

О ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД

И. П. Иванов

Развернувшееся социалистическое строительство как в пределах Советского Союза, так и в странах народной демократии в ряде случаев связано с использованием лёссовых пород в качестве основания для разного рода сооружений. При этом основной инженерно-геологической особенностью этих пород, вызывающей осложнения при строительстве и эксплуатации, является их способность проявлять при дополнительном увлажнении неравномерное, преимущественно быстрое уплотнение — просадочность. Последняя, как известно, происходит как под влиянием давления сооружения, так и под влиянием веса вышележащих увлажненных пород, но чаще от того и другого. Предложение некоторых авторов [6] называть явление неравномерного уплотнения при увлажнении «дополнительной осадкой», если оно вызвано внешней нагрузкой, и отличать его от просадки, вызванной якобы только весом увлажненных пород, не имеет достаточных оснований. Оба явления имеют одну и ту же природу — уплотнение при дополнительном увлажнении и действии давления. Очевидно, без давления последнего, независимо от того, какова его природа, уплотнения не произойдет. Кроме того, в практику инженеров-строителей и инженеров-геологов понятие «дополнительная осадка» вошло как термин, обозначающий появление новых деформаций в горной породе после стабилизации в определенных условиях. Понятие «просадка» вполне четко характеризует явление, присущее лёссовым породам.

Просадка вызывается водой, поступающей в лёссовую породу с поверхности или при подъеме уровня грунтовых вод. Природа этого явления еще не вполне ясна, хотя накопившийся материал по изучению просадочности позволяет уже высказать некоторые предположения. Природа просадки достаточно сложная и зависит от целого ряда факторов. Объяснять ее одним каким-либо свойством породы, по-видимому, можно только в самом первом приближении. Связь ее с наличием макропор и их заплыванием [1, 7], так же как и с вымыванием солей [4], в настоящее время нельзя считать доказанной.

Проведенные нами исследования некоторых лёссовых пород Украины показывают, что просадочными могут быть и такие разности, в которых не содержатся воднорастворимые соли и которые не имеют явно выраженной макропористости в виде наблюдаемых невооруженным глазом вертикальных канальцев. Кроме того, проседают иску-

ственно приготовленные пасты из грунтовой массы разрушенной лёссовой породы, если в этих пастах имеется определенное соотношение между пористостью и влажностью. Нет сомнения в том, что макропоры, как поглотители частиц распадающихся агрегатов, и воднорастворимые соли в сильно засоленных породах играют существенную роль в процессе просадки, но они не могут являться определяющими. Как известно, существуют явно макропористые и сильно засоленные породы, которые тем не менее не склонны давать просадку.

Признавая разнообразие изучаемого процесса, в соответствии с указанием некоторых авторов [2, 13] следует рассматривать три основных вида просадок: 1) проявляющиеся очень быстро после дополнительного увлажнения и, несомненно, связанные с разрушением водонеустойчивых или ослаблением кристаллизационных связей, сформировавшихся в процессе литогенеза породы; 2) проявляющиеся через определенное время после замачивания и наблюдающиеся продолжительное время; вызванные разрушением связей, созданных труднорастворимыми в воде солями (карбонатов кальция и магния и др.), а также обратимо свернутыми коллоидами; 3) известные под названием «лессового карста» и проявляющиеся при проникновении в лёссовые породы воды с большим градиентом или при выщелачивании большого количества воднорастворимых солей.

Эти три группы не исчерпывают всего разнообразия просадочных явлений и, конечно, не всегда действуют в своем чистом виде. Самой главной и наиболее опасной просадкой является быстро происходящая (мгновенная) после замачивания лёссовой породы. Опасна она мгновенностью возникновения, неравномерностью и быстротой прохождения. В остальных же случаях возможны некоторые мероприятия, приостанавливающие протекающий продолжительное время процесс. Кроме того, просадки двух последних видов реже бывают неравномерными.

Таким образом, слабая изученность полного комплекса факторов, влияющих на природу просадочных явлений, пока не позволяет теоретически подойти к методике предварительной оценки и классификации лёссовых пород с точки зрения их просадочности. Такая классификация могла бы быть использована на предварительных стадиях инженерно-геологических изысканий в сравнительно слабо изученных районах распространения лёссовых пород. В связи с этим большое число исследователей пошло по пути эмпирического определения критериев просадочности. Первый шаг в этом направлении был сделан Ю. М. Абелевым [1], который предложил в результате опытных нагрузок определять показатель просадочной лёссовой породы M , как отношение осадки штампа после замачивания S_z к осадке его до замачивания S_n , т. е. $M = \frac{S_z}{S_n}$.

Этот метод, хотя и имевший место на практике, сейчас в силу громоздкости проведения полевых опытов несколько неудобен. Кроме того, он, как отмечает автор, «... может быть использован только для качественной характеристики грунта».

За последние 10 лет изучение свойств лёссовых пород, в том числе и их просадочности, ведется в основном в лабораторных условиях, поэтому дальнейшие усилия исследователей были направлены на связь просадочности с некоторыми свойствами породы, определяемыми в лабораторных условиях. В качестве величины, характеризующей просадочность данной породы, принимается предложенный Ю. М. Абелевым коэффициент макропористости E_m , составляющий разность коэффициентов пористости до и после замачивания при одной и той же внешней

нагрузке, а также коэффициент относительной просадочности i_m , являющийся разностью величин относительной осадки при тех же условиях. Коэффициент i_m может быть вычислен и по формуле через начальный коэффициент пористости E_0 и коэффициент макропористости ($i_m = \frac{E_m}{1 + E_0}$). Просадочной считается такая лёссовая порода, у которой $E_m > 0,07$ или $i_m > 0,02$, при удельной нагрузке, равной 3 кг/см^2 . Однако предложенные коэффициенты могут быть найдены для любой удельной нагрузки в зависимости от проектно-заданной. Положение о том, что при 3 кг/см^2 просадка получается максимальной [1], не всегда верно [9].

Так как макропористость не всегда является показателем просадочности и, кроме того, после просадки при больших нагрузках ($3-5 \text{ кг/см}^2$) и степени насыщения $q=1$ всегда остается какое-то количество макропор, коэффициент макропористости E_m , предложенный Ю. М. Абелевым, не может считаться величиной, отвечающей своему названию. Такое название следовало бы дать величине, указывающей на количество макропор в объеме породы. Для характеристики склонности лёссовой породы к просадке лучшим является коэффициент относительной просадочности i_m , которым и следует пользоваться.

Общие признаки внешнего облика лёссовых пород, а также их физические свойства не могут служить определителем просадочности данной породы. Указание на то, что просадочными являются те разности, у которых пористость выше 45% [14], не подтверждается нашими исследованиями. Как показано ниже, просадочными могут быть такие породы, у которых пористость составляет 38—40%, а непросадочными — с пористостью 50% и более; точно также указанный [14] предел естественной влажности 15% не может являться границей раздела между просадочными и непросадочными породами. Об этом свидетельствуют многочисленные данные по изучению лёссовых пород Средней Азии и Сибири [9]. И если, исследуя взаимосвязь влажности с просадочностью, можно наметить некоторую зависимость увеличения последней при уменьшении естественной влажности [15], то при рассмотрении пористости в связи с просадочностью подобную зависимости трудно обнаружить, хотя для лёссовых пород Средней Азии ее и находят [11].

Предложенный Н. Я. Денисовым [5] показатель макропористости K , представляющий отношение коэффициента пористости при нижнем пределе текучести E_T к коэффициенту пористости в естественных условиях E_0 , т. е. $K = \frac{E_T}{E_0}$, дает возможность разделить лёссовые породы на две группы: просадочные, если $K < 1$, и непросадочные, если $K > 1$. Подобным является и коэффициент π В. И. Батыгина [3]. Как показала проверка, эти коэффициенты могут использоваться только для пород сильнопросадочных. К такому же выводу приходят и Н. И. Кригер и Е. В. Емельянова [9], рассматривая показатель макропористости E_m . Как следует из выводов этих авторов, при применении данного метода к большинству лёссовых пород допускается ошибка в определениях, составляющая 35—40%.

Недостаточно точным оказался и метод В. А. Приклонского [14], рекомендуемый показатель уплотненности K_d в качестве критерия для разделения пород на просадочные и непросадочные. Здесь также допускается ошибка в 40% и K_d может быть применим только для разделения сильнопросадочных разностей от слабопросадочных.

Таким же недостатком страдает и метод сопоставления коэффициента относительной просадочности i_m с отношением естественной влажности к нижнему пределу пластичности $\frac{w^*}{w_p}$.

Небольшой успех имели попытки связать просадочность с некоторыми другими физическими свойствами при помощи математической статистики [10]. В этом случае делается заключение о том, что «...зависимость между коэффициентом макропористости и естественной пористостью в исследованных случаях более отчетливо наблюдается на глубинах более 10 м», т. е. там, где по сути дела лёссовые породы частично или полностью теряют свои специфические свойства.

Не будем касаться предложения Я. Л. Когана [8] об определении просадочности в зависимости от пористости породы или от объемного веса скелета. Идея этого предложения очень интересная и заслуживает внимания, но ограниченность определения просадочности только для пород с естественной влажностью до 14% свидетельствует о незавершенности метода.

Зависимость между естественной влажностью и просадочностью, выявленная В. А. Смирновым [15] для лёссовых пород одного из районов южной Украины, была подтверждена данными наших исследований для северо-восточных областей УССР. Оказалось, что эта зависимость связана с естественной пористостью пород. Между этими двумя показателями, несомненно, существует некоторый порог, который дает толчок к проявлению просадки. При этом влажность пород стоит на первом месте как первопричина просадки, а пористость и, в частности, макропористость являются дополнительным условием, усиливающим просадку и влияющим на ее величину. Подобные суждения могут иметь место только при прочих равных условиях: однородном составе лёссовой породы, одинаковом физическом состоянии, равной удельной нагрузке, при которых исследуется склонность породы к просадке.

Для выяснения зависимости между естественной влажностью и просадочностью был построен график (рис. 1). Результаты более 170 анализов изучаемых пород, которые явились опорными, заняли на графике разные положения. Просадочные породы¹ сконцентрировались в правой нижней части графика, а непросадочные — в левой верхней. На рис. 1 проведена примерная граница между просадочными и непросадочными породами, соответствующая «критическому просадочному состоянию пород», при котором незначительные изменения пористости или влажность приводят к проявлению просадки или к устойчивости при замачивании. Такую границу можно определить уравнением

$$w_0 = (n - n_0) \operatorname{tg} \alpha,$$

где w_0 — естественная объемная влажность лёссовой породы, %;

n — естественная пористость лёссовой породы, %;

n_0 — отрезок по положительному направлению оси абсцисс, составляющий 28%;

α — угол наклона прямой к оси абсцисс, равный 60°;

$$w_0 = (n - 28) 1,73.$$

* Графики, подтверждающие высказанные положения, не приводятся, так как они только подтвердили бы выводы, опубликованные уже другими исследователями [9, 12 и др].

¹ Просадочными являются такие породы, которые при удельной вертикальной нагрузке в 3 кг/см² и замачивании дают $i_m > 0,02$.

Выведенная таким образом зависимость была проверена на данных более 230 испытаний лёссовых пород южной Украины, Средней Азии и др. Как видно из приведенного графика, породы, удовлетворяющие неравенству $w_0 \leq 1,73(n - 28)$, занимают правую часть графика, и следовательно, являются просадочными. Породы же, удовлетворяющие неравенству $w > 1,73(n - 28)$, ложатся слева от граничной прямой, и их следует считать непросадочными. Следовательно, лёссовые породы склонны к просадке при некотором соотношении пористости и влаж-

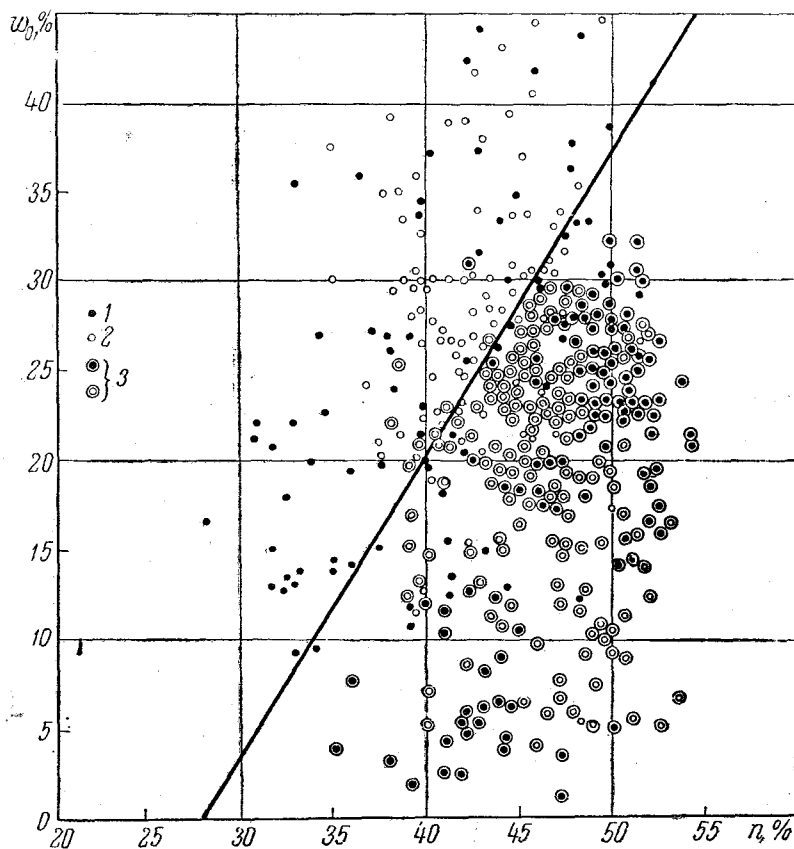


Рис. 1. Изменение склонности лёссовых пород к просадке в зависимости от естественной объемной влажности (w_0) и естественной пористости (n):

1 — опорные данные; 2 — проверочные данные; 3 — просадочные разности ($i_m > 0,02$)

ности. Только в том случае, когда определенный объем пор остается незаполненным водой, следует ожидать проявления просадки в породе. Этот определенный объем пор можно найти по приведенному уравнению. По-видимому, чем больше объем свободных от воды пор, т. е. чем выше он от предельного, тем больше должна быть при прочих равных условиях величина просадки.

На рис. 2 сделана попытка дифференциации «просадочной» части рассмотренного выше графика, чтобы показать изменение величины коэффициента относительной просадочности i_m в зависимости от объема «пустых» пор. Незначительное число данных лабораторных испытаний не дает возможности дать строгую зависимость этого изменения. Тем

не менее на рисунке видно, что увеличение объема пор, не занятых водой, вызывает увеличение просадочности пород. Так при $n - \omega_0$ до 36% i_m колеблется от 0,02 до 0,10, а при $n - \omega_0$ свыше 36% следует ожидать в большинстве случаев сильную просадку с i_m более 0,10.

Выведенной зависимостью, конечно, нельзя объяснить природу сложного процесса просадочных явлений, зависящего, несомненно, от большого количества факторов, и в первую очередь от состава изучаемых пород. Она только может помочь инженерам-геологам давать первые приближенные прогнозы просадочности неизученных лёссовых пород, не прибегая с самого начала изысканий к дорогим лабораторным и полевым опытам, которым иногда подвергаются породы заведомо непросадочные.

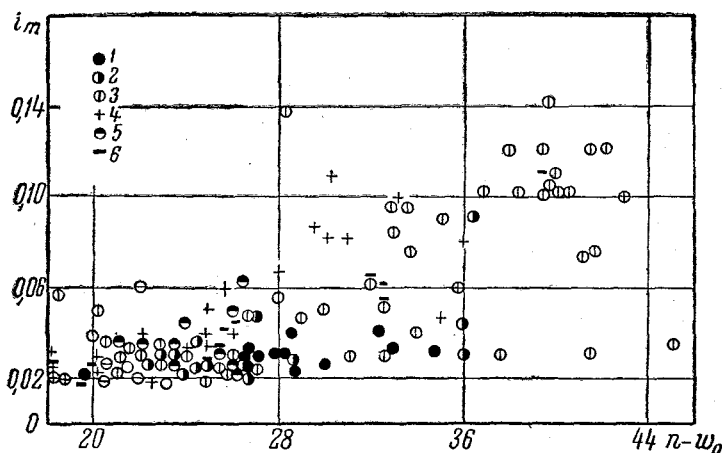


Рис. 2. Изменение коэффициента относительной просадочности i_m лёссовых пород в зависимости от разности между пористостью и влажностью ($n - \omega_0$):

1 — г. Ромны, плато; 2 — г. Сумы, IV терраса р. Псел; 3 — КремГЭС, IV терраса Днепра; 4 — г. Ингулец; 5 — Ростов-на-Дону; 6 — Ташкент

Так как на практике пользуются не объемной, а весовой влажностью, которая определяется непосредственно в инженерно-геологической лаборатории, несколько преобразуем приведенное выше уравнение. Разделим обе части уравнения на объемный вес скелета лёссовой породы δ , тогда

$$\frac{w_0}{\delta} = \frac{1,73}{\delta} (n - 28), \text{ но } \frac{w_0}{\delta} = w$$

и, следовательно,

$$w = \frac{1,73}{\delta} (n - 28)$$

или

$$w = \frac{1,73}{\Delta(1 - 0,01n)} (n - 28),$$

где Δ — удельный вес породы $\Delta = 2,68 - 2,69^3 \text{ г/см}^3$

$$w = 0,64 \frac{1 - 0,01n}{n - 28}$$

Таким образом, лёссовые породы, отвечающие неравенству

$$w \leq \frac{1,73}{\Delta(1-0,01n)}(n-28),$$

будут обладать склонностью к просадке и их следует подвергать более точному определению величины просадки. Породы же, удовлетворяющие неравенству

$$w > \frac{1,73}{\Delta(1-0,01n)}(n-28),$$

следует считать непросадочными.

Полученные результаты показывают, что просадочными могут быть породы с естественной влажностью от 2 до 22%, а также те, у которых пористость менее 45%. Непросадочными бывают породы с влажностью менее 15% и такие, у которых пористость более 45%. Это свидетельствует о недостаточности учета одного отдельно взятого из этих показателей при предварительной оценке просадочности лёссовых пород. Приведенная зависимость просадочности в связи с пористостью и влажностью наряду с характерными значениями других указанных выше показателей может дать представление о просадочности изучаемых пород и о тех дополнительных опытах и лабораторных работах, которым необходимо подвергнуть просадочные разности для детальной оценки в качестве основания проектируемых сооружений.

Говоря о точности разделения лёссовых пород на две основные группы, можно, ссылаясь на рис. 1, отметить, что из нанесенных более 400 анализов в «просадочную» часть попало 44 анализа непросадочных пород, что составляет 11% общего числа нанесенных точек. Этим создается некоторый запас, ибо просадочных анализов в «непросадочной» части графика оказалось гораздо меньше — всего 8, т. е. 2% общего числа анализов. Таким образом, общая ошибка, допускаемая при предварительной оценке склонности лёссовых пород к просадке предложенным методом, составляет менее 15%.

Для получения точной величины коэффициента относительной просадочности i_m необходимо исследовать просадочную породу в лабораторных или полевых условиях по общепринятой методике, производя замачивание при той же удельной нагрузке, при которой предполагается эксплуатация породы.

При использовании предложенного метода следует учесть, что он разрабатывался на результатах изучения лёссовых пород УССР и может дать некоторые отклонения на породах других районов, где могут быть иные условия, не имеющие места в наших исследованиях. При нанесении на последний график результатов исследований просадочности лёссовых пород Средней Азии и Сибири изменений не обнаружено, но это может быть связано с незначительным числом анализов.

Использованная литература

1. Абелев Ю. М. Основы проектирования и строительства на макропористых грунтах. Машстройиздат, 1948.
2. Андрухин Ф. Л. Свойства лёссовидных грунтов Приташкентского района и методы их изучения. Ташкент, 1937.
3. Батыгин В. И. К методике оценки просадочности грунтов. «Гидротехническое строительство», 1937, № 7.
4. Быстров С. В. Причины просадок лёссовых грунтов и освоение просадочных территорий для целей ирригации. Изв. Тадж. фил. АН СССР, 1944, № 10.
5. Денисов Н. Я. О природе просадочных явлений в лёссовидных суглинках. Изд-во «Советская наука», 1946.

6. Денисов Н. Я. Строительные свойства лёсса и лёссовидных суглинков. Стройиздат, 1953.
 7. Замарин В. И. и Решеткин М. М. Просадка и водопроницаемость лёсса. Тр. Ср.-Аз. НИИ ирригации, 1932.
 8. Коган Я. Л. Просадочные явления в лёссовидных грунтах. Вопросы геотехники, 1953, сб. 1.
 9. Кригер Н. И. и Емельянова Е. В. О приближенных методах оценки просадочных свойств макропористых грунтов. Мат. по инж. геол., 1951, вып. 1.
 10. Кригер Н. И. и Емельянова Е. В. Опыт применения методов математической статистики к изучению пористости лёссов. Мат. по инж. геол., 1953, вып. 3.
 11. Мавлянов Г. А. О влиянии пористости пород на просадки. Тр. лабор. горно-геологич. проблем, 1950, т. VI.
 12. Омета Н. О. К уточнению метода приближенной оценки просадочных свойств. Мат. по инж. геол., 1953, вып. 3.
 13. Попов И. В. Инженерная геология. Госгеолиздат, 1951.
 14. Приклонский В. А. Грунтоведение, т. I. Госгеолиздат, 1955; т. II., Госгеолиздат, 1952.
 15. Смирнов В. А. Физико-механические свойства лёссов и лёссовидных суглинков Юга Украины в связи с изменением их водного режима. Канд. диссертация. Фонды ЛГУ, 1954.
 16. Токарь Р. А. Количественная характеристика макропористых (лёссовидных) грунтов. Сб. Фундаменстроя, 1937, № 7.
-