-0,5000	0,27	-3,10=3,0	26°
0,12	-0,3333	0,26	-2,00=2,0	25°
0,14	-0,1666	0,25	-0,96=1,0	24°
0,16	±0,000	0,24	±0,00	23°
0,18	+0,1666	0,23	+0,92=1,0	22°
0,20	+0,3333	0,22	+1,68=1,5	21,5°
0,22	+0,5000	0,21	+2,42=2,0	21,0°
0,24	+0,6666	0,20	+3,06=3,0	20,0°
0,26	+0,8333	0,19	+3,64=3,6	19,5°
0,28	+1,0000	0,18	+4,14=4,0	19,0°
0,30	+1,1666	0,17	+4,50=4,5	18,5°
0,32	+1,3333	0,16	+4,90=5,0	18,0°

Таблица 3

W	$I_L =$	$W_{sat} + 0.5W$		$E_W =$
0	-1,3333	0,32	-5,95	20,0
0,02	-1,1666	0,33	-5,39	19,40
0,04	-1,0000	0,34	-4,76	18,75
0,06	-0,8333	0,35	-4,08	18,08
0,08	-0,6666	0,36	-3,36	17,36
0,10	-0,5000	0,37	-2,52	16,52
0,12	-0,3333	0,38	-1,78	17,73
0,14	-0,1666	0,39	-0,91	14,91
0,16	±0,000	0,40	±0,00	14,00
0,18	+0,1666	0,41	+0,956	13,05
0,20	+0,3333	0,42	+1,96	12,05
0,22	+0,5000	0,43	+3,01	10,95
0,24	+0,6666	0,44	+4,06	9,85
0,26	+0,8333	0,45	+5,25	8,75
0,28	+1,0000	0,46	+6,30	7,70
0,30	+1,1666	0,47	+7,513	6,50
0,32	+1,3333	0,48	+8,77	5,23

По данным изысканий на выбранной нами площадке, модуль общей деформации «Е» при естественной влажности $W = 0.16$ составляет 14,0 мПа. Для случая неполного водонасыщения – $S_r < 1$; $W \leq W_{sat}$ для заданной нами зависимости

$$E_W = E_H - E_H I_L (W_{sat} + 0.5W) \quad -$$

изменения модуля деформации « E_W » от влажности W иллюстрируется расчетом.

Результаты вычисления модуля деформации при изменяющейся влажности сведены в таблице № 3.

Выводы. На основании выполненного анализа существующих теоретических исследований проявления особых региональных свойств эоловых отложений четвертичного периода Кайназойской эры (А. А. Мустафаев и весь коллектив исследователей под его руководством [7]; [9]), Бакинская школа полевых лабораторных исследований того же коллектива; теоретические, лабораторные и полевые исследования профессоров Ю. М. Абелева, А. А. Мустафаева их последователей и учеников Крижановского, В. И. Крутова (Московская школа), А. М. Дранников, Г. Петренко, С. П. Клепикова, А. М. Литвинова (Киевская школа); коллектив под руководством проф. В. Н. Голубкова (Одесская школа); профессоров М. Н. Гольдштейна, М. И. Малышева, доцентов К. А. Книша, П. А. Гагарина, Аронова, Тубольцева (Днепропетровская школа) и отдельных современных разработок авторов данной статьи установлено:

- **относительная просадочность** ε_{se} лёссового просадочного грунта прямопропорциональна его сжимаемости и связана формулой: $\varepsilon_{se} = \frac{(E-E')\Delta P \cdot \beta}{E \cdot E'}$ или $\varepsilon_{se} = \frac{(a'-a) \cdot \Delta P}{(1+e)}$;

- **критическая влажность лёссового грунта** $W_{кр}$ – зависит от действующего на лёссовый слой давления и связаны между собой обратно-пропорциональной зависимостью: $W_{кр} = f\left(\frac{1}{p}\right)$;

- **просадочная деформация просадочной толщи** S_{se} при передаче на просадочный грунт давления от собственного веса через ограниченную в плане площадь, а также дополнительного давления от сооружения (фундамента), так же через ограниченную в плане площадь, с увеличением глубины, за счёт формирования арочного эффекта, снижается и стремится к нулю ($S_{se} \rightarrow 0$);

- **начальное просадочное давление** – P_{se} – это такая нагрузка на лёссовый просадочный грунт, передаваемая через ограниченную в плане площадь, при которой грунт, находясь в водонасыщенном состоянии ($S_r = 1$), начинает проявлять просадочные свойства с относительной просадочностью $\varepsilon_{se} = 0,01$ прямо зависит от природных условий формирования данного грунта, а также прочности цементационных связей – "Ц", прочность которых (цементационных связей) в свою очередь зависит от гидрофильных и гидрофобных свойств минералов из которых формируется цементирующие связи. Согласно гипотезе В. А. Обручева в первичных лёссовых образованиях, цементационные связи сформированы из гидрофобных минералов (карбонатов);

- **прочностные и деформативные характеристики лёссовых просадочных грунтов** C, φ, E , как и для других видов грунтовых отложений (аллювиальные, делювиальные, пролювиальные и даже элювиальные) непосредственно зависят от влажности грунта с обратно-пропорциональной зависимостью. В связи с этим в отчетах об инженерно-геологических изысканиях на строительных площадках сложенных просадочными грунтами, в таблицах (частные значения физико-механических характеристик или сводные таблицы), даются начальные характеристики соответствующие природной влажности грунта: C_H, φ_H, E_H и показатели соответствующие состоянию водонасыщенного грунта – W_{sat} , т. е.

$$C = C_{sat}; \varphi = \varphi_{sat}; E = E_{sat}.$$

Промежуточные значения ($C_H \geq C_i \geq C_{sat}; \varphi_H \geq \varphi_i \geq \varphi_{sat}; E_H \geq E_i \geq E_{sat}$) в

отчётах не приводятся. Это затрудняет ориентироваться специалистам в определении остаточной несущей способности оснований после проявления аварийных замачиваний лёссовых просадочных грунтов. В связи с этим, нами были проанализированы состояние замоченного лёссового просадочного грунта при разной степени водонасыщения при $S_{rн} < S_{ri} \leq S_{rsat}$ т. е., при влажностях $W_n < W_i \leq W_{sat}$. После обработки материалов анализа установлено, что изменение прочностных (C, φ) деформативных характеристик (E) не полностью замоченного лёссового грунта соответствует, зависимости, подчиняющейся уравнению кривой второго порядка:

- для удельного сцепления $C_W = C_n - C_n \cdot I_L(2W_{sat} - W_i)$, при чём кривая пересекает ординату «С» при влажности соответствующей границе раскатывания $W = W_p$, т. е. $I_L = 0$. Вычисленные промежуточные значения удельного сцепления согласно приведённой зависимости $C_W = C_n - C_n \cdot I_L(2W_{sat} - W_i)$ вписывается в расхождение не превышающее 10% к определённым лабораторным способом (согласно ГОСТ 12248-78) значениям удельного сцепления $C = C_W$;

- для угла внутреннего трения $\varphi_W = \varphi_n - \varphi_n I_L(W_{sat} - \frac{W}{2})$, при чём кривая $\varphi_W = f(W)$ пересекает ординату φ при влажности $W = W_p$, т. е. $I_L = 0$. Вычисленные промежуточные значения – φ_W – угла внутреннего трения (согласно ГОСТ 12248-78) вписывается в расхождение не превышающее 10% к определённым лабораторным способом $\varphi = \varphi_W$.

- для модуля общей деформации «Е» - $E_W = E_n - E_n I_L(W_{sat} + 0.5W)$ и аналогично C_W, φ_W кривая $E_W = f(W)$ пересекает ординату E при влажности $W = W_p$, т. е. при $I_L = 0$, а вычисленные промежуточные значения E_W , согласно таблице № 3 вписываются в расхождения от реальных, не превышающих 10% к определённым

значениям модулям деформации согласно ГОСТ 20276-85 и ГОСТ 23908-79.

- **определённые по указанным зависимостям** $C_W = f(W)$ и $\varphi_W = f(W)$ позволяют вычислить силы отрицательного трения на боковую поверхность ствола свай при проявлении начальных просадочных деформаций не полностью водонасыщенного лёссового грунта $W_i < W_{sat}$. Учитывая, что силы отрицательного трения $P_n = U \sum_0^n \tau_i h_i$, а $\tau_i = \sigma'_{zg} \operatorname{tg} \varphi_W + C_W$ получаем, что в начальный момент проявления просадочных деформаций (при $W_{кр} < W_i < W_{sat}$), когда C_W и φ_W имеют относительно к « C_{sat} » максимальные значения, силы отрицательного трения – P_n – будут максимальные, а несущая способность свай (свай забивные, набивные, буроинъекционные, за исключением выполняемым по технологии «пустотелого шнека») будет «минимальной» за эксплуатационный период.

В связи с этим, авторами данной статьи предлагается силы отрицательного трения на боковую поверхность ствола свай определять (если считать, что формула 8.5.5.3. Зміна 1. ДБН В.2.1-10-2009 действительно отражает физический процесс формирования сил отрицательного трения грунта на боковую поверхность ствола свай, в чём авторы данной статьи сомневаются) определять по прочностным показателям C_W, φ_W для промежуточной влажности W_i на 5÷10% превышающей $W_{кр}$, т. е. $W_{кр} < W_i \leq 1,10 W_{кр}$. В этом предложении таится (кроется) резерв несущей способности свай в лёссовых просадочных грунтах. Несущая способность свай вычисляется по прочностным показателям ($C, \varphi, \mu, \gamma \dots$) для обводненного (водонасыщенного) лёссового грунта когда I_{Lsat} максимальное ($I_{Lsat} \Rightarrow \max$), – силы трения грунта на боковую поверхность ствола свай минимальное, а силы отрицательного трения грунта – « P_n » на боковую поверхность ствола свай максимальные (C_W, φ_W – максимальные).

В связи с возникающей неувязкой (расчётного сопротивления трения грунта на

боковой поверхности ствола сваи «f» согласно таблице Н.2.2. Зміна 1 ДБН В.2.1-10-2009, и касательного напряжения τ_i , для выравнивания условий работы не обходимо привести «f» и « τ » к одинаковому физическому смыслу: например

$\tau = \sigma_{zg} \cdot \operatorname{tg} \varphi + C$ и $f = \sigma_{zg} \cdot \operatorname{tg} \varphi + C$, т. е. $f = \tau$, тогда снимается вопрос несоответствия сил трения грунта на боковую поверхность ствола сваи и сил отрицательного трения на боковую поверхность ствола сваи при проявлении просадочных деформаций. А для отдельных случаев несущую способность сваи (F_d) в просадочных грунтах второго типа грунтовых условий по просадочности вычислять без учёта сил трения грунта на боковой поверхности ($f = 0$) ствола сваи в

пределах просадочной толщи, прорезаемой сваем. При этом случае силы отрицательного трения посадочного грунта на боковую поверхность ствола сваи не учитываются, так как $f = \tau = 0$.

В сложившейся ситуации авторы статьи предлагают вынести данный вопрос ($f = \tau$) на рассмотрение учёного совета НИИСК, а на обсуждение и возможного утверждения новой таблицы для определения сил расчетного сопротивления трению грунта на боковой поверхности ствола забивных и других видов свай., для глинистых (в т. ч. лёссовых просадочных грунтов).

Текст таблицы авторы рассчитывают и представляют в ученый совет по статистической обработке материалов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Захист від небезпечних геологічних процесів. Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідних грунтах : ДБН В.1.1.-5-2000. – Введ. з 2000-07-01. – Вид. офіц. – Київ, 2000. – Ч. 2 : Будинки і споруди на просідаючих грунтах. – 89 с.
2. Об'єкти будівництва та промислова продукція 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. – (Державні будівельні норми України).
3. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. Зміна 1. – Введ. вперше зі скасуванням на території України СНиП 2.02.03-85 (крім розділу 5) ; чинні від 2011-07-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с. – (Державні будівельні норми України).
4. Свайные фундаменты : СНиП 2.02.03-85 / Госстрой СССР. – Введ. 1987-01-01 ; взамен СНиП II-17-77. – Москва, 1986. – 47 с.
5. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01.83) / Науч.-исслед. ин-т оснований и подзем. сооружений им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1986. – 415 с.
6. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений : учеб. для вузов / Н. С. Булычев. – Москва : Недра, 1982. – 270 с.
7. Мустафаев А. А. Основы механики просадочных грунтов / А. А. Мустафаев. – Москва : Стройиздат, 1978. – 263 с.
8. Мустафаев А. А. Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах / А. А. Мустафаев. – Москва : Высш. шк., 1979. – 367 с.
9. Мустафаев А. А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах / А. А. Мустафаев. – Москва : Высш. шк., 1989. – 590 с.
10. К вопросу учёта сил отрицательного трения на боковой поверхности буроинъекционных свай, изготавливаемых по технологии пустотелого шнека / Н. Моторный, В. Рубанский, В. Седин, А. Моторный, А. Климошенко // Theoretical Foundations of Civil Engineering : proc. Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions (conference), Warsaw, September, 2011 / ed. by W. Szczesniak ; Warsaw University of Technology, Prydneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Warsaw, 2011. – Vol. 19. – P. 295–302.
11. Моторный Н. А. Распределение напряжений в массиве грунта от собственного веса грунта, передаваемой по ограниченной горизонтальной поверхности / Н. А. Моторный // Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions (conference), Warsaw, September, 2010 / ed. by W. Szczesniak. – Warsaw, 2010. – Vol. 18. – P. 393–398.
12. Моторный Н. А. Обоснование работы свай в грунте и формирование несущей способности свай в процессе ее погружения и эксплуатации / Н. А. Моторный, А. Н. Моторный // Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian Transactions (conference), Warsaw, May, 2013 / ed. by W. Szczesniak. – Warsaw, 2013. – Vol. 21. – P. 501–508.

13. Моторный Н. Выбор рациональных методов мелиорации лессовых просадочных грунтов как оснований фундаментов зданий и сооружений / Н. Моторный, А. Моторный, Ю. Саенко // Theoretical Foundations of Civil Engineering : proc. Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions (conference), Warsaw, May, 2007 / ed. by W. Szczesniak ; Warsaw University of Technology, Prydneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Warsaw, 2007. – Vol. 15. – P. 479–489.
14. Большаков В. И. Обоснование сил трения грунта на боковую поверхность ствола свай и подземных сооружений при изменении гидрогеологических условий подтопляемой строительной площадки / В. И. Большаков, А. Н. Моторный, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – 2016. – № 7. – С. 10–20.
15. Большаков В. И. Анализ существующих расчетных схем и выбор оптимальных решений схемы работы свай в глинистых грунтах / В. И. Большаков, А. Н. Моторный, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – 2016. – № 9. – С. 10–21.
16. Моторный А. Н. Современные представления несущей способности забивных свай (по результатам погружения и работе, свай в грунте) / А. Н. Моторный, Н. А. Моторный // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. пр. – 2014. – № 8. – С. 32–42.
17. Краев В. Ф. Инженерно-геологическая характеристика пород лёссовой формации Украины / В. Ф. Краев. – Киев : Наукова думка, 1971. – 227 с.
18. Крутов В. И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах / В. И. Крутов. – Киев : Будівельник, 1982. – 224 с.
19. 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.
20. Цытович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – Москва : Госстройиздат, 1963. – 636 с.
21. Корн Г. К. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. К. Корн, Т. К. Корн. – Москва : Наука, 1973. – 831 с.

REFERENCES

1. *Zakhyst vid nebezpechnykh heologichnykh protsesiv. Budyanky i sporudy na pidrobliuvanykh terytoriakh i prosidnykh gruntakh: DBN V.1.1.-5-2000* [Protection from dangerous geological processes. Buildings and structures on forged territories and collapsing soil: the State Construction Regulations V.1.1.-5-2000]. *Budyanky i sporudy na prosidaiuchykh gruntakh* [Buildings and structures on sagging soils]. Kyiv, July 01, 2000, chapter 2, 89 p. (in Ukrainian).
2. *Obiekty budivnytstva ta promyslova produktiia budivelnoho pryznachennia. Osnovy ta fundamenti budynekiv i sporud. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia: DBN V.2.1-10-2009* [Objects of construction and industrial products for construction purposes. Bases and foundations of buildings and structures. Bases and foundations of structures. Main design points: the State Construction Regulations V.2.1-10-2009.]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, July 01, 2009, 107 p. (in Ukrainian).
3. *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia: DBN V.2.1-10-2009* [Bases and foundations of structures. Main design points: the State Construction Regulations V.2.1-10-2009.]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, July 01, 2011, 55 p. (in Ukrainian).
4. *Svajnye fundamenti: SNIp 2.02.03-85* [Pile foundation: the Construction Norms and Regulations 2.02.03-85]. Gosstroj SSSR [State Construction of USSR]. Moskva, January 01, 1987, 47 p. (in Russian).
5. *Posobie po proektirovaniyu osnovanij zdaniy i sooruzhenij (k SNIp 2.02.01.83)* [Manual on the foundations design of buildings and structures (to the Construction Norms and Regulations 2.02.01.83)]. Nauch.-issled. in-t osnovanij i podzem. sooruzhenij im. N. M. Gersevanova Gosstroya SSSR [Scientific-research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov of the State Construction Committee of the USSR]. Moskva: Strojizdat, 1986, 415 p. (in Russian).
6. Bulychev N.S. *Mexanika podzemnyx sooruzhenij* [Mechanic of underground structures]. Moskva: Nedra, 1982, 270 p. (in Russian).
7. Mustafaeв A.A. *Osnovy mexaniki prosadochnyx gruntov* [Mechanics fundamentals of collapsing soil]. Moskva: Strojizdat, 1978, 263 p. (in Russian).
8. Mustafaeв A.A. *Raschet osnovanij i fundamentov na prosadochnyx gruntax* [Calculation of bases and foundations on collapsing soil]. Moskva: Vyssh. shk., 1979, 367 p. (in Russian).
9. Mustafaeв A.A. *Fundamenti na prosadochnyx i nabuxayushhix gruntax* [Foundations on collapsing and swelling soil]. Moskva: Vyssh. shk., 1989, 590 p. (in Russian).
10. Motornyj N., Rubanskij V., Sedin V., Motornyj A. and Klymoshenko A., ed. by Szczesniak W. *K voprosu ucheta sil otricatelnogo treniya na bokovoj poverxnosti buroin'ekcionnyx svaj, izgotavlivaemyx po tehnologii pustotelogo*

- shneka* [On the issue of accounting of negative friction forces on the lateral surface of the drilling piles manufactured using hollow auger technology]. Theoretical Foundations of Civil Engineering: proc. Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions (conference). Warsaw University of Technology, Prydneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. Warsaw, September, 2011, vol. 19, pp. 295–302. (in Russian).
11. Motornyj N.A., ed. by Szczesniak W. *Raspredelenie napryazhenij v massive grunta ot sobstvennogo vesa grunta, peredavaemoj po ogranichennoj gorizontol'noj poverxnosti* [The stresses distribution in the soil massif from the intrinsic weight of the soil transmitted along a limited horizontal surface]. Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions (conference). Warsaw, September, 2010, vol. 18, pp. 393–398. (in Russian).
 12. Motornyj N.A. and Motornyj A.N., ed. by Szczesniak W. *Obosnovanie raboty svaj v grunte i formirovanie nesushhej sposobnosti svaj v processe ee pogruzheniya i ekspluatacii* [Piles work substantiation in soil and the bearing capacity formation of piles during its immersion and operation]. Theoretical foundations of civil engineering. Polish-Ukrainian Transactions (conference). Warsaw, May, 2013, vol. 21, pp. 501–508. (in Russian).
 13. Motornyj N., Motornyj A. and Saenko Yu., ed. by Szczesniak W. *Vybor racyonal'nyx metodov melioracii lessovyx prosadochnyx gruntov kak osnovanij fundamentov zdaniy i sooruzhenij* [The choice of rational methods of loess collapsing soils amelioration as bases of foundations of buildings and structures]. Theoretical Foundations of Civil Engineering: proc. Polish-Ukrainian-Lithuanian Transactions (conference). Warsaw University of Technology, Prydneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. Warsaw, May, 2007, vol. 15, pp. 479–489. (in Russian).
 14. Bol'shakov V.I., Motornyj A.N. and Motornyj N.A. *Obosnovanie sil treniya grunta na bokovuyu poverxnost' stvola svaj i podzemnyx sooruzhenij pri izmenenii gidrogeologicheskix uslovij podtoplyaemoj stroitel'noj ploshhadki* [Substantiation of soil frictional forces on the lateral surface of the trunk of piles and underground structures while hydrogeological conditions of the underflooded construction site change]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 7, pp. 10–20. (in Russian).
 15. Bol'shakov V.I., Motornyj A.N. and Motornyj N.A. *Analiz sushhestvuyushhix raschetnyx sxem i vybor optimal'nyx reshenij sxemy raboty svaj v glinistykh gruntax* [Analysis of existing design schemes and choice of optimal solutions for pile work in clay soils]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 9, pp. 10–21. (in Russian).
 16. Motornyj A.N. and Motornyj N.A. *Sovremennye predstavleniya nesushhej sposobnosti zabivnyx svaj (po rezul'tatam pogruzheniya i rabote, svaj v grunte)* [Modern representations of bearing capacity of driven piles (on the results of immersion and work, piles in the ground)]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 32–42. (in Russian).
 17. Kraev V.F. *Inzhenerno-geologicheskaya xarakteristika porod lessovoj formacii Ukrainy* [Engineering-geological characteristics of the loess formation of Ukraine]. Kiev: Naukova dumka, 1971, 227 p. (in Russian).
 18. Krutov V.I. *Osnovaniya i fundamenty na prosadochnyx gruntax* [Bases and foundations on collapsing soil]. Kiev: Budivelnik, 1982, 224 p. (in Russian).
 19. Maslov N.N. *Mexanika gruntov v praktike stroitel'stva (opolzni i bor'ba s nimi)* [Soil mechanics in construction practice (landslides and their control)]. Moskva: Strojizdat, 1977, 320 p.
 20. Cytovich N.A. *Mexanika gruntov* [Soil mechanics]. Moskva: Gosstrojizdat, 1963, 636 p. (in Russian).
 21. Korn G.K. and Korn T.K. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnyx rabotnikov i inzhenerov)* [Guidance of Mathematics (for scientists and engineers)]. Moskva: Nauka, 1973, 831 p. (in Russian).

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

Надійшла до редколегії: 14.11.2017 р.

Прийнята до друку: 24.11.2017 р.