

## РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТА С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ

А. А. Соболев

Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

*В статье рассмотрено влияние фильтрационной анизотропии лёссовидных макропористых грунтов на скорость и время консолидации (уплотнения) грунта оснований фундаментов, произведено сравнение времени осадки изотропного и анизотропного по водопроницаемости грунтов с учётом поправочного коэффициента на фильтрационную анизотропию, сделаны выводы о влиянии фильтрационной анизотропии на свойства лёссовидных грунтов, предложены практические рекомендации по учёту фильтрационной анизотропии.*

**Ключевые слова:** лёссы, лёссовидные грунты, водопроницаемость, осадка, фильтрационная анизотропия, фильтрационная консолидация.

Характерной особенностью лёссов является наличие в них крупных, видимых глазом пор, или макропор, имеющих вид ячеек и вертикальных каналцев. В строительной литературе эти грунты часто называют макропористыми. Количество макропор нередко достигает 1/3 и более от общего объема пор. По ним вода может легко проникать вглубь толщи грунта. Происхождение макропор связывают с корневой системой растений и другими факторами. В южных районах, где формируется лёсс, корни растений проникают на глубину нескольких метров в поисках воды. Отмирая и истлевая, корни оставляют после себя вертикальные каналцы. Постепенное накопление толщи лёссовых грунтов не приводит к разрушению макропор. Благодаря вертикальной пористости лёссы, несмотря на глинистый состав, обладают хорошей водопроницаемостью в вертикальном направлении, что способствует быстрому и глубокому замачиванию лёссовых оснований при различного рода утечках воды.

Лёссовидные грунты сходны по свойствам с лёссами, но в сравнении с ними они грубее на ощупь и содержат большее количество песчаных и глинистых частиц. Они менее пористы и меньше размокают. Просадочные свойства в них проявляются слабее, а в некоторых случаях вовсе отсутствуют. Известно, что процесс уплотнения грунта оснований (осадка и просадка) зависит от скорости отжатия воды из пор. Следовательно, необходимо знать фильтрационные свойства грунтов оснований. Одной из особенностей лёссовидных грунтов является ярко выраженная анизотропия фильтрационных

свойств, обусловленная природой их образования. Из-за наличия характерных макропор в виде вертикальных каналцев, водопроницаемость лёссовидных грунтов в вертикальном направлении превышает водопроницаемость в горизонтальном направлении, что оказывает существенное влияние на распространение воды в грунте и, следовательно, на величину деформации основания.

Лёссовые грунты распространены в областях засушливого, и, как правило, теплого климата. Они распространены на Украине, в Центральном черноземном районе, Северном Кавказе, в Закавказье, среднеазиатских республиках, Казахстане, Южной Сибири, а также по среднему течению р. Лены, на территории Верхнего Приобья и отчасти в Забайкалье. За пределами бывшего Союза эти породы известны в Китае, Западной Европе, в Северной и Южной Америке (США, Аргентина). Общая площадь, занимаемая на Земле лёссом и лёссовидными породами, превышает 13 млн. км<sup>2</sup> при средней мощности толщи 10 м.

В Алтайском крае распространены лёссовидные макропористые суглинки и супеси, которые нередко являются основаниями зданий и сооружений, оснований дорожного полотна. Около 30-40% зданий г. Барнаула построено на лёссовидных грунтах. Исследованию различных свойств лёссовых грунтов Алтайского края посвящены работы Г.И. Швецова, Т.А. Горбуновой, О.А. Коробовой, В.С. Осьмушкина.

Исследование коэффициента фильтрации макропористых лёссовых грунтов Запорожья и Кривого Рога, который определялся

по сходной методике, показало, что в вертикальном направлении для лёссов значение коэффициента фильтрации в 2,5-9 раз больше, чем в горизонтальном направлении. Для лёссовидных суглинков Железногорска, Грозного, Ташкента коэффициент фильтрации в вертикальном направлении превышает коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении в 5-30 раз [1]. Исследованием лёссовидных грунтов Верхнего Приобья установлено, что в 90% опытов водопроницаемость грунта в вертикальном направлении превышает водопроницаемость в горизонтальном направлении в 1,18...8,32 раз [2].

В большинстве нормативной документации фильтрационная анизотропия не учитывается, и грунт условно считается изотропным и влиянием анизотропии на процесс уплотнения грунта, как правило, пренебрегают.

Консолидация – это процесс, при котором постепенная передача нагрузки с грунтовой воды на скелет сопровождается отжатием (фильтрацией) поровой воды, в результате чего происходит уплотнение грунта. Скорость уплотнения грунта определяется в основном скоростью выжимания воды из пор грунта. При этом изменение расхода воды для грунтов с достаточной точностью определяется законом фильтрации (Дарси). Период в течении которого фильтрация подчиняется закону Дарси называется первичной консолидацией грунтов. Вторичная консолидация не подчиняется закону Дарси и учитывает, в основном, реологические свойства скелета грунта (ползучесть).

Основной задачей теории фильтрационной консолидации является определение осадки слоя грунта под действием сплошной нагрузки, а также определение времени, за которое произойдет эта осадка.

Важным показателем является также скорость протекания осадок, так как различные строительные конструкции обладают в разной степени способностью перераспределять усилия, возникающих при неравномерных осадках оснований. Скорости осадок можно определить, лишь изучив протекание их во времени. Учет природной фильтрационной анизотропии грунтов позволит более обоснованно выбирать конструкцию и размеры подошвы фундаментов.

В целях количественной оценки разницы в двух подходах произведем сравнительный вариант расчета времени консолидации грунта основания сначала как изотропного, затем с учетом фильтрационной анизотропии.

**Пример.** Определить время консолидации слоя грунта (толщиной  $h = 5$  м) соответствующие 0,5 и 0,9 полной осадки если давление на грунт  $p = 2$  кгс/см<sup>2</sup> (0,2 Мпа), толщина слоя грунта  $h = 5$  м, коэффициент относительной сжимаемости  $m_v = 0,01$  см<sup>2</sup>/кгс, коэффициенты фильтрации  $k_{ф\text{ верт}} = 1 \cdot 10^{-3}$  см/сек,  $k_{ф\text{ гор}} = 2,86 \cdot 10^{-4}$  см/сек.

*1 вариант.* Расчет без учета фильтрационной анизотропии.

Определяем полную стабилизационную осадку слоя грунта при сплошной нагрузке

$$s = hm_v p = 500 \cdot 0,01 \cdot 2,0 = 10 \text{ см.}$$

Величина коэффициента консолидации  $c_v$ , учитывая, что  $1 \text{ см/с} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ см/год}$  и  $\gamma_w = 1 \text{ гс/см}^3 = 0,001 \text{ кгс/см}^3$

$$c_v = \frac{k_{\phi}}{m_v \gamma_w} \approx \frac{1 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^7}{0,01 \cdot 0,001} = 30000 \text{ см}^2 / \text{год.}$$

Для степени консолидации  $U = st / s = 0,5$  осадка  $st = Us = 0,5 \cdot 10 = 5$  см. Согласно справочным данным в зависимости от степени консолидации постоянный множитель  $N = 0,49$ . Тогда время  $t$  соответствующее данной степени консолидации

$$t = \frac{4h^2}{\pi^2 c_v} N = \frac{4 \cdot 500^2}{9,86 \cdot 30000} 0,49 = 1,66 \text{ года.}$$

Точно так же для степени консолидации  $U = 0,9$ ;  $s_t = Us = 0,9 \cdot 10 = 9$  см и  $N = 2,09$ , чему соответствует время

$$t = \frac{4 \cdot 500^2}{9,86 \cdot 30000} 2,09 = 7,06 \text{ года.}$$

*2 вариант.* То же, с учетом фильтрационной анизотропии:

Согласно расчетам предыдущего примера для грунта со степенью фильтрационной анизотропии  $n_f = 3,5$  коэффициент консолидации равен  $c_v = 45000 \text{ см}^2/\text{год}$  (величина полной стабилизационной осадки остается неизменной  $s = 10$  см). Тогда для  $U = st / s = 0,5$  осадка  $st = Us = 0,5 \cdot 10 = 5$  см. По таблице 4.1  $N = 0,49$ , тогда

## РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТА С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ АНИЗОТРОПИИ

$$t = \frac{4h^2}{\pi^2 c_v} N = \frac{4 \cdot 500^2}{9,86 \cdot 45000} 0,49 = 1,1 \text{ года.}$$

Точно так же для степени консолидации  $U = 0,9$ ;  $st = Us = 0,9 \cdot 10 = 9$  см и  $N = 2,09$ , чему соответствует время

$$t = \frac{4 \cdot 500^2}{9,86 \cdot 45000} 2,09 = 4,71 \text{ года.}$$

В результате мы видим, что в случае учета фильтрационной анизотропии время, за которое происходит осадка, уменьшается в 1,5 раза, а значит, скорость осадки увеличивается. Из расчетов следует, что фильтрационная анизотропия существенно влияет на скорость и продолжительность процесса уплотнения. Изотропное решение дает заниженные результаты скорости протекания осадок.

При строительстве на водонасыщенных макропористых лёссовых грунтах необходимо выполнять расчет величины осадок и времени консолидации грунтов основания, после чего делать выводы о несущей способности оснований при заданной нагрузке, и, в случае необходимости, принимать меры по предотвращению возможных деформаций. Прогнозирование величины и скорости осадок во времени необходимо производить с учетом фильтрационной анизотропии.

Застроенная территория (населенный пункт или промышленное предприятие) является многокомпонентной и динамичной системой, постоянно изменяющейся как в процессе строительства и реконструкции зданий и сооружений, так и в процессе их эксплуатации. Поэтому выполнение количественных прогнозов, особенно долгосрочных (более одного года), изменение гидрогеологических условий с необходимой точностью и надежностью, с необходимым учетом трудно предсказуемых изменений (например, утечек из водопроводящих коммуникаций и вод поверхностного стока, изменения естественной дренированности территории и т.д.), в настоящее время, как правило, является проблематичным. Поэтому тема повышения точности прогноза величины и скорости осадок грунта является актуальной. Достоверность выполняемых прогнозных оценок зависит прежде всего от того, насколько близко к действительности удастся учесть реальные свойства грунтов.

В п.1.8 Пособия по проектированию оснований зданий и сооружений (к СниП 2.02.01-83) [3] перечислены все сведения о результатах инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, излагаемые в отчете об изысканиях, необходимые для проектирования. Сюда, в частности, входит коэффициент фильтрации и коэффициент консолидации. В свете вышеизложенного, становится ясно, что наряду с приведенными характеристиками, необходимо в данный список внести значения коэффициентов фильтрации в вертикальном и в горизонтальном направлении ( $K_{ф \text{ верт}}$  и  $K_{ф \text{ гор}}$ ) и степень фильтрационной анизотропии ( $n_f$ ), которые оказывают значительное влияние на поведение лёссовых грунтов. Учесть полную картину происходящего процесса предлагается введением поправки на коэффициент фильтрации в исходных формулах в виде поправочного коэффициента на анизотропию –  $\alpha$ , определенного по формуле

$$\alpha = n_f \sqrt{\frac{2}{n_f^2 + 1}}.$$

Физический смысл полученного коэффициента  $\alpha$  в том, что он показывает во сколько раз отток воды при изотропной модели (фиктивной с нашей точки зрения) в стороны больше по сравнению с анизотропной (фактической) моделью, где преобладает вертикальная водопроницаемость. Коэффициент  $\alpha$  и есть искомый поправочный (компенсирующий) коэффициент [2].

Данный коэффициент выполняет компенсирующую функцию. Коэффициент  $\alpha$  компенсирует потери воды по сторонам и «направляет» поток в глубину массива грунта путем умножения  $\alpha$  на коэффициент фильтрации  $K_{ф \text{ верт}}$  при определении коэффициента консолидации

$$c_v = \frac{\alpha \cdot k_{ф \text{ верт}}}{m_v \cdot \gamma_w}, \text{ см}^2 / \text{год},$$

где  $K_{ф \text{ верт}}$  – коэффициент фильтрации в вертикальном направлении (см/с, см/сут, см/год);  $m_v$  – коэффициент относительной сжимаемости, определяемый по результатам компрессионных испытаний (см<sup>2</sup>/кг);  $\gamma_w = 1$  г/см<sup>3</sup> – удельный вес воды.

На основании полученной зависимости построена таблица 1 для определения величины поправки  $\alpha$ .

Таблица 1 – Определение величины поправочного коэффициента  $\alpha$  в зависимости от степени фильтрационной анизотропии  $n_f$ 

$n_f$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha$	1,000	1,260	1,340	1,370	1,380	1,390	1,400	1,400	1,405
$n_f$	10	11	12	13	14	15			
$\alpha$	1,407	1,408	1,409	1,410	1,411	1,411			

Примечание: \* Промежуточные значения определяются по интерполяции.

Согласно теоретическим исследованиям при учете фактора фильтрационной анизотропии величина расчетных осадок должна увеличиться по сравнению с моделью изотропного грунта. Отсюда следует необходимость принятия определенных конструктивных решений, позволяющих уменьшить величину осадки грунта. Главной из мер по ограничению осадки (вертикальной деформации) является увеличение размеров подошвы фундаментов. Недоучет фильтрационной анизотропии приведет к неточным расчетным данным – заниженной величине осадок. Недоучет величины осадки приведет к назначению недостаточных размеров подошвы фундаментов, что, в свою очередь, может привести к развитию неравномерных деформаций основания и конструкций зданий и сооружений в целом. Безусловно, учет вышесказанного приведет к удорожанию стоимости здания, но зато снизит риск образования деформаций. Эти выводы можно использовать при строительстве особо ответственных зданий и сооружений на лёссовых грунтах. По данным Т.А. Горбуновой [4] только в 60-70-е годы около 50 зданий г. Барнаула построенных на лёссовых грунтах получили деформации. Кроме прочих факторов, не исключено, что и ошибки в расчетах проектировщиков, вызванные недоучетом специфических фильтрационных свойств лёссовых грунтов, привели к аварийным ситуациям или служили своеобразным катализатором этих ситуаций.

Актуальным является и вопрос борьбы с подтоплением застроенных территорий, проектирование защитных и предупредительных мероприятий, а именно: общее водопонижение, организация поверхностного стока, локальная защита отдельных зданий и сооружений, создание надежной системы водоотведения, методы борьбы с утечками и т.д.

На основании вышеизложенного предлагается выполнение следующих **рекомендаций**:

1) При инженерно-геологических изыскания необходимо производить определение коэффициентов фильтрации по двум взаимно перпендикулярным направлениям – вертикальном и горизонтальном (это касается как грунтов природной пористости, так и после их уплотнения).

2) Для оценки свойств грунтов наряду с другими характеристиками грунта следует определять и учитывать коэффициент фильтрационной анизотропии  $n_f$ .

3) Расчет осадок лёссовых грунтов следует производить согласно теории фильтрационной консолидации, которая наиболее полно учитывает реальные процессы, происходящие в водонасыщенных основаниях.

4) При решении задач теории фильтрационной консолидации необходимо учитывать фильтрационную анизотропию посредством введения в расчеты поправочного коэффициента на анизотропию –  $\alpha$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев, Ю. М. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах / Ю. М. Абелев, М. Ю. Абелев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 271 с.
2. Соболев, А. А. Исследование фильтрационной анизотропии лёссовидных макропористых грунтов Приобского плато / А. А. Соболев // Дис. ... канд. техн. наук. – Изд-во АлтГТУ. – Барнаул, 2010. – С. 77.
3. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Герсеванова. – М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.
4. Горбунова, Т. А. Характеристика лёссовых пород г. Барнаула, как основа инженерно-геологического районирования его территории. Автореферат дис. к.г.-м.н. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 23 с.

**Соболев А.А.** – к.т.н., доцент кафедры «Технология и механизация строительства» ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, E-mail: asoblv@mail.ru.