Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1984, т. 100

УДК 624.131

# ПРИРОДА ДЕФОРМАЦИЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД В ОСНОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ

Р.Э.ДАНЬКО

Количественный прогноз развития деформаций в основании сооружений должен базироваться на глубоком и всестороннем анализе процессов, которые протекают в породах основания при их взаимодействии с сооружением.

Хотя построенное сооружение разнообразно воздействует на горные породы основания, чаще всего ограничиваются исследованием только силового действия: веса сооружения, динамических нагрузок от работающего оборудования и т.п. Вместе с тем, многие промышленные сооружения коренным образом меняют гидрогеологическую и гидрохимическую обстановку в основании сооружений, что выражается в существенном преобразовании физико-механических свойств пород основания при их взаимодействии с различными типами промышленных стоков.

Застройка территории и эксплуатации сооружений приводят также к заметному изменению температурного режима глинистых пород в основании за счет нарушения природного теплообмена. Нарушение температурного режима выражается в варьировании влажности глинистых пород в основании сооружения, которая является одним из ведущих факторов оценки состояния, прочности и деформируемости глинистых пород.

В статье дан анализ возможного направления деформационного поведения глинистых пород различной степени литификации под действием трех основных групп факторов:

1) изменения напряженного состояния пород под влиянием веса сооружения;

2) преобразования свойств глинистых пород при их взаимодействии с промстоками;

3) влияния теплового воздействия сооружения.

Абсолютная величина деформации пород в основании определяется суммарным эффектом перечисленных выше факторов, т.е.

$$S = S(p) \pm S(\phi x) \pm S(t),$$

где $S(p)$ – деформация, вызванная давлением от веса сооружения; $S(\phi x)$ – деформация, обусловленная изменением состава, состояния и свойств пород основания в процессе проникновения промстоков; $S(t)$ – деформация, определяемая изменением температурного режима в ходе эксплуатации сооружения.

Знак деформации зависит от характера процесса, протекающего в основании (приток или отток влаги), увеличения степени жесткости или пластич-

ности породы в связи с изменением типа структурных связей и ее текстуры, степени дисперсности породы, ее плотности. Следует иметь в виду, что интенсивность деформации, а также и ее знак обуславливаются величиной внешнего давления, которое либо препятствует отрицательной деформации (подъему) сооружения в случае увеличения объема глинистых пород при набухании или химическом преобразовании минеральной компоненты глинистых отложений, либо способствует дополнительной осадке при разупрочнении породы.

Характер развития деформаций и ее величина при изменении напряженного состояния пород в основании сооружения зависит от типа глинистых отложений по степени их литификации и величины действующего давления.

Каждый тип глинистой породы характеризует определенная плотность, влажность, физическое состояние, а также прочность структурных связей [8]. При оценке деформационного поведения глинистой породы ведущим фактором является прочность структурных связей. Комбинация связей различной природы предопределяет величину структурной прочности, значение которой увеличивается при переходе от глинистых пород малой степени литификации к более высокой. Изучение и анализ поведения глинистых пород различной степени природной уплотненности под действием давления от веса сооружения показывает, что следует ввести и использовать в практике инженерно-геологических исследований два параметра структурной прочности глинистых пород. Первый из них характеризует структурную прочность породы, когда разрушение связей в ней только начинается. Эта величина определит наименьшую прочность структурных связей $\sigma_{стр1}$. При нагрузках от веса сооружения, меньших по величине $\sigma_{стр1}$, все внешнее давление воспринимается только скелетом породы и поровое давление равно нулю. Теоретически при действии давления, меньшего по значению, чем $\sigma_{стр1}$, величина деформации пород должна быть равна нулю.

Увеличение давления выше наименьшего значения структурной прочности пород приводит к его перераспределению между поровой водой и скелетом породы, сопровождающемуся непрерывным разрушением более прочных контактов. Чем более разнородны по своей физической природе и, следовательно, по прочности структурные связи, тем более длительным будет процесс их разрушения, тем больше промежуток времени, в течение которого будет протекать деформация. Определенная величина давления, фиксирующая разрушение самых прочных структурных связей, характеризует наибольшую прочность структурных связей $\sigma_{стр2}$. При нагрузках, больших $\sigma_{стр2}$, породы деформируются с постоянной, либо нарастающей скоростью до полного разрушения, причем характер деформирования также зависит от степени литификации глинистых пород.

В интервале давлений, отвечающих величинам $\sigma_{стр1}$ и $\sigma_{стр2}$, все деформации глинистых пород носят затухающий характер, отражающий динамику последовательного разрушения структурных связей и тормозящего процесса перестройки сложения породы и тиксотропного восстановления нарушенных контактов. Именно в этом диапазоне давлений формируется новая микротекстура, изменяется влажность и плотность породы.

Если значение $\sigma_{стр1}$ для рассматриваемой разности в основном является величиной постоянной для заданного напряженного состояния, то значение $\sigma_{стр2}$ во многом определяется временным фактором.

На основе рассмотренных выше закономерностей необходимо вести анализ возможного развития деформаций в ходе строительства и эксплуатации конкретного сооружения. При этом возможны два случая: нагрузка от веса сооружения равна или меньше $\sigma_{стр1}$ и больше $\sigma_{стр1}$, но меньше $\sigma_{стр2}$. Первый случай реален для глинистых пород средней и высокой степени литификации. Для пород малой и частично средней степени литификации практическое значение имеет лишь второй случай.

Деформирование пород в основании сооружений в первом случае зависит от наличия и характера трещиноватости, а также других дефектов в толще пород зоны основания сооружения.

При анализе деформируемости глинистых пород во втором случае необходимо основное внимание уделить возможности фильтрации воды из породы, поскольку именно этот процесс определит интенсивность уплотнения и упрочнения глинистых пород в основании сооружения. Экспериментальные исследования показали, что фильтрационная консолидация в глинистых породах может иметь место при градиентах напора больших, чем

$$J_{нфк} = A\sqrt{M_c},$$

где $J_{нфк}$ - градиент напора, отвечающий началу фильтрационной консолидации породы; $A$ - эмпирический коэффициент, значение которого зависит от содержания пылеватой и песчаной фракций и степени литификации породы (см. таблицу); $M_c$ - содержание глинистой фракции в относительных единицах.

Величина эмпирического коэффициента $A$

| Степень литификации породы | Разности | |
|---|---|---|
| | пылеватые | непылеватые |
| Малая | 100 | 60 |
| Средняя | 160 | 120 |

Данное эмпирическое уравнение имеет определенный физический смысл: подвижность воды в глинистой породе обуславливается содержанием тонкодисперсной фракции и степенью ее уплотненности. При $M_c = 0$ фильтрационная консолидация протекает при сколь угодно малых градиентах напора.

Следовательно, возможность уплотнения глинистой породы за счет оттока воды из нее по мере увеличения содержания тонкодисперсной фракции и степени уплотненности существенно уменьшается. Основную роль при оценке деформирования пород в основании сооружений играют процессы ползучести при действии нормальных и касательных напряжений, протекающие при сохранении постоянства влажности и плотности исследуемых отложений.

Как уже указывалось ранее, влажностной и физико-химический режимы глинистых пород в основании сооружений определяются также изменением гидрогеологических и гидрохимических условий. Этот вопрос является одним из узловых моментов изучения проблемы подтопления застроенных городских и промышленных территорий. Причинами подтопления являются инфильтрация промстоков, систематическая конденсация и концентрация влаги под зданиями и покрытиями.

Величина инфильтрации и степень конденсации влаги под сооружениями зависит от типа глинистой породы, слагающей основание сооружения. Глинистые отложения, в основном высокой и средней степени литификации в верхних зонах, имеют повышенную степень трещиноватости. Следовательно, в этих породах просачивание различного типа вод с застроенной территории наиболее интенсивно. Необходимо отметить, что такой тип пород обладает двойной пористостью, поэтому обводнение пород по трещинам сопровождается также дополнительным увлажнением отдельных блоков глинистых пород, обладающих пористостью. Характер дополнительного увлажнения отдельных блоков породы будет определяться гранулометрическим и минеральным составом породы, степенью ее уплотненности и сцементированности, составом обменных катионов. Поскольку проникновение воды и растворов в поровое пространство блоков может идти только сорбционным и диффузионным путем, скорость этого процесса и интенсивность его воздействия на породы уменьшается при переходе от глинистых пород средней степени литификации к отложениям высокой степени уплотнения.

В глинистых малолитифицированных породах формирования трещин обычно не наблюдается. Следовательно, инфильтрация в таких условиях происходит достаточно медленно, учитывая низкие коэффициенты фильтрации этих пород, часто менее $10^{-3}$ м в сутки. Высокая влажность глинистых пород малой степени литификации свидетельствует о том, что их сорбционная способность является „погашенной", в силу чего их дополнительного увлажнения обычно не наблюдается. Однако не исключается физико-химическое взаимодействие между инфильтрующимся раствором и глинистой породой, в процессе которого возможен ионный обмен, физическое и химическое поглощение в зависимости от конкретных условий. Проникновение различных компонентов в глинистые породы может идти также диффузионным путем. При этом скорость процессов, определяющих изменение свойств пород, резко снижается.

Очевидно, что преобладание конвективного либо диффузионного способа переноса компонентов зависит от степени глинистости породы.

Следует отметить, что на характер изменения свойств глинистых пород влияет направление движения влаги: сверху вниз при инфильтрации или снизу вверх при подъеме уровня грунтовых вод. В первом из упомянутых случаев интенсивность воздействия влаги будет больше, чем во втором, согласно исследованиям Н.Я.Денисова [2].

В общем случае интенсивность влияния промстоков на глинистую породу часто определяется не общим их расходом, а химическим составом и длительностью воздействия, которые, в свою очередь, зависят от срока эксплуатации сооружения и профиля промышленного предприятия. Возможность дополни-

тельной отрицательной (набухание) либо положительной (осадка) деформаци пород основания обусловлено соотношением давлений, развивающихся при сорбционном, диффузионном либо осмотическом воздействии промстоков на глинистую породу и действующей нагрузкой от веса сооружения.

Действие щелочей низкой концентрации на глинистую породу имеет ее физико-химическую природу за счет обменных реакций. При этом дисперсность породы различного минерального состава повышается, что приводит к некоторому увеличению свободного набухания породы. Однако, учитывая небольшие значения давления набухания глинистых пород в слабощелочных растворах, вряд ли следует ожидать существенных дополнительных деформаций пород основания.

Воздействие щелочей высоких концентраций на глинистые породы зависит от их минерального состава. Гидрослюдистые глинистые породы наиболее устойчивы по отношению к щелочам различных концентраций. Глинистые породы каолинитового и монтмориллонитового составов под действием высококонцентрированных щелочей претерпевают химические преобразования, в ходе которых образуются малорастворимые соединения, выпадающие в осадок в виде кристаллогидратов и вызывающие увеличение объема пород (химическое „набухание"), а также их дополнительное упрочнение. Перечисленные выше закономерности характерны для глинистых пород, в которых отсутствуют цементационные связи. Изменение свойств пород при наличии в них карбонатного либо кремнеземистого цемента зависит от характера и степени его растворения в щелочи.

Характер влияния кислоты определяется ее концентрацией и вещественным составом породы. При воздействии кислоты на глинистые породы сначала разрушаются карбонаты и лишь после полного их растворения кислота начинает реагировать с глинистыми минералами. Исследования В.М.Кнатько показали, что наиболее активное взаимодействие происходит между кислотой и гидрослюдистыми, либо хлоритовыми глинами, значительно менее активны монтмориллонитовые и каолинитовые глины. Реакция между кислотой и глинистой составляющей имеет химический характер и сопровождается разрушением алюмосиликатов с образованием цементирующего геля кремневой кислоты, существенно повышающего прочность структурных связей глинистой породы.

Особенно заметны изменения в глинистых породах малой степени литификации при действии концентрированных кислот: наблюдается переход породы из текучего состояния в пластичное, соответственно снижается величина влажности породы. Эти явления связаны не только с изменением химического состава породы, но и с существенной агрегацией пылеватой и глинистой составляющей в ходе ее цементирования гелем кремневой кислоты. Таким образом, проникновение кислот в толщу глинистых пород основания может вызвать дополнительную осадку положительного знака.

При оценке воздействия кислоты в процессе исследования устойчивости сооружения необходимо отдельно анализировать возможные реакции с породами основания и бетоном фундаментов, причем разрушение конструкции может быть вызвано изменениями, которые будут иметь место в цементе бетона.

Наиболее противоречивыми являются данные исследований по взаимодействию растворов различных солей с глинистыми породами. Лучше всего изучено действие хлоридов. Растворы электролитов способствуют процессам диспергации, либо агрегированию тонкодисперсных частиц в глинистых породах. Направленность этих процессов определяет интенсивность набухания или усадки глинистых пород. Изменение степени дисперсности глинистых пород зависит от степени литификации породы и прочности ее структурных связей, от катиона электролитов и концентрации солей в растворе, а также от минерального и гранулометрического состава глинистых пород.

В глинистых породах высокой степени литификации наблюдаются несущественные изменения их свойств при взаимодействии с растворами электролитов. При этом интенсивность взаимодействия растет с уменьшением концентрации электролитов, когда в более полной мере проявляется набухание таких пород.

В глинистых породах малой степени литификации наибольшие преобразования наблюдаются при действии растворов электролитов более высокой концентрации, когда увеличиваются возможность конвективного и диффузионного переноса солей. В этих отложениях наиболее четко проявляется влияние степени засоления пород на их состав и свойства. Содержание хлоридов $Na^+$ и $K^+$ в пределах I-2 % вызывает диспергацию глинистой породы, более высокое содержание соли - ее агрегирование. Хлориды $Ca^{2+}$ в основном действуют как коагулянты. Как известно, дисперсность глинистой породы влияет на ее степень влажности, консистенцию, набухание, фильтрационные и механические свойства. Постепенное увеличение степени засоления снижает величину набухания, увеличивает проницаемость и угол внутреннего трения, пластичность пород и величина сцепления породы уменьшаются.

Постепенное увеличение содержания солей в поровом растворе приводит к их кристаллизации, при этом может формироваться микротрещиноватость пород, способствующая интенсификации проникновения промстоков в толщу глинистых пород основания и развитию дополнительной осадки сооружения за счет ослабления толщи глинистых пород в целом.

Наиболее сложные преобразования наблюдаются в глинистых породах средней степени литификации при их взаимодействии с промстоками. Прогноз изменения свойств таких глинистых отложений должен вестись только на основе экспериментальных данных.

Третья группа факторов, влияющих на развитие деформаций в глинистых породах оснований, связана с возникновением неизотермического режима под сооружением. Влияние изменения температуры следует рассматривать в двух аспектах: I) исследование понижения или повышения температуры пород основания в связи с возможным изменением параметров механических свойств пород; 2) изучение передвижения поровой влаги под действием температурного градиента, в результате чего возможно существенное изменение влажности пород в основании сооружения.

Первое из названных направлений включает изучение абсолютной величины температуры, влияние которой будет проявляться в изменении структуры воды, характера трансляционного движения ее молекул, что находит свое отражение в изменении поверхностного натяжения, теплоты испарения, вязкости

и коэффициента изотермической диффузии водяного пара. Исследование влияния положительных температур на изменение прочности и деформируемости глинистых пород следует вести при двух возможных условиях: при отсутствии и возможности испарения воды из глинистой породы в основании сооружения [4].

Наибольшее влияние температуры проявляется в глинистых породах малой степени литификации. С ростом степени уплотнения влияние температуры становится меньше, и в глинистых породах высокой степени литификации изменение температур в основании сооружения при отсутствии испарения не имеет существенного значения. В глинистых породах малой степени литификации при росте температуры до 40-50 °С наблюдается повышение сжимаемости, уменьшение сопротивления сдвигу, снижение вязкости глинистой породы [6, 7, 9]. Повышение температуры способствует увеличению степени ориентированности глинистых частиц при уплотнении [7]. При росте температуры более активно проявляются также процессы тиксотропного восстановления прочности [10].

Повышение температуры при возможности испарения приводит к развитию термоусадочных деформаций, которые обычно характеризуются большой неравномерностью. Интенсивное развитие таких деформаций наблюдается в глинистых породах с высокой влажностью, с увеличением плотности сложения и прочности структурных связей усадочные деформации уменьшаются. При прочих равных условиях более гидрофильные глины характеризуются меньшей усадкой [5].

Изменение температуры в основании сооружений определяет возникновение температурного градиента. Движение воды под воздействием разницы температур может быть вызвано несколькими процессами, главными из которых будут являться термокапиллярный, термоосмотический и термодиффузионный [1, 3]. Результирующая скорость складывается из суммы перечисленных выше составляющих. В пористых телах эти процессы довольно трудно разделимы, и для практических целей явление термовлагопереноса часто характеризуют как единый процесс, именуемый термоосмотическим движением. Скорость термоосмоса зависит от градиента температур и размера пор. С увеличением абсолютного размера пор скорость термоосмоса падает. Интенсивность протекания этого явления определяется структурированностью поровой воды. При температуре 65-70 °С термоосмос практически прекращается, так как вода превращается в бесструктурную жидкость.

Наиболее интенсивно термоосмотические процессы протекают в глинистых породах с высоким содержанием глинистых частиц, либо в породах достаточно уплотненных. Размер пор определяет также направление движения воды в этом процессе. По данным экспериментальных исследований, при диаметре пор более 0,1 мкм поровая вода передвигается в сторону пород с более низкой температурой, в более тонкопористой системе движение влаги меняется на обратное: поровая влага движется из областей низких температур в сторону более высоких.

Таким образом, при наличии термоосмоса возможно как увеличение влажности пород в основании, так и ее уменьшение. В каждом конкретном случае необходим специальный анализ, который должен базироваться на знании характера геометрии порового пространства глинистых пород и температурного градиента.

## ЛИТЕРАТУРА

Возный П.А., Душенко В.П., Чураев Н.В. Термоосмотическое течение воды в пористых стеклах. - В кн.: Поверхностные силы в тонких пленках. Сб. докладов 6-й конф. по поверхностным силам. М., Наука, 1979.

2. Денисов Н.Я. О роли физико-химических процессов в деформациях грунтов при увлажнении. - Коллоидный журнал, т. 7, вып. 5.

3. Дерягин Б.В., Ершов А.П., Чураев Н.В. Термоосмотическое течение в смачивающих пленках воды на поверхности капилляров. В кн.: Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. Сб. докладов 4-й конф. по поверхностным силам. М., Наука, 1972.

4. Зиангиров Р.С. Объемная деформируемость глинистых грунтов. М., Наука, 1979.

5. Злочевская Р.И., Королев В.А. Температурный фактор при формирование физико-механических и физико-химических свойств водонасыщенных глин различной плотности. - В кн.: Связанная вода в дисперсных системах. М., Изд-во МГУ, 1977. Вып. 4.

6. Злочевская Р.И., Королев В.А., Дивисилова В.И., Станис Е.В. О природе температурных деформаций в водонасыщенных грунтах. - В кн.: Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. М., Изд-во МГУ, 1978. Вып. 4.

7. Королев В.А., Коломенский Е.Н., Соколов В.Н. Влияние температуры на изменение микростроения водонасыщенных глин при уплотнении. - Инженерная геология, 1979, № 2.

8. Ломтадзе В.Д. Инженерная петрология. Л., Недра, 1970.

9. Месчян С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. Л., Недра, 1978.

10. Николаева С.К., Королев В.А. О роли температуры в процессе тиксотропного структурообразования глинистых грунтов. - Инженерная геология, 1981, № 5.