

## **Задание 10.12.20**

### **6.3. Методы изучения и прогнозирования процесса подтопления**

Инженерно-геологические изыскания в районах развития подтопления в дополнение к пп. 4.2 и 5.9 СП 11-105-97 (часть I) должны обеспечивать:

- изучение и оценку гидрогеологических условий территории (региона, района, площадки, участка, трассы) объектов строительства;
- выявление источников подтопления и загрязнения подземных и поверхностных вод;
- выполнение прогноза изменения гидрогеологических условий с учетом вызываемых подтоплением негативных последствий;
- оценку опасности возникновения и развития подтопления при различных видах использования территории;
- получение необходимых параметров для обоснования проектных решений по строительству (реконструкции) зданий и сооружений в условиях развития подтопления и их инженерной защите;
- разработку предложений и рекомендаций по организации и ведению гидродинамического и гидрохимического мониторинга подземных вод и развития сопутствующих процессов.

При инженерных изысканиях следует учитывать, что подтопление развивается по двум принципиальным гидрогеологическим схемам, различным по режиму, условиям формирования и характеру распространения подземных вод:

Схема 1 – подтопление развивается вследствие подъема уровня первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта, который испытывает существенные сезонные и многолетние колебания, на территориях, где глубина залегания уровня подземных вод в большинстве случаев невелика (обычно не превышает 10-15 м); при подтоплении

наблюдается преимущественно естественно-техногенный тип режима подземных вод;

Схема 2 – подтопление развивается вследствие увлажнения грунтов зоны аэрации и (или) формирования нового техногенного водоносного горизонта с подъемом его уровня на территориях, где подземные воды имеют спорадическое распространение или вообще отсутствуют до кровли подстилающего водоупора, либо уровень первого от поверхности водоносного горизонта залегает на значительной глубине (обычно более 10-15 м); при подтоплении наблюдается техногенный тип режима подземных вод.

Принципиальные различия в развитии подтопления определяют специфику и методическую направленность изысканий, а также методику прогноза изменения гидрогеологических условий и особенности инженерно-гидрогеологического обоснования инженерной защиты.

Прогноз изменения гидрогеологических условий в районах развития или возможного возникновения подтопления должен составляться с учетом схем развития процесса.

При развитии процесса по схеме 1 выполняется прогноз подъема уровня и изменения химического состава грунтовых вод с учетом естественных (сезонных и многолетних) колебаний.

При развитии процесса по схеме 2 выполняется прогноз формирования техногенных подземных вод и изменения свойств грунтов зоны аэрации (особенно, если эти грунты просадочные или набухающие).

Все инженерно-геологические и гидрогеологические прогнозы должны выполняться с учетом влияния техногенных нагрузок и внешних гидродинамических границ исследуемой территории. При этом, исследуемая площадь может значительно превосходить площадь проектируемого объекта.

При выполнении прогнозов изменения гидрогеологических условий (режима подземных вод, динамики ареалов загрязнения подземных вод и др.)

рекомендуется составлять гидрогеологическую модель территории, регулярно пополняемую новой информацией при последующих изысканиях.

Гидрогеологические прогнозы должны учитывать долготлетние перспективы экономического и социального развития региона, города, поселения. Продолжительность периода, на который составляется прогноз изменения гидрогеологических условий на застроенных территориях, должна составлять 5-15 лет. Каждые 5 лет прогноз должен корректироваться в соответствии с изменением техногенной нагрузки (новое строительство, реконструкция, расширение или ликвидация объектов).

В случае, если оценка ситуации и прогноз изменения гидрогеологических условий свидетельствуют о необходимости инженерной защиты от подтопления, должно быть предусмотрено получение исходных данных, необходимых для выбора видов инженерной защиты, типа, конструкции и режима работы водопонизительных устройств и решения других задач.

К оценке опасности подтопления следует подходить дифференцированно в зависимости от степени освоенности территории: на застраиваемой (или планируемой к застройке) территории – это возможность возникновения и развития процесса подтопления в определенной природно-техногенной обстановке (характеризуется площадью и скоростью развития процесса); на уже застроенной территории – это способность процесса подтопления вызывать негативные последствия и наносить ущерб, размеры которого в определенных природных условиях дифференцированы по площади и во времени в зависимости от типов и интенсивности техногенной нагрузки (характеризуется коэффициентом пораженности территории подтоплением и наносимым ущербом).

В процессе гидрогеологических исследований необходимо устанавливать:

– фильтрационные свойства грунтов в границах района (площадки) изысканий, а также в пределах ее внешних гидродинамических границ;

- закономерности формирования режима (уровенного, химического, температурного) подземных вод;
- типы водообмена (фильтрация в водонасыщенной зоне; влагоперенос, происходящий в ненасыщенной зоне путем инфильтрации и испарения; передача гидростатического давления; диффузионный перенос вещества и др.);
- особенности взаимосвязи подземных и поверхностных вод;
- характеристику областей разгрузки потока подземных вод и удаленности их от изучаемой площадки;
- агрессивность и коррозионную активность подземных вод с учетом возможного загрязнения.

Исследование и оценка влияния подтопления на экологическую обстановку (изменение природных и техногенных ландшафтов, заболачивание, снижение агротехнических свойств почв, гибель и изменение состава растительных сообществ, ухудшение условий жизни населения, в том числе санитарно-эпидемиологической обстановки) должны осуществляться в комплексе с инженерно-экологическими изысканиями согласно СП 11-102-97.

## **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные факторы формирования болот и заболоченных земель.
2. Какие типы болот развиты на водоразделах?
3. Какие типы болот развиты на склонах и их характеристика?
4. Какие типы болот развиты в долинах и их характеристика?
5. Как прогнозируют подтопление территории?
6. Назовите мероприятия по борьбе с заболачиванием и подтоплением территории.

## Рекомендуемая литература

1. Бондарик Г.К. Инженерная геодинамика / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг. – Москва: КДУ, 2007. – 440 с.
2. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии / Г.К. Бондарик. – Москва: Недра, 1981. – 256 с.
3. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика / Г.С. Золотарев. - Москва: МГУ, 1983. – 328 с.
4. Иванов И.П. Инженерная геодинамика / И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский. – Санкт-Петербург: Наука, 2001. – 416 с.
5. Королев В.А. Инженерная и экологическая геодинамика: [Электронный учебник на СД ] / В.А. Королев. – Москва: МГУ, 1995.
6. Королев В.А. Мониторинг геологической среды / В.А. Королев; под ред. В.Т. Трофимова. – Москва: МГУ, 1995. – 272 с.
7. Лапердин В.К. Опасные геологические процессы на юге Якутии и сопредельных территориях / В.К. Лапердин, В.С. Имаев, И.И. Верховин [и др.]. – Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 2011. – 240 с.

## Глава 7. Просадочность лессовых пород

### 7.1. Определение и общая характеристика лессовых пород

Лёссы – это светлая, палево-желтая или серовато-желтая неслоистая горная порода, сложенная частицами размером 0,05-0,01 мм, содержание которых превышает 50 %. Пористость достигает 42-50 %, причем характерно наличие вертикальной макропористости, карбонатности [11]. Особое свойство лёссов – просадочность. Они приурочены, в основном, к перигляциальным областям. На Русской равнине лёссовые породы распространены от Польши до Урала, их можно встретить также на равнинах Южной Сибири, в Средней Азии

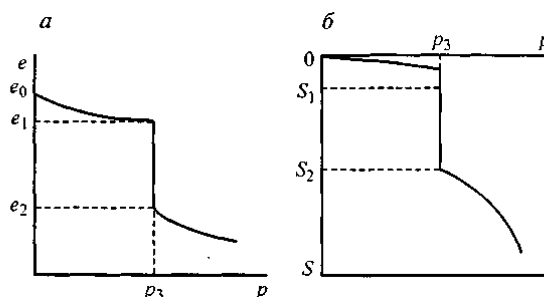
и Закавказье, Бурятии, Иркутске и в Северном Китае. Детально распространение лёссов рассмотрено в работе Н.И. Кригера (1965). В Европе лёссовые породы протягиваются от Англии с запада на восток, при этом одна их полоса прослеживается в Северной Франции, Бельгии и средней части Центральной Европы, а вторая расположена южнее, у подножия Альп, и тянется вдоль всей долины Дуная до Черного моря через Баварию, Австрию, Чехию, Словакию, Венгрию, Югославию, Румынию и Болгарию. В Северной Америке лёссы залегают в бассейнах рек Миссисипи и Миссури. На всех территориях, где залегают лёссы, существует явление их просадочности при их замачивании.

К *лёссовым породам* относят континентальные глинистые отложения четвертичного возраста (супеси, суглинки, глины) различного генезиса, обладающие комплексом специфических свойств. Условия формирования лёссовых пород и их физико-механические свойства детально изучались Г.К. Бондариком, И.В. Поповым, Е.М. Сергеевым, В.Т. Трофимовым и др. [2, 23, 26, 29] Согласно ГОСТ («Грунты», 1996) просадочным является грунт, который под действием внешней нагрузки и собственного веса или только от собственного веса при замачивании водой или другой жидкостью претерпевает вертикальную деформацию (просадку) и имеет относительную деформацию просадки  $\varepsilon_{sl} \geq 0,01$ . Другими свойствами являются: преобладание *пылевой фракции* (0,05—0,002 мм) в их составе (50—80 вес. %), высокая *пористость*, в том числе макропористость (>50 %).

При типизации лёссовых пород выделяют типичные лёссы и лёссовидные породы (лёссовидные суглинки).

Лёссовые породы при наличии источников естественного и искусственного увлажнения создают благоприятные условия для неравномерных проявлений просадок в пространстве, во времени. Неравномерность и большая скорость протекания процесса в большинстве случаев приводят к аварийным ситуациям и значительной сложности прогнозирования и предупреждения просадочных явлений, а также своевременного принятия противопросадочных мер.

Просадки начинается с разрушения структурных связей, неустойчивых к данному виду воздействия (водонеустойчивых в лёссах, теплонеустойчивых в ММП и т. д.). Просадочность лёссовых пород можно показать на примере анализа деформационных кривых (рис. 27), построенных по результатам лабораторных и полевых экспериментов.



**Рис. 27. Деформационные кривые просадочных лёссовых пород.**

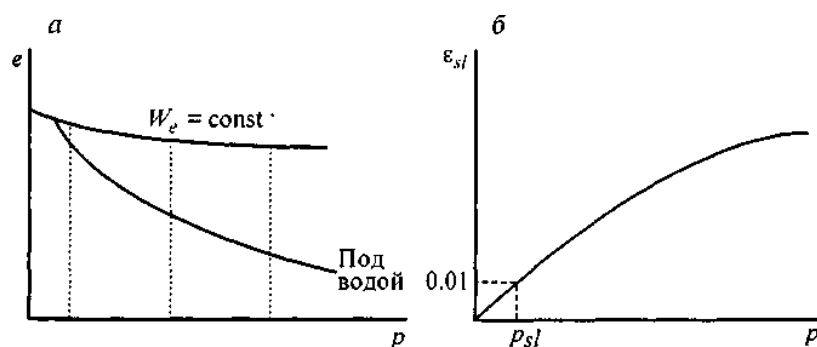
*a* — по лабораторным испытаниям  $e = f(p)$ ; *б* — по полевым опытам штампом  $s = f(p)$ ;  $p_3$  - нагрузка, при которой произошло замачивание лёсса.

Просадочность выражена резким возрастанием деформаций уплотнения при замачивании опытного образца, находящегося под постоянной нагрузкой. Показателем просадочности является величина относительной просадочности  $\varepsilon_{sl}$ , которая, согласно ГОСТ 25100-95, определяется как отношение разности высот образцов грунта природной влажности и после его полного водонасыщения при определенном давлении к высоте образца природной влажности или по формуле

$$\varepsilon_{sl} = (e_1 - e_2) / (1 + e_1), \quad (43)$$

где коэффициент пористости  $e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$ ,  $e = \frac{\gamma_{уд} - \gamma_{ск}}{\gamma_{ск}}$ .

Индекс *sl* происходит от слова *slum* — просадочность. Для количественных оценок и прогнозов необходим еще один показатель — начальное просадочное давление  $P_{sb}$ , определяемое при относительной просадочности, равной 0,01 (рис. 28).



**Рис. 28. Определение величины относительной просадочности  $\varepsilon_{sl}$  при разных давлениях методом двух кривых (а) и начального давления просадочности  $p_{sl}$  по графику  $\varepsilon_{sl} = f(p)$  (б).**

Просадочные явления в лёссовых породах могут происходить в природных условиях под влиянием их собственного веса и увлажнения водами разного происхождения, образуя понижения в рельефе, которые называются по-разному в зависимости от региона распространения: *степные блюдца, падины, западины, поды, колки* и т. п. (Молодых, 1982). Первые формы могут быть диаметром от 200–400 м до 2–4 км, вторые – от нескольких десятков до нескольких сотен метров, распределенных с плотностью от 30 до 300 блюдец на 1 км<sup>2</sup>. Воронки характеризуются незначительными размерами — от 3 до 30 м в диаметре и от 5 до 10 м по глубине. Гетерогенные формы могут иногда иметь в диаметре до 15 км.

Глубина просадочных форм незначительная и зависит от мощности лёссового покрова, его просадочности и возраста. В разных природных условиях понижения в рельефе составляют в среднем от 0,5 до 3 м (редко 5–6 м), а мощность измененных (уплотненных, увлажненных, оглеенных) лёссовых отложений достигает 10 и более метров, при этом их свойства покровных отложений существенно изменились и, как правило, потеряли свой лёссовый облик.

Расчеты величины суммарной просадки показывают, что во многих случаях она меньше глубины подов и блюдец. Следовательно, просадка, несомненно, играющая важную роль в образовании этих форм, не является их единственной генетической причиной. Второй причиной, по мнению других исследователей, является действие температурного фактора в периоды оледенений, т.е.

*термокарст*. Рассматривая эти два главных фактора в комплексе с другими факторами и условиями, И.И. Молодых (1982) пришел к выводу, что поды и степные блюдца имеют разную природу. Так, например, в Сибири и Якутии наблюдаются понижения в рельефе, которые точно соответствуют объему растаявшего льда, а условия этих регионов можно считать аналогами древних условий лёссово-перегляциальных областей Украины, где распространены поды.

Главным фактором образования степных блюдец по многим признакам является просадочность, т. е. деградация лёссовых пород в условиях переувлажнения, которое могло произойти повторно-жильными льдами, образовавшимися в ледниковые периоды в полигональных трещинах лёссового покрова. В современных условиях при строительстве гидротехнических сооружений (особенно ирригационных) на лёссовых породах аналогичные понижения в рельефе формируются за счет избыточного увлажнения лёссовой толщи.

Многие отмечают, что за последние 20–30 лет к проблеме просадочности присоединилась новая проблема техногенного характера — подтопление (обводнение) лёссовых пород на освоенных территориях. В связи с этим возросло число аварийных ситуаций, в результате которых нарушается нормальная эксплуатация зданий (в том числе жилых домов) и сооружений (особенно гидротехнических).

Более подробно просадочные явления были описаны Ф.Л. Андрюхиным (1937), который выделил *четыре типа* просадок: а) просадки, появляющиеся немедленно после замачивания; б) просадки, происходящие длительное время, медленно возрастая; в) просадки, появляющиеся через большой промежуток времени после замачивания; г) просадки, проявляющиеся в виде карстового процесса в лёссах и глинах (Попов, 1959).

Главной причиной просадочности Н.Я. Денисов считает более высокую пористость лёссовых пород по сравнению с нормальной при данном напряженном состоянии. Породы с нормальной пористостью в природных

условиях находятся в равновесии и называются *нормально уплотненными породами*. Просадочные лёссы являются недоуплотненными и характеризуются показателем макропористости

$$K = \frac{e_L}{e_e}, \quad (44)$$

где  $e_L$  — коэффициент пористости при влажности на пределе текучести;

$e_e$  — естественная пористость лёссовой породы.

Разницу  $e_L - e_e$  Н.Я. Денисов считал макропористостью, при наличии которой лёсс склонен к просадке (при  $K < 1$ ). Недоуплотненное состояние лёссовых пород, по мнению Н.Я. Денисова, закрепляется сцеплением упрочнения, формирующимся в сухом теплом климате. Но, исходя из наблюдений за просадкой, сцепление упрочнения осуществляется водонеустойчивыми связями, которые при замачивании быстро разрушаются. По результатам исследований Н.Я. Денисова и Ю.М. Абелева основная часть просадки (до 80 % от общей) происходит в течение 30 мин с момента замачивания. Механизм разрушения структурных связей Н.Я. Денисов связывает с расклинивающим давлением тонкого слоя смачивающей воды, возникающим на контактах между частицами. К. Терцаги объяснил быструю просадку разрушением капиллярных связей в лёссовых породах.

Многие исследователи придерживаются генетической природы просадочности. Так, например, Г.А. Мавлянов и его последователи, изучив лёссовые породы Средней Азии, считают, что разделение лёссовых пород на генетические типы позволит прогнозировать их просадочность. В частности, лёссы эолового и пролювиального происхождения наиболее просадочны, а аллювиальные лёссовидные отложения непросадочны.

Таким образом:

1. Начиная с первых целенаправленных исследований просадочных явлений просадочность определялась как свойство лёссовых макропористых пород особого, недоуплотненного, состояния, проявляющееся при замачивании под давлением в форме быстрого неравномерного уплотнения.

2. Просадочность характерна для лёссовых пород разного генезиса и контролируется их физическим и напряженным состоянием.

3. Процесс просадки осуществляется поэтапно: замачивание, разрушение водонеустойчивых структурных связей (разупрочнение системы), переход в движение легкоподвижных пылеватых частиц, уплотнение всей системы, наступление равновесия, соответствующего степени воздействия по увлажнению и давлению.

4. Формирование физического состояния лёссовых пород (плотность, влажность, связность), обуславливающего их просадочность, является геологическим процессом, происходящим в определенной географической (главным образом климатической) обстановке, начиная с момента осадения и проходя через все стадии изменения осадка и превращения в породу.

5. Структурные связи в лёссовых породах характеризуются водонеустойчивостью с преобладанием коагуляционных и капиллярных, реже цементационных воднорастворимыми соединениями.

6. Многофакторность процесса формирования просадочности лёссовых пород отражается на ее величине и изменчивости в пространстве и во времени. В условиях интенсивного техногенеза большую роль в этом следует отводить деятельности человека, которая направлена на деградацию просадочности.

7. При освоении территорий, сложенных лёссовыми породами, инженерно-геологические изыскания должны заканчиваться оценкой их физического состояния и прогнозом просадочности по всем прямым и косвенным признакам.

## **7.2. Прогнозирование просадочности в лессах**

Строительство зданий и сооружений различного назначения (от жилых домов до ирригационных каналов) на лёссовых породах сопряжено с риском для их устойчивости и нормальной эксплуатации, что связано с возможностью реализации просадочности, сформировавшейся в природных условиях. Надежность прогнозов может быть обеспечена за счет

использования широкого набора критериев формирования лёссовой толщи и ее просадочности. Конечным результатом инженерно-геологических прогнозов является расчет величины просадки лёссовой толщи при замачивании и давлении от собственного веса толщи (для определения типа ее просадочности) и от суммарного давления веса толщи и нагрузки сооружения. В соответствии со СНиП-2.02.01-83 расчет величины просадки при замачивании сверху больших площадей или при подъеме уровня грунтовых вод ведется по формуле

$$S_{sl} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl} h_i k_{sl_i} \quad (45)$$

где  $\varepsilon_{sl}$  — относительная просадочность  $i$ -го слоя при соответствующих значениях давления в  $i$ -м слое;

$h_i$  — мощность  $i$ -го слоя;

$k_{sl_i}$  — нормативный коэффициент;

$n$  — число слоев в просадочной толще.

Таким образом, для проведения окончательных прогнозных расчетов необходима следующая количественная информация: 1) мощность и строение толщи лёссовых пород на изучаемом объекте; 2) плотность и влажность отдельных разновидностей лёссовой толщи, характеризующие ее естественное состояние; 3) относительная просадочность лёссовых пород в зависимости от прогнозируемого давления до и после строительства, т.е.  $\varepsilon_{sl}=f(p)$  по типу кривой рис. 27 б; 4) величины начального просадочного давления для разных горизонтов лёссовой толщи. Для выполнения условий 3 и 4 необходимо иметь данные о просадочности, полученные методом двух кривых (рис. 27, а).

Приступая к расчету дополнительной осадки, необходимо подготовить следующую информацию: а) геологический разрез лёссовой толщи и подстилающих ее пород; б) положение уровня грунтовых вод и амплитуду его колебаний; в) показатели свойств лёссовых пород (относительную просадочность, начальное просадочное давление, плотность); г) данные о

проектируемом сооружении, его фундаменте, глубине заложения, нагрузках на основание и др. Сам расчет проводится по той же формуле, по которой определяли просадку от собственного веса пород.

Изучая просадочность лёссовых пород, нельзя ограничиваться ее оценкой только с целью определения величины дополнительной осадки под фундаментами зданий и сооружений. Просадочность имеет большое значение при прогнозе устойчивости гидромелиоративных сооружений (оросительных систем), построенных на лёссовых массивах. Аварийные ситуации на этих объектах связаны с размывом и просадкой лёссов, в результате которых деформировались каналы, опрокидывались насосные станции, затоплялись и подтоплялись поля и т. д. Стоимость гидротехнических сооружений на просадочных грунтах оказывается в 2-5 раз дороже, а их срок эксплуатации в 4-9 раз меньше, чем на других песчано-глинистых породах.

Обобщение и анализ опыта строительства на лёссовых породах позволяют использовать следующие способы обеспечения безаварийной эксплуатации зданий и сооружений:

1. Лёссовые породы, относящиеся по своей просадочности к первому типу (просадка от собственного веса не более 5 см), используются в качестве естественного основания с давлением от сооружения, не превышающем начальное просадочное давление, т. е.  $\sum S_n \geq S_{sl}$ .

2. Лёссовые породы второго типа с просадкой от собственного веса более 5 см используются в качестве естественного основания под защитой от замачивания. Отметим, что этот способ строительства имеет большое распространение, но защита от дополнительного увлажнения не всегда дает желаемую эффективность. Так, по обследованиям 177 домов, построенных на лёссах в Ростове-на-Дону, Краснодаре, Таганроге, Грозном и Новочеркасске, 94 из них (55 %) получили значительные деформации за счет увлажнения водами от полива полосы зеленых насаждений или плохой отмостки.

Ю.М. Абелев, отмечая невозможность защиты лёссовых просадочных оснований, а следовательно, неизбежность нарушения устойчивости строящихся

и эксплуатируемых зданий, предложил ряд мероприятий по ликвидации последствий замачивания лёссовых пород. Это применение конструкций, малочувствительных к неравномерным осадкам; устройство железобетонных поясов в стенах, воспринимающих растягивающие усилия; уширение площадей фундаментных плит под отдельными элементами зданий; уплотнение лёссовых пород в пределах деформируемой зоны основания или замена наиболее просадочного слоя; полное устранение просадочности лессового основания или всей просадочной толщи уплотнением после замачивания, термической обработкой, силикаттизацией и другими способами технической мелиорации; прорезка просадочной толщи фундаментами разных конструкций (сваями, опорами и др.).

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое лёссы и закономерности их распространения?
2. Чем обусловлена просадочность лёссовых пород?
3. Какие показатели характеризуют просадочность лёссов?
4. Какие конструктивные и мелиоративные мероприятия применяют для борьбы с просадочностью?

### **Рекомендуемая литература**

1. Бондарик Г.К. Инженерная геодинамика / Г.К. Бондарик, В.В. Пендин, Л.А. Ярг. – Москва: КДУ, 2007. – 440 с.
2. Золотарев Г. С. Инженерная геодинамика / Г.С. Золотарев. - Москва: МГУ, 1983. – 328 с.
3. Иванов И.П. Инженерная геодинамика / И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский. – Санкт-Петербург: Наука, 2001. – 416 с.
4. Ипатов П.П. Инженерная геология городов: учебное пособие / П.П. Ипатов. – Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2009. – 252 с.

5. Коломенский Н.В. Специальная инженерная геология / Н.В. Коломенский. – Москва: Недра, 1969. – 336 с.