

УДК: 699.841.001.24

СЕЙСМИК ЎТА ЧЎКУВЧАНЛИК ОСТОНАСИ ВА ГРУНТНИНГ СИЛЖИШГА ҚАРШИЛИГИ ОРАСИДАГИ БОҒЛИҚЛИК

Расулов Хаят Заирович,
техника фанлари доктори, профессор;
Расулов Рустам Хаятович,
техника фанлари доктори, профессор;
Бабажанов Мансурбек Бекдурдиевич,
докторант

Тошкент архитектура қурилиш институти

Аннотация. Мақола иншоот заминидаги бўш грунтларнинг муҳим динамик чегара кўрсаткичи – сейсмик ўта чўкувчанлик остонаси ва у билан боғлиқ грунт қатламининг мустаҳкамлик кўрсаткичлари тадқиқотига бағишланган. Тебранма ускунасида ўтказилган тадқиқотлар услуби ёритилган. Грунт боғланиш кучларининг тебраниш жараёнида ўзгариши грунтнинг зичлиги, намлиги ва динамик таъсирнинг кўрсаткичларига боғлиқлиги аниқланган. Грунтнинг қуруқ, намланган ва сувга тўйинган ҳолатига оид боғланиш кучининг чегаравий миқдорлари таҳлил қилинган. Тадқиқот натижалари кучли zilзилалар таъсирида грунт қатламида юзага келувчи сейсмик ўта чўкувчанликка қарши тадбир белгилашда асқатади.

Таянч тушунчалар: грунт, лесс, сейсмик ўта чўкувчанлик остонаси, грунтнинг силжишига қаршилиги, ички ишқаланиш бурчаги, боғланиш кучи.

СВЯЗЬ ПОРОГА СЕЙСМОПРОСАДОЧНОСТИ ГРУНТА С СОПРОТИВЛЕНИЕМ СДВИГУ

Расулов Хаят Заирович,
доктор технических наук, профессор;
Расулов Рустам Хаятович,
доктор технических наук, профессор;
Бабажанов Мансурбек Бекдурдиевич,
докторант

Ташкентский архитектурно-строительный институт

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному исследованию важнейшего динамического показателя грунта – порога сейсмопросадочности и зависимости его от прочности сложения толици, т.е. сопротивляемости слагающих ее грунтов сдвигу. Описана методика проведения исследований на вибрационной установке. Отмечаются изменения сцепления увлажненных лессов при колебании в зависимости от плотности – влажности грунта, интенсивности, длительности и параметров динамического воздействия. Анализируются возможные значения сцепления грунта в сухом, увлажненном и водонасыщенном состояниях. Результаты исследований способствуют назначению защитных мероприятий, предотвращающих сейсмопросадочную деформацию сооружений, нередко имеющих место на слабых грунтах при сильных землетрясениях.

Ключевые слова: грунт, лесс, порог сейсмопросадочности, сейсмопросадочная деформация, сопротивляемость грунта сдвигу, угол внутреннего трения, силы сцепления.

RELATIONSHIP OF THE SEISMIC SUBSIDENCE WITH RESISTANCE OF THE SOIL TO SHIFT

Rasulov Khayat Zairovich,

Doctor of Technical Sciences, Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering, Professor;

Rasulov Rustam Khayatovich,

Doctor of Technical Sciences, Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering, Professor;

Babajanov Mansurbek Bekdurdievich,

Doctoral student

Tashkent Institute of Architecture and Civil Engineering

Abstract. *The article is devoted to experimental research of the major dynamic indicator of soil. The study describes the technique for conducting research on vibrating installation. There are marked changes in the adhesion of moist forest masses depending on density – humidity of soil, intensity, duration and parameteks of dynamic effects. The possible values of soil adhesion in a dry, moist and water-saturated conditions have been analysed. The research results contribute to the appointment of the protective measures, the prevention of seismic subsidence deformations of the constructions that cannot be obtained with weak soils during strong earthquakes.*

Keywords: *a soil, loess, seismic subsidence threshold, seismic subsidence deformation, soil resistance to shift,*

angle of internal friction, adhesion force.

Введение

Разработка научных основ прочности и устойчивости оснований сооружений в сейсмических районах все годы была и остается важнейшей проблемой сейсмостойкого строительства. В этом направлении, например, особое внимание уделяется совершенствованию теории, расчета и методики исследований, учитывающих прочностные и деформационные свойства грунтов, испытывающих статические и динамические воздействия. Вместе с тем повышение сейсмической прочности и устойчивости грунтов оснований сооружений, разработка эффективных способов оценки деформационных свойств грунтов под динамическим воздействием остаются важнейшими вопросами развития данной сферы. В свете этого можно полагать, что глубокое изучение одного из основных показателей динамической прочности грунта – порога сейсмопросадочности – является требованием времени.

Под порогом сейсмопросадочности основания a_{lim} понимается такой критерий сейсмической прочности грунта, при котором колеблющаяся толща сохраняет свою статиче-

скую устойчивость, и одновременно выше его значения начинается нарушение структуры грунта и процесс уплотнения [1].

В соответствии с таким определением этот критерий служит одним из основных показателей сейсмической устойчивости толщи грунта. С порогом сейсмопросадочности связана возможность предотвращения сейсмопросадочных деформаций сооружений, нередко имеющих место на слабых грунтах при сильных землетрясениях.

Для изучения сущности порога сейсмопросадочности представлялась целесообразной постановка экспериментальных исследований с целью установления его зависимости от прочности сложения толщи, т.е. сопротивляемости слагающих ее грунтов сдвигу.

Значения порога сейсмопросадочности различных по физико-механическим свойствам лессов определены посредством виброкомпрессионных испытаний. Эти исследования проведены с ускорениями от 500 до 5000 мм/с², при нагруженности образца нагрузкой, равной 0,25; 0,5; 1,0; 3,0·10⁵ Па на грунты, отобранные через 1 м по глубине, пройденных в толщах выработок.

Исследования Г.Х. Хожметова и Р.Х. Расу-

лова на ненарушенных и нарушенных образцах лессовых грунтов показали, что величины порога сейсмопросадочности a_{lim} зависят главным образом от прочностных свойств грунта, таких как угол внутреннего трения и сцепления [2].

Снижение связности и угла внутреннего трения глинистых грунтов (лессов) при повышении влажности отмечено Е.С. Кушнаревой, Е.С. Вознесенским [3], Х.З. Расуловым [4], Х.А. Рахматулиным, Е.И. Шемякиным [5], В.Т. Трофимовым [6], Т. Kokusho, Т. Аоуаги [7] и др., которые связывают этот процесс в основном с размягчением природного цемента, расклинивающим действием водных пленок и рядом других факторов в рассматриваемых условиях.

Существенному уменьшению по мере увеличения влажности подвергаются силы сцепления за счет утолщения водных оболочек частиц. Частицы грунта при этом отодвигаются друг от друга, выходя из зоны молекулярного притяжения, в результате силы связности между частицами ослабляются. Поэтому при перенасыщении грунта водой он резко теряет свою связность. Одновременно со связностью снижается и угол трения породы, что затрудняет выделение в количественном отношении того или иного фактора (угла трения или связности).

С целью выяснения количественных изменений прочностных параметров лессовых грунтов в зависимости от влажности проведена серия лабораторных опытов на сдвиг.

Материал и методика исследований

В экспериментальных исследованиях широко использованы образцы лессовых грунтов, характеризующихся различными физико-механическими показателями. Они испытывались в условиях нарушенных и ненарушенных состояний на сдвиговом приборе системы Маслова – Лурье. В соответствии с поставленной задачей сдвиг производился медленно, в условиях завершённой консолидации (с предварительным уплотнением образцов лесса) при их заданной влажности.

При испытаниях по этой схеме образцы выдерживались при заданном вертикальном давлении (1,0; 2,0 и $3,0 \cdot 10^5$ Па) до полной стабилизации (0,01 мм за 3 часа) деформаций

сжатия.

В процессе испытаний сдвигающие усилия на предварительно уплотненные образцы передавались ступенями. При этом каждая новая ступень прикладывалась после условной стабилизации (не превышающей 0,01 мм/мин.) деформаций сдвига от предыдущей ступени.

Результаты исследований и их анализ

Полученные результаты показали, что с увеличением влажности грунта прочностные характеристики уменьшаются по определенной закономерности. При этом следует выделить 3 участка:

1. Участок незначительных изменений прочностных характеристик грунтов. Это наблюдается на опытах, проведенных с лессовидными грунтами природного сложения с влажностью на 4-5% меньше, чем на пределе раскатывания. В пределах этого участка отмечаются незначительное изменение угла внутреннего трения и силы сцепления.

2. Участок существенных изменений прочностных характеристик грунтов. По мере дальнейшего увлажнения грунта до водонасыщения (степень влажности $G=0,8$) сила сцепления и угол внутреннего трения уменьшаются в значительной степени (силы сцепления – в 2-10 раз, угол внутреннего трения – в 1,05-1,2 раза).

3. Участок, на котором не происходит изменения прочностных характеристик грунтов. Дальнейшее увеличение влажности (от степени влажности $G=0,8$) вплоть до полного водонасыщения практически не влияет на изменение прочностных характеристик лессовых грунтов.

Результаты опытов по определению изменения связности и угла внутреннего трения лесса в зависимости от влажности при колебаниях $a_c=3000$ мм/с² проиллюстрированы в таблице 1.

Из данных таблицы следует, что при повышении влажности лессов существенному изменению подвергаются силы сцепления. Наибольшие значения силы сцепления и угла трения соответствуют минимальной влажности грунта, а минимальные значения – его состоянию полного насыщения водой.

По данным таблицы также можно про-

Таблица 1

Изменение прочностных характеристик лессов при увлажнении

№ грунта	Плотность сухого грунта, 105 Н/м ³	Естественная влажность, %	Значения сцепления в 10 ⁵ Па и угла внутреннего трения в градусах			
			при естественной влажности		при водонасыщении	
			c	φ	C	φ
Грунт 1	1,42	12	0,015	29	0,0025	25
Грунт 2	1,43	13	0,035	29	0,0026	23
Грунт 3	1,49	11	0,010	28	0,0052	26
Грунт 4	1,56	15	0,0502	30	0,0112	26
Грунт 7	1,48	14	0,0428	28	0,0095	27
Грунт 5	1,48	13	0,0376	31	0,0104	24

следить снижение величины сцепления и угла трения грунта при прочих равных условиях в зависимости от интенсивности динамического воздействия, измеряемой ускорением колебательного движения.

Таким образом можно заключить, что изменение сцепления увлажненных лессов при колебании зависит от их плотности-влажности, интенсивности, длительности и параметров динамического воздействия.

Для установления факторов, влияющих на величину порога сейсмопасадочности (a_{lim}) лессовых пород, были проведены лабораторные опыты по определению изменения сопротивляемости их сдвигу (S) по глубине толщи.

Специально поставленные для выяснения данного вопроса опыты проводились при колебаниях лессовых грунтов, отобранных из

различных горизонтов шурфа. Интенсивность колебательных движений в этих опытах была в пределах 1500-3000 мм/с². Образец грунта загружался нагрузкой 3,0·10⁵ Па. Длительность колебаний равнялась 5 минутам. При рассмотрении этого вопроса большое внимание уделялось сцеплению грунта. Результаты опытов по определению изменения общего сцепления (c) по глубине толщи приводятся на графике (рис. 1).

Значения сцепления соответствуют среднеарифметическим величинам, полученным по результатам 3-4 параллельных испытаний.

На рисунке 2 приведены кривые, построенные по усредненным величинам для каждого принятого интервала глубины рассматриваемой толщи. Установлено, что величина сцепления (c) по глубине толщи самым замет-

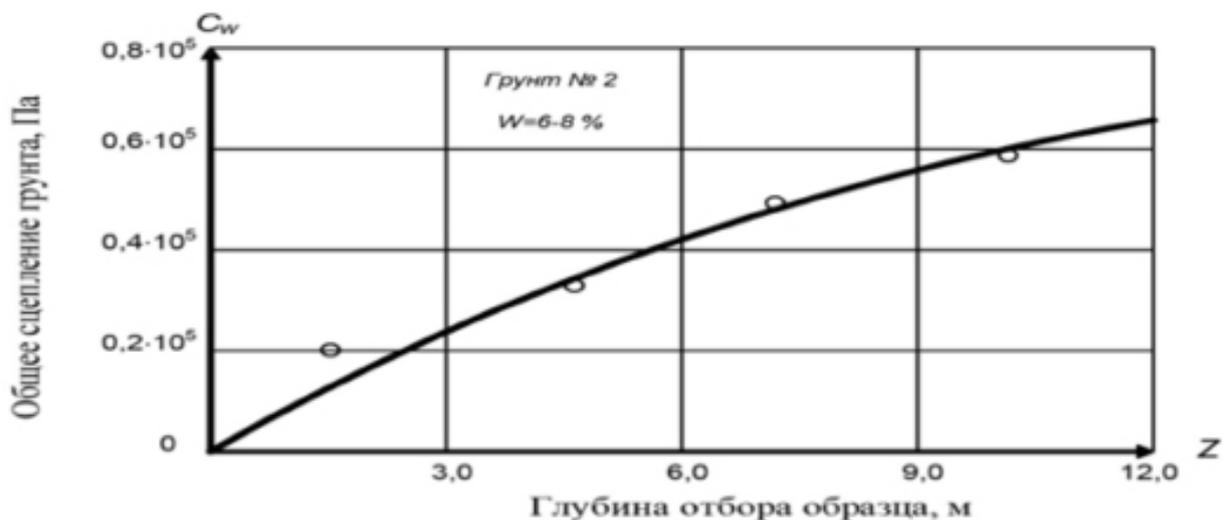


Рис. 1. Характер изменения сцепления лесса по глубине толщи

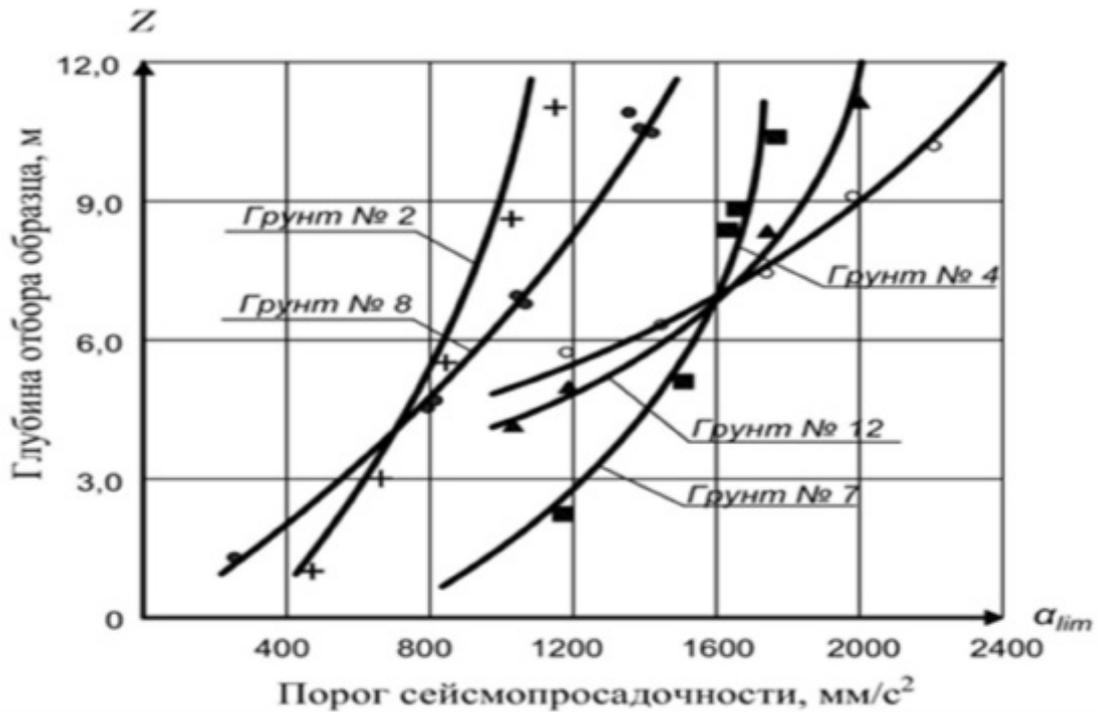


Рис. 2. Изменение порога сейсмостойкости по глубине толщи для разных грунтов

ным образом увеличивается, несмотря на некоторое повышение влажности породы.

Так, например, наиболее низкие значения сцепления $c=0,19 \cdot 10^5$ Па характерны для лессов верхнего трехметрового слоя.

Резкое возрастание сцепления до величины $0,36 \cdot 10^5$ Па прослеживается в интервале глубины 3-6 м, а на глубине 12 м сцепление увеличивается до величины $0,59 \cdot 10^5$ Па. Эти данные свидетельствуют о повышении со-

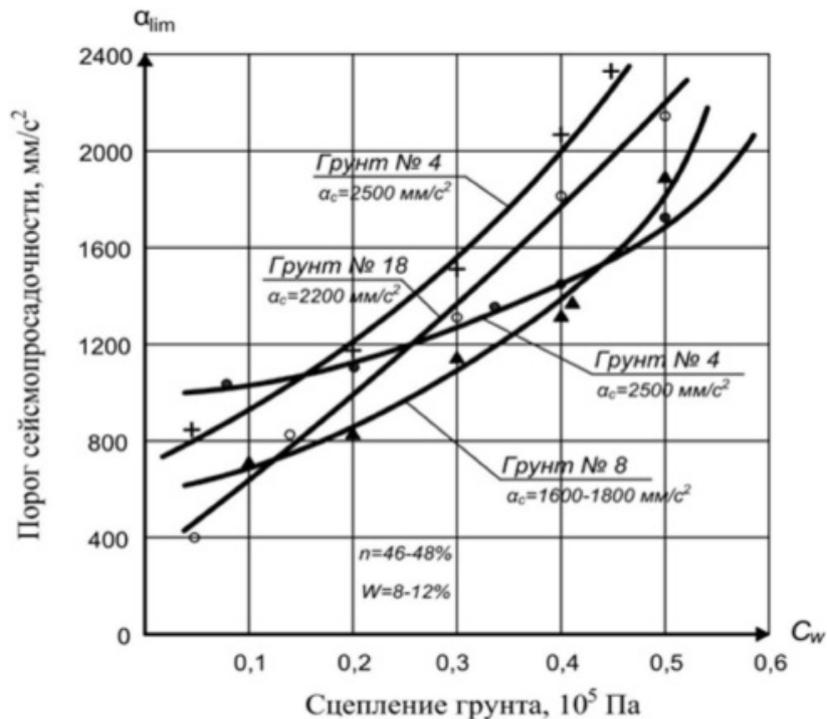


Рис. 3. Зависимость порога сейсмостойкости исследованных грунтов от прочности грунта (сцепления)

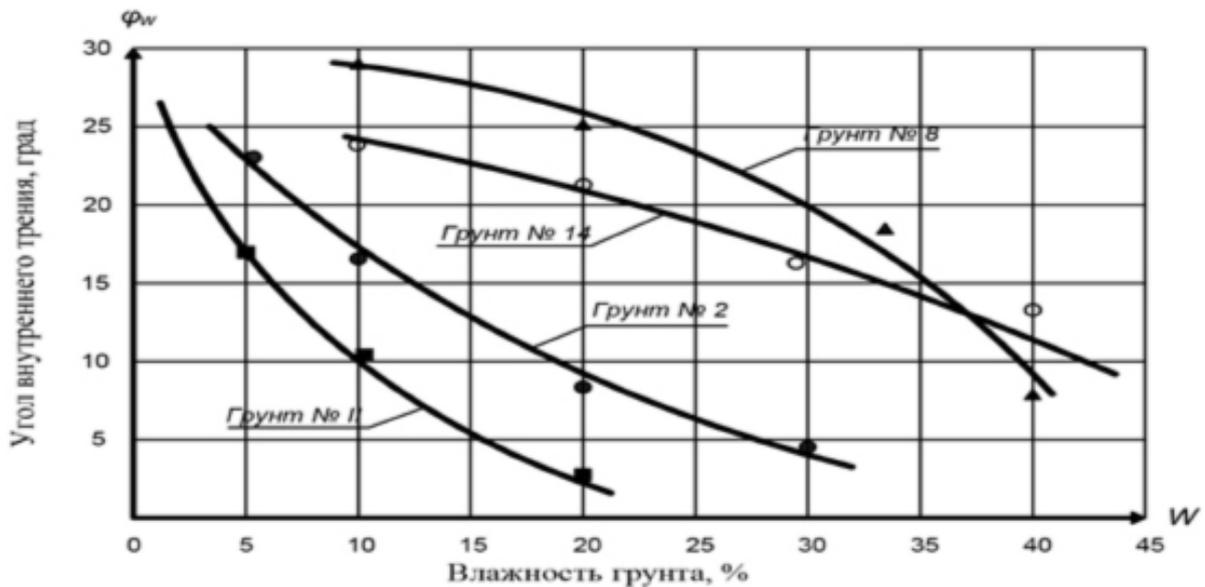


Рис. 4. Изменение прочности грунта (угла внутреннего трения) лессов в процессе увлажнения

противляемости лесса сдвигу по глубине толщ в условиях колебания грунта.

Для установления взаимосвязи между порогом сейсмopосадочности (a_{lim}) и сцеплением (c) построены графики вида $a_{lim} = f(c)$ для грунтов одной глубины залегания.

При совместном рассмотрении результатов опытов по определению порога сейсмopосадочности (a_{lim}) и общего сцепления (c) в зависимости от глубины залегания лессов также выяснилось, что изменение порога сейсмopосадочности зависит от величины сцепления. С увеличением последнего величина порога сейсмopосадочности возрастает.

Так, низкая величина порога сейсмopосадочности $a_{lim} = 300-700 \text{ мм/с}^2$ наблюдается в пределах верхнего 3-метрового слоя (1-3 м), где общее сцепление имеет сравнительно низкое значение. Полученные результаты еще раз подтвердили функциональную зависимость между порогом сейсмopосадочности и общим сцеплением, т.е. $a_{lim} = f(c)$.

При этом необходимо отметить, что небольшое изменение сцепления ($c = 0,45-0,59 \cdot 10^5 \text{ Па}$) в нижележащем слое (6-12 м) приводит к соответствующему возрастанию порога сейсмopосадочности в пределах этого интервала глубины лессовой толщ ($a_{lim} = \text{до } 2000-2500 \text{ мм/с}^2$).

На рисунке 3 приведены результаты вибрационных испытаний лессового грунта.

Грунт №8 практически одинакового состояния до проведения эксперимента подвергался предварительному увлажнению в течение 3-8 суток. Сила сцепления грунта снижалась до величины $0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и пористость составляла от 49 до 44,4%. Затем образцы последовательно подверглись вибрации одинаковой интенсивности, порядка 2500 мм/с^2 . Результаты такого рода экспериментов позволили установить существенную зависимость порога сейсмopосадочности лесса от величины силы сцепления.

Большая или меньшая сопротивляемость грунта к динамическим воздействиям зависит от показателей его прочности – угла трения (ϕ_w) и общего сцепления (c_w).

Значения угла трения и сцепления в лессовых грунтах, как неоднократно подчеркнуто выше, в свою очередь зависят от влажности и уменьшаются с увеличением последней, что свидетельствует о низком значении порога сейсмopосадочности увлажненных грунтов по сравнению с сухими.

На рисунке 4 приводится график изменения угла внутреннего трения лессового грунта в зависимости от его влажности.

До значения влажности для данного грунта, например, 15-20% наблюдается некоторое изменение угла трения (2-3%), а по мере дальнейшего увлажнения отмечается резкое уменьшение угла трения. По-видимому, это

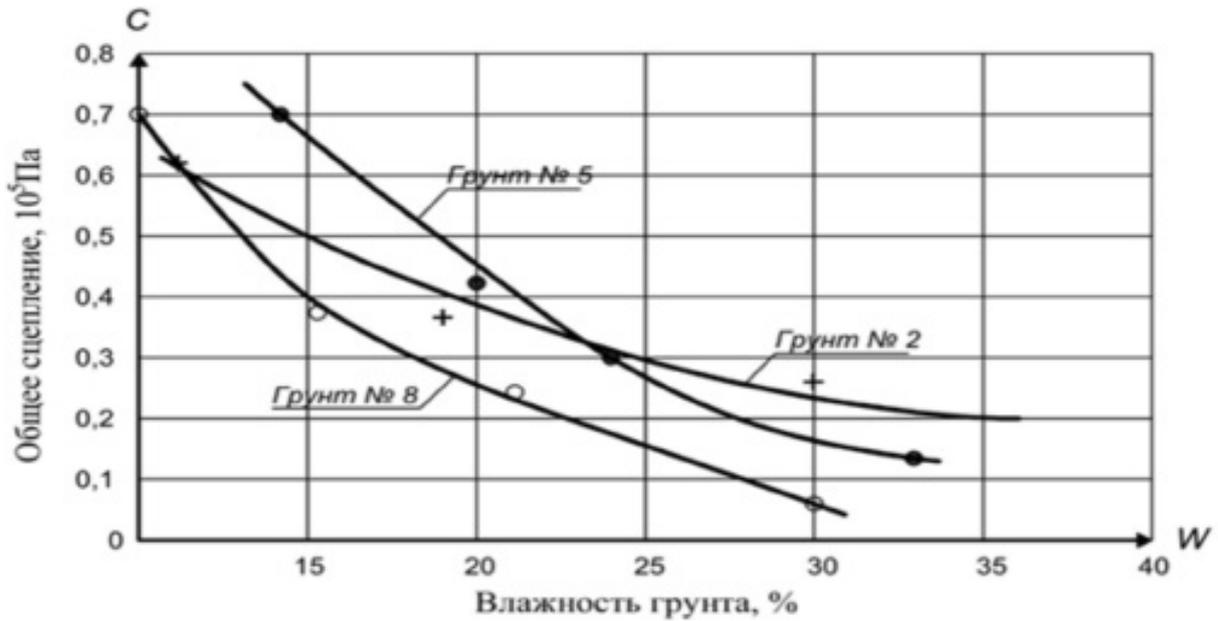


Рис. 5. Снижение прочности лесса (связности) при увлажнении

объясняется прямым следствием утолщения при переувлажнении грунта гидратных оболочек на частицах с прогрессирующим нарушением и уменьшением числа контактов между частицами. Можно также предполагать, что уменьшение прочности водонасыщенных глинистых грунтов происходит в результате снижения угла внутреннего трения.

Экспериментальное подтверждение такого вывода представляется практически невозможным в связи с проявлением в этих условиях влияния сцепления грунта. Дело в

том, что с увеличением расстояния между частицами в результате утолщения водных оболочек ослабляется воздействие молекулярных сил. При этом одновременно с уменьшением угла трения снижается и сцепление породы. В рассматриваемых условиях выделение (в количественном выражении) угла внутреннего трения или сцепления в условиях вибрации весьма сложно. Поэтому целесообразнее оценивать прочностные характеристики (ϕ и c) лессовых грунтов в зависимости от влажности (рис. 5).

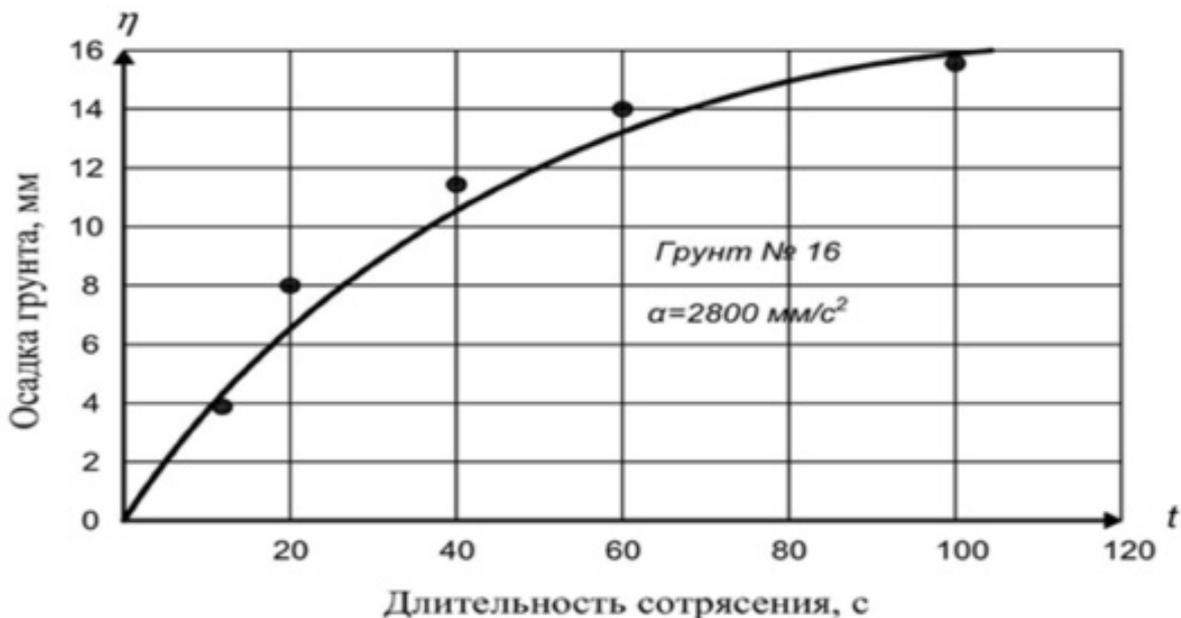


Рис. 6. График изменения осадков сухого лесса во времени

Вместе с тем сухие лессы характеризуются наличием в структуре связей жесткого сцепления (c_c), содержащегося в составе неустойчивых в воде солей, которые благодаря их слабости быстро нарушаются по мере увлажнения.

Это обстоятельство дает возможность представить сопротивление (прочность) сдвигу сухих лессов в виде:

$$S_{\text{сух}} = \sigma_{\text{дин}} \cdot \text{tg}\varphi + c_c \quad (1)$$

где: $\sigma_{\text{дин}}$ – динамическое напряжение на частицах грунта от веса внешней нагрузки и веса самого грунта; φ – угол внутреннего трения; c_c – жесткое структурное сцепление.

В соответствии с выражением (1), прочность сухих лессов под динамической нагрузкой может считаться независимой от времени колебания, что дает возможность заключить, что деформация лессовых грунтов в сухом состоянии происходит сразу с момента преодоления сейсмическим ускорением величины порога сейсмопросадочности.

В качестве примера на графике (рис. 6) отражены результаты опытов, проведенных на лессовых грунтах, отобранных с глубины 6 м.

По данным графика, деформация сухих лессов начинается сразу с момента преодоления динамической нагрузкой порога сейс-

мопросадочности, характерного для данного грунта, что подтверждает наш вывод о независимости структурного сцепления и угла трения от времени сотрясения.

В водонасыщенных лессах в пластичном состоянии силы внутреннего трения (φ_w) и жесткие структурные связи (c_c) практически отсутствуют. Структурная прочность таких грунтов характеризуется наличием водно-коллоидной связности c_w (вместо c_c), которая непосредственно зависит от толщины водных оболочек на поверхности грунтовых частиц. Отсюда следует, что для таких грунтов сопротивляемость сдвигу можно представить в следующем виде:

$$S_{\text{пл}} = c_w \quad (2)$$

Из этого равенства следует, что прочность водонасыщенных лессов зависит от состояния влажности, и поэтому нарушение их связности носит постепенный характер при соответствующих колебаниях.

Согласно исследованиям, эти разновидности лессов способны к сейсмопросадочной деформации при самых незначительных воздействиях, так как они характеризуются небольшими значениями порога сейсмопросадочности $a_{\text{лим}}$ (рис. 7).

Мало увлажненные лессы характеризу-

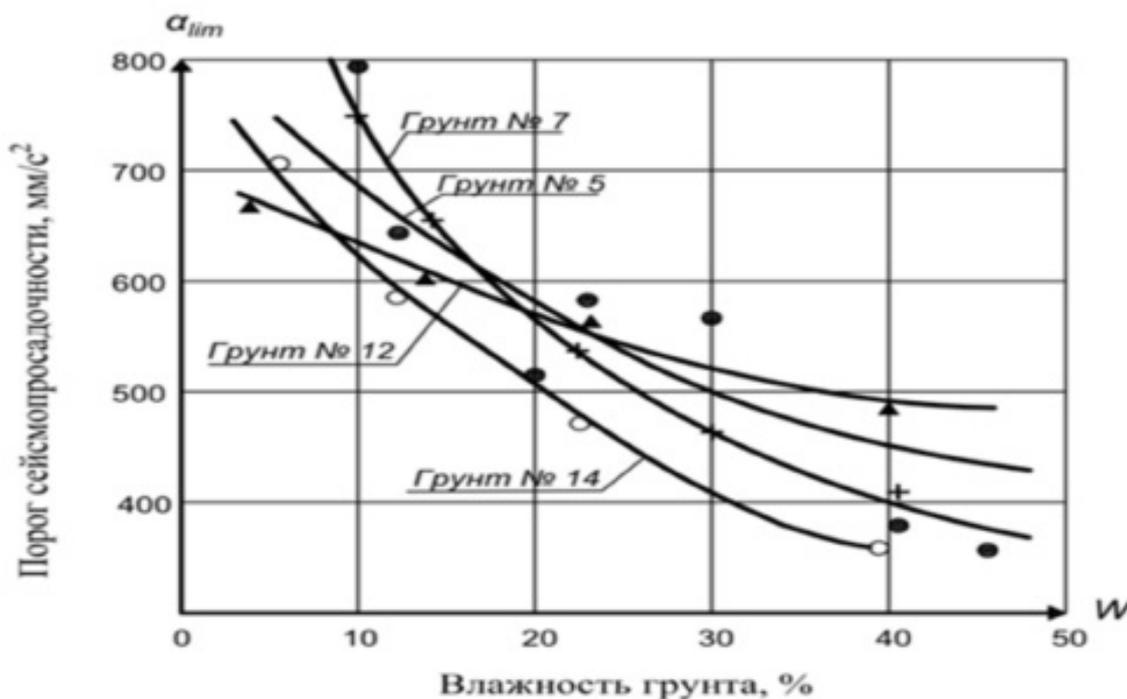


Рис. 7. Изменение порога сейсмопросадочности при повышении влажности пластичных лессов

ются наличием в них прочности внутреннего трения (φ_w) и связности (c_w), а иногда, в весьма слабой форме, и структурного сцепления (c_s).

Учитывая это обстоятельство, сопротивляемость сдвигу увлажненных лессов представляется в виде:

$$S_{pw}(t) = \sigma_{\text{дин}} \cdot \text{tg} \varphi_w + c_w(t) + c_s \quad (3)$$

где: $S_{pw}(t)$ – сопротивляемость грунта сдвигу на тот или иной момент времени в процессе колебания; φ_w – угол внутреннего трения грунта при влажности w ; $c_w(t)$ – водно-коллоидная связность грунта на момент времени t в процессе колебания. Для нарушения структуры малоувлажненных грунтов и проявления у них сейсмопросадочной деформации требуется несколько большее ускорение и длительность колебания благодаря их повышенной прочности. Однако в данном случае решающими оказываются: величины связностей (c_w , c_s) и интенсивность динамического воздействия. Вместе с тем, природная влажность грунта также играет существенную роль, повышение которой всегда связано со снижением связности грунта, что влечет за собой уменьшение свойственной этим грунтам порога сейсмопросадочности $a_{\text{лим}}$.

Выводы

1. Составляющие сопротивляемости сдвигу внутреннее трение (φ) и структурное сцепление (c_s) не зависят от времени сотрясения лессовых грунтов. В то же время пластичная связность (c_w) существенно зависит от времени колебания в условиях $a_c > a_{\text{лим}}$, уменьшаясь по величине в определенных условиях до нуля.

2. Нарушение структуры и образования сейсмопросадочной деформации увлажненных лессов требуют более или менее длительное колебание, необходимое для ослабления структурной прочности грунта. При этом структурная прочность их обусловлена значениями структурного сцепления, связности, угла внутреннего трения, а также нормального напряжения, действующего на колеблющиеся частицы, которые при всех условиях определяют порог сейсмопросадочности грунта.

3. Многие глинистые грунты могут оказаться устойчивыми в сейсмическом отношении, если они обладают достаточной сопротивляемостью сдвигу. Длительность одной или нескольких фаз землетрясения в этих случаях окажется недостаточной для нарушения структурной прочности грунта, что является важным с точки зрения сейсмической устойчивости оснований сооружений.

4. Результаты проведенных исследований способствуют совершенствованию теории сейсмостойчивости оснований сооружений, возводимых на лессовых просадочных грунтах

Источники и литература

1. Расулов Х.З. *Сейсмостойкость грунтовых оснований*. – Т.: Узбекистан, 1984. – 192 с.
2. Хожметов Г.Х., Расулов Р.Х. *Сейсмопросадочная деформация увлажненных лессовых грунтов // Строительство и архитектура Узбекистана*. – Ташкент: 2008. – № 4. – С. 31-33.
3. Кушнарера Е.С., Вознесенский Е.А., Сидорова А.И. *Сравнительная характеристика сейсмической разжижаемости песков О. Сахалин по данным статического зондирования и лабораторных динамических испытаний // Труды III Центрально-азиатского Международного геотехнического симпозиума*. – Душанбе, 2005. – С. 85-88.
4. Расулов Х.З., Артыкбаев Д. *Изменение параметров прочности грунта в теле откоса при динамических воздействиях // Сборник докладов Международной научной конференции «Геофизические методы решения актуальных проблем современной сейсмологии»* – Ташкент, 2018. – С. 470-473.
5. Рахматулин Х.А., Шемякин Е.И., Демьянов Ю.А. *Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках // Серия классическая университетская литература*. – М.: МГУ, 2008. – 624 с.
6. Трофимов В.Т. *Инженерная геология массивов лессовых пород*. – М.: МГУ, 2008. – 398 с.
7. Kokusho T, Aoyagi T. *In city soil specify non linear properties back calculated from vertical array record during 1995. // Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, – ASCE, 2005. – Pp. 473-480.

Рецензенты:

Хожметов Г.Х, доктор технических наук, профессор,

Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог