

УДК 502/504:624.15.1

С. Г. ЮРЧЕНКО

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва

ИСПЫТАНИЕ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ В ЛОТКЕ КАК МОДЕЛИ ОСНОВАНИЙ СЕТЕВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Под небольшими гидротехническими сооружениями на лессовых просадочных грунтах большая часть фильтрующей воды из них перемещается не только вниз, но и в стороны, образуя область замачивания, зависящую от давления и количества профильтрованной воды. Последнее обстоятельство не учитывается при определении ожидаемой величины просадки, полученных по данным компрессионных испытаний. Предложено различать определение ожидаемой величины деформации просадочного основания для различных типов гидросооружений по области замачивания под ними и нагрузки от них путем определения характеристик просадочности лессовых грунтов в различных условиях, а не только по модели компрессионных испытаний, так как они дают заниженные величины просадочных деформаций для гидросооружений небольшой ширины на лессовых основаниях большой мощности, имеющих область замачивания большей площади подошвы их фундаментов вследствие длительного увлажнения фильтрационным потоком. Выявлено, что при получении величин просадочных деформаций, определенных по результатам испытаний образцов лессового грунта в лотке при возможности увлажнения и деформации образца под сооружением не только вниз, но и в стороны при тех же значениях влажности. Сравнение результатов позволило получить корректирующие коэффициенты, уточняющие характеристики просадочности, полученные по стандартным испытаниям в одометре. В статье показаны результаты испытания лессового грунта как основания модели опоры акведука в лотке при различных влажностях замачивания для определения величин просадки. Приводится сравнение и анализ полученных результатов с основными формулами, рекомендуемыми для определения ожидаемой величины просадки в нормативных документах.

Лоток, лессовый грунт, просадка, лабораторные испытания.

Under small hydraulic structures on loess subsiding soils a big part of the filtering water is moving from them not only downwards but also aside forming an area of watering which is dependent on pressure and quantity of the filtered water. The latter circumstance is not taken into consideration when determining the expected value of subsidence obtained according to the data of compressive tests. It is proposed to distinguish the definition of the expected value of deformation of the subsiding foundation for different types of hydraulic structures on the area of watering under them and loading from them by determination of the characteristics of the loess soils subsidence under different conditions, not only on the model of compressive tests as they give too low values of subsidence deformations for hydraulic structures of a small width on loess foundations of high power which have a bigger area of watering than the square of the foundation bases due to the prolonged watering by the filtration flow. It is revealed that when obtaining the values of subsiding deformations determined according to the results of tests of loess soil samples in the tray with the possibility of moistening and deformation of the sample under the structure not only downwards but also aside under the same values of moisture. Comparison of the results allowed receive adjusting coefficients which specify characteristics of subsidence obtained according to standard tests in odometer. The article shows the results of loess soil tests as a foundation of the supporting model of aqueduct in the tray under different moistures of watering for determination of subsidence values. There is given a comparison and analysis of the obtained results with basic formulas recommended for determination of the expected value of subsidence in the normative documents.

Tray, loess soils, subsidence, laboratory tests.

Для обеспечения проектной надежности сооружения на лессовых грунтах, назначения метода устройства и параметров искусственных оснований необходимо иметь как можно более достоверный расчетный прогноз величины ожидаемой просадки S_{sl} .

В СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» [1] просадка лессовых грунтов при увеличении их влажности вследствие кратковременного замачивания больших площадей сверху или снизу при подъеме уровня подземных вод определяется по формуле:

$$S_{sl} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl,i} h_i k_{sl,i}, \quad (1)$$

где $k_{sl,i}$ – коэффициент, принимаемый при ширине фундамента $b < 3$ м по формуле $k_{sl,i} = 0,5 + 1,5(p - p_{sl,i})/p_0$; при $b > 12$ м $k_{sl,i} = 1$ для всех слоев грунта в пределах зоны просадки; p – среднее давление под подошвой фундамента, кПа (кг/см²); $p_{sl,i}$ – начальное просадочное давление i – слоя, кПа; p_0 – давление, равное 100 кПа (1кг/см²); при $3 < b < 12$ м $k_{sl,i}$ определяется по интерполяции между значениями $k_{sl,i}$, полученными при $b = 3$ м и $b = 12$ м.

Для учета снижения величины просадки при ожидаемом неполном водонасыщении грунта рекомендуется определять относительную просадку ε'_{sl} по специальной формуле и подставлять ее в формулу (1) вместо $\varepsilon_{sl,i}$. Влияние ширины площади замачивания B_w сверху через малые площади, когда $B_w < H_{sl}$ (где H_{sl} – величина просадочной толщи), учитывается снижением размера просадки от собственного веса грунта специальной формулой.

Так как СП 22.13330.2011 регламентирует условия проектирования оснований гражданских и промышленных зданий и сооружений, увлажнение под которыми рассматривается как кратковременное, аварийного характера, а продолжительная фильтрация воды не ожидается, то и определение величины послепросадочной деформации не предполагается.

Проектирование гидросооружений оросительных систем на просадочных грунтах регламентируют «ВСН 33-2.2.06-86. Мелиоративные системы и сооружения. Оросительные системы на просадочных грунтах. Нормы проектирования» [2]. Расчет деформации просадочных грунтов по ВСН 33-2.02.06-86 для увлажняющих длительное

время основания гидросооружений рекомендуется выполнять по формуле:

$$S_w = m_p m_{wt} \sum_0^{H_{sl}} \varepsilon_{sl,p} h_i m, \quad (2)$$

где S_w – полная деформация основания при длительном увлажнении, включающая кратковременную просадку S_{sl} и послепросадочную деформацию S_{wt} за время t ; $\varepsilon_{sl,p}$ – относительная просадка грунта i -го слоя при расчетном давлении p , определяемая по результатам компрессионных испытаний; m_0 – коэффициент, учитывающий формоизменение (горизонтальные деформации) грунта в пределах сжимаемой зоны грунта под фундаментом; m_p – коэффициент, учитывающий влияние размеров и формы объекта замачивания; m_{wt} – коэффициент, учитывающий длительность увлажнения грунта.

Анализируя основные формулы (1) и (2) в двух нормативных документах, прежде всего, необходимо отметить, что в них вертикальные просадочные деформации подсчитываются по модели компрессионного сжатия (одноосное вертикальное нагружение образца в компрессионном приборе), моделирующее сжатие небольшой мощности слоя основания без возможности его бокового расширения. По-видимому, это упрощающее допущение является одной из возможных причин, приводящей в некоторых случаях к расхождениям между расчетным прогнозом и действительно наблюдаемыми размерами просадок, вызывающими аварийные ситуации при эксплуатации гидросооружений.

Для сближения результатов расчетов просадочных деформаций, полученных по компрессионной модели, с реально наблюдаемыми сооружениями используются корректирующие эмпирические коэффициенты условий работы, иногда неопределенные по учитываемым ими факторам.

С нашей точки зрения, необходимо различать определение ожидаемой величины деформации просадочного основания для различных типов гидросооружений по области замачивания под ними и нагрузки от них путем определения характеристик уплотняемости лессовых грунтов в различных условиях, а не только по модели компрессионных испытаний, хотя и с поправочным коэффициентом.

Для условий гидромелиоративного строительства, когда необходимо определить ожидаемую величину просадки гидросооружений на лессовых основаниях большой мощности, имеющих область

замачивания больше площади подошвы их фундамента вследствие длительного увлажнения фильтрационным потоком, модель компрессионного сжатия для определения относительной просадки становится неприемлемой. Кроме того, при определении относительной просадки по результатам компрессионных испытаний предполагается, что грунт лессового основания при увлажнении деформируется только в вертикальном направлении, боковые деформации грунта от действия горизонтальных составляющих уплотняющих напряжений при этом не принимаются во внимание. Однако, как показывают результаты сравнения расчетов многих исследователей ожидаемой просадки с натурными данными, компрессионные испытания дают заниженные величины дополнительных деформаций сооружений, возникающих при увлажнении их лессовых оснований. Результаты исследований просадочных деформаций многих ученых показали, что их характер зависит от ширины подошвы фундамента сооружения. Под распластанными сооружениями просадка происходит без бокового расширения, и в этих условиях компрессионные испытания дают результаты, сопоставимые с натурой. Но под узкими фундаментами деформация просадки происходит с боковым выпором грунта. Как показали опыты, проведенные В. И. Крутовым [3], фактическая просадка сооружений (в г. Никополе) оказалась в 2...2,8 раза больше, чем расчетная с учетом данных компрессионных испытаний. Причину таких несовпадений автор объясняет наличием бокового выпора грунта, не учитываемого при расчете. Следует, однако, отметить, что сравнение величин вертикальных и горизонтальных перемещений, по данным А. А. Мустафаева [4], показывает, что боковые перемещения значительно меньше вертикальных и составляют около 15 % от их величины. Расхождение между фактическими и расчетными величинами просадки автор объясняет тем, что просадка по своей природе носит явно пластический характер, а не является деформацией уплотнения, как принято в нормативных документах, и, следовательно, компрессионные приборы не способны моделировать работу грунта в фазе пластических деформаций.

Для приближения модели лаборатор-

ного исследования просадочных свойств лессового грунта к реальным условиям их работы под неширокими сетевыми гидротехническими сооружениями гидро-мелиоративных систем нами были проделаны испытания такого грунта в лотке.

В связи с невозможностью создания в искусственном модельном грунте условий подобия характеристикам реального грунтового основания в эксперименте использовались образцы натурального грунта естественного сложения, отобранные в виде монолитов.

Так как в лабораторной модели системы «ГТС – основание» использован натуральный грунт естественной структуры, то и напряжения σ_z , передаваемые опорой ГТС на основание, и его относительная деформация ϵ_{sl} должны быть равны реальным.

В лаборатории были проделаны испытания лессового основания для двух видов модели сооружения в лотке:

1. Плоская модель сооружения;
2. Осесимметричная модель сооружения.

В первом случае ширина лотка была равна ширине штампа, имитирующего ширину подошвы сооружения, а длина лотка была принята в три раза больше длины штампа. Во втором случае ширина лотка была принята в два раза больше ширины штампа при той же длине лотка.

Лабораторная модельная установка системы «опора акведука лоткового канала – лессовое основание», разработанная А. М. Силкиным [5] для штамповых испытаний грунтов, представляет собой лоток размерами:

в первом случае $3b \times b$ и высотой $h = 4b$, где b – ширина штампа;

во втором случае два вида модели сооружения два вида модели сооружения $3b \times 3b$ и высотой также $h = 4b$.

Так как $b = 10$ см, то лоток имел размеры $30 \times 10 \times 40$ см или $30 \times 30 \times 40$ см. Размеры монолита грунта назначены таковыми, чтобы они соответствовали возможным контурам замачивания грунта основания от моделируемого относительно неширокого гидросооружения.

Одна сторона лотка выполнена из прозрачного оргстекла. В лоток помещается модель основания – натуральный грунт в виде монолита в естественном по ориентации состоянии. На лицевой стороне монолита,

примыкающей к оргстеклу, прежде чем помещать в лоток, наносилась несмываемой краской сетка размерами 2 x 2 см. Во избежание застенной фильтрации передняя поверхность монолита тщательно выравнивалась для наиболее плотного прилегания к лицевой стороне ящика. Прозрачная стенка необходима для возможности визуального фиксирования изменения контура промачивания модельного грунтового основания, а также изменение его деформативного состояния после приложения к нему через штамп постепенно увеличивающейся ступенями нагрузки. Лоток размещался на металлическом столе с нагрузочной системой, позволяющей передавать на модель грунта нагрузку так называемым «мертвым грузом» ступенями, начиная с 6,5 кПа, через жесткий штамп толщиной $t = 1$ см и размерами в плане 10 x 10 см (имитация плиты опоры акведука оросительного канала с реальными размерами подошвы 2,0 x 2,0 м). Штамп с нагрузочной системой соединялся жестко. Нагрузка ступенями доводилась до расчетной нагрузки

от выбранного типа гидросооружения. Для замеров деформаций лессового грунта от нагрузки и при замачивании применялись прогибомеры ЛИСИ.

После суток консолидации грунта под нагрузкой и снятия начального отсчета по индикатору вокруг штампа заливалось строго дозированное количество воды и поддерживалось во все время инфильтрации ее через грунт модели до завершения просадки. При этом производился замер времени и отсчет деформаций. С продвижением контура увлажнения под штампом вглубь монолита грунта по координатной сетке на соответствующее время определялась мощность замоченного слоя h_i (см), а затем последовательно и мощность других замоченных слоев h_i как разность отметок их нижних границ увлажнения по сетке. Одновременно по отметкам (индикатора) устанавливается уменьшение высоты i -го слоя при замачивании Δh_i (вертикальная просадка слоя). Результаты эксперимента приведены в таблице № 1.

Таблица 1

Сравнение результатов штамповых испытаний образцов лессового грунта ненарушенной структуры с результатами компрессионных испытаний образцов одного и того же грунта

Нагрузка на образец p , МПа	Относительная деформация ϵ_{sl} , %		K
	Компрессионные испытания ϵ_{slk}	Штамповые испытания ϵ_{slm}	
Природная влажность $W = 8\%$			
0,05 0,1	0,29 0,69	0,67 1,17	2,31 1,69
Замачивание водой $W = 16\%$			
0,05 0,1	1,35 4,6	3,2 7,8	2,37 1,70
Замачивание водой $W = 21\%$			
0,05 0,1	2,3 5,2	5,7 9,6	2,48 1,85
Замачивание водой $W = 26\%$			
0,05 0,1	3,2 6,1	8,3 13,4	2,59 2,20

В таблице 1 приведены значения относительной деформации, полученные при испытаниях образцов одного и того же лессового грунта при передаче на них одних и тех же ступеней нагрузок и замоченных до одной и той же влажности в одомере и в лотке. Сравнение результатов испытаний образцов одного и того же лессового грунта в лотке и в одомере при одних и тех же величинах влажности при замачивании их после нагружения дало возможность получить коэффициент, корректирующий компрессионную схему расчета для учета бокового расширения

грунта при просадке. Он равен:

$$K = \epsilon_{slm} / \epsilon_{slk},$$

где ϵ_{slk} – относительная просадка по данным компрессионных испытаний; ϵ_{slm} – относительная просадка по данным штамповых испытаний.

С некоторым приближением можно считать коэффициент пересчета результатов компрессионных испытаний с учетом бокового расширения грунта коэффициентом условия работы и равным для лессовидных суглинков.

Как видно из таблицы 1, величины относительной просадки лессового грунта при штамповых испытаниях в лотке ϵ_{slm}

в среднем в 2,4 раза больше относительной просадки ε_{slk} при компрессионных испытаниях при давлении $p = 0,05$ МПа и влажности в диапазоне от природной до 26 % и в 1,9 раза $\varepsilon_{\text{slm}} > \varepsilon_{\text{slk}}$ при тех же условиях. Сравнение результатов испытаний подтверждает то, что просадка основания под гидросооружением небольшой площади происходит с большими боковыми (поперечными) деформациями, ко-

торые более чем в два раза увеличивают вертикальную составляющую наблюдаемой просадки.

Кроме того проводились определения величин относительной просадки при испытаниях образцов лессового суглинка, замоченных до различных влажностей при испытаниях их в плоской и в осесимметричной моделях лотка. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение величин относительной просадки, полученных при испытаниях лессового суглинка на различных моделях

$p = 0$ МПа		$p = 0,05$ МПа		$p = 0,1$ МПа		$p = 0,2$ МПа	
плоская	осесим	плоская	осесим	плоская	осесим	плоская	осесим
Природная влажность $W = 8$ %							
0	0	2,3	1,9	3,4	2,5	5,3	3,1
Влажность замачивания $W_{\text{sl}} = 16$ %							
0,4	0,3	3,4	2,9	5	3,7	7,5	4,3
Влажность замачивания $W_{\text{sl}} = 21$ %							
0,61	0,5	4,5	3,7	6,8	5,2	9,4	8,7
Влажность замачивания $W_{\text{sl}} = 26$ %							
0,71	0,71	4,5	4,5	7,6	7,6	11,7	10,5
Влажность замачивания $W_{\text{sl}} = 28$ %							
0,92	0,92	2,3	5,1	9,2	2,5	13,5	12,9

По мере распространения влаги вниз постепенно вовлекались в работу слои увлажненного грунта не только расположенные под подошвой штампа, но и грунт, находящийся в сторону от него. Как показала обратная раскопка после завершения эксперимента, влажность грунта сразу под подошвой штампа и чуть ниже от него была больше влажности ниже лежащих слоев грунта, хотя они были тоже в водонасыщенном состоянии, что можно объяснить тем, что в силу жесткости штампа сразу под ним и в углах его возникает концентрация напряжений.

Очевидно, что чем больше происходит насыщение грунта водой и увеличение области замачивания, тем больше становится величина просадки. Области пластической деформации возникают, прежде всего, сразу под штампом и под краями его и далее по мере продвижения фронта увлажнения область деформированного грунта распространяется вниз на глубину, равную примерно $2,5b$ и на $1,5b$ в каждую сторону от штампа, где b – ширина штампа.

Как показал анализ результатов экспериментов, существует предельное

значение влажности, после достижения которой величина деформации грунта резко возрастает и происходит практическое разрушение грунта, хотя нагрузка при этом не увеличивалась и оставалась постоянной. По достижении этой влажности штамп резко опускается вниз и вокруг него образуются бугры выпирания. Причем такая же картина наблюдается как при испытании лессового грунта в плоском лотке, так и при осесимметричном испытании. При этом, как показали эксперименты, картина разрушения при достижении критической влажности $W = 28$ % в осесимметричном лотке наступает при нагрузке $p = 0,015$ МПа, а при испытании в плоском лотке значение критической влажности мало меняется ($W = 26$ %), а критическая нагрузка увеличивается до значения $p = 0,04$ МПа. Дальнейшее увеличение влажности вызывает непрерывное возрастание деформации пластического течения, т. е. в отличие от непросадочных грунтов, где потеря прочности и пластическое течение наступает при достижении второй критической нагрузки, в лессовых грунтах пластическое течение наступает не от

увеличения нагрузки, а от достижения критической влажности.

По мнению автора такое поведение грунта объясняется тем, что по достижении критической влажности грунт переходит в текучее состояние и его несущая способность резко уменьшается от существенного уменьшения прочностных характеристик грунта: угла внутреннего трения φ и удельного сцепления c . Разные значения критических нагрузок можно объяснить тем, что в осесимметричном лотке есть возможность образования бугров выпирания не только слева и справа от штампа, как в плоском лотке, но и спереди и сзади от него, что и убыстряет наступление момента разрушения. Необходимо отметить, что, как показали эксперименты, при увлажнении лессового грунта существенно уменьшается величина удельного сцепления, падая практически до нуля, угол внутреннего трения при этом уменьшается незначительно, что объясняется природой лессовых грунтов, где прочность в основном обеспечивается сцеплением между частицами грунта, а трение между ними играет незначительную роль в связи с их большой пористостью и малой природной плотностью.

Выводы

При расчете величины деформации верхней части лессового массива под узкими гидросооружениями с дополнительным давлением от него на основание $p < 0,15$ МПа деформационные характеристики лессов необходимо определять способами, позволяющими учитывать способность лессового грунта к деформациям как в вертикальном,

так и в горизонтальном направлениях, например, при помощи штамповых испытаний образцов лессового грунта ненарушенной структуры в лотке или в стабилометрах.

Сравнение результатов испытаний подтверждает, что просадка основания под гидросооружением небольшой площади происходит с большими боковыми (поперечными) деформациями, которые более чем в два раза увеличивают вертикальную составляющую наблюдаемой просадки.

1. Основания зданий и сооружений: СП 22.13330.2011. – М., 2011. – 259 с.

2. Мелиоративные системы и сооружения. Оросительные системы на просадочных грунтах. Нормы проектирования: ВСН 33-2.2.06-86*. – М., 2006. – 128 с.

3. Крутов В. И. Расчет фундаментов на просадочных грунтах. – М., 1972. – 306 с.

4. Мустафаев А. А. Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах. – М.: Высшая школа, 1979. – 368 с.

5. Силкин А. М., Юрченко С. Г. Проектирование песчаных подушек для гидротехнических сооружений на торфах // Гидротехника и мелиорация. – 1973. – № 8. – С. 18–19.

Материал поступил в редакцию 24.04.2015.

Юрченко Светлана Геннадьевна, кандидат технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости»

E-mail: iurchenko.sweta@yandex.ru

Тел. +7-929-564-32-09