

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*Н.П.Иваникова  
Е.Н.Богданов  
М.А.Лаздовская*

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ГРУНТОВ  
И МЕТОДЫ  
ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ**

С.-ПЕТЕРБУРГ  
1999

ББК 624.131

И19

Рецензент  
докт. технич. наук В. М. Кнатко  
(С.-Петербург. ун-т)

Печатается по постановлению  
Редакционно-издательского совета  
Санкт-Петербургского государственного университета

Иванникова Н. П., Богданов Е. Н., Лаздовская М. А.

И19 Физико-химические свойства грунтов и методы их исследования: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1999. — 68 с.

Рассматриваются основные физико-химические свойства грунтов, имеющие практическое значение, основные факторы, влияющие на их показатели и методы определения. Помимо стандартных методов описываются нетрадиционные более современные, а также новейшие методы исследования физико-химических свойств грунтов, разработанные в последние годы.

Предназначено для студентов и аспирантов, специализирующихся в области грунтоведения и инженерной геологии.

ББК 624.131

Надежда Петровна Иванникова, Евгений Николаевич Богданов,  
Марина Артуровна Лаздовская

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ  
И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учебное пособие

Зав. редакцией Г. Чередниченко

Редактор М. Юдаевич

Техн. редактор Л. Иванова

Лицензия ЛР № 040050 от 15.08.96.

Подписано в печать с оригинала-макета 13.06.99. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 4,28.

Тираж 100 экз. Заказ № 52.

РОПИ Издательства СПбГУ.  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.  
ЦОП СПбГУ. 199034, С.-Петербург, наб. Макарова, 6.

© Н. П. Иванникова и др.,

1999

© Издательство  
С.-Петербургского  
университета, 1999

## Введение

Изучение физико-химических свойств грунтов является одной из наиболее важных и интересных проблем грунтоведения. Эти свойства характерны для тонкодисперсных несцементированных или слабосцементированных пород, обладающих большой удельной поверхностью и высокой гидрофильтральностью. В настоящем издании рассматриваются методы определения основных физико-химических свойств, имеющих важное практическое значение при инженерно-геологических изысканиях.

Значительное внимание уделяется современным представлениям о гидрофильтральности грунтов и факторам, влияющим на величину показателей их физико-химических свойств. Ввиду существенных недостатков стандартных методов изучения последних большое место в работе отведено описанию нетрадиционных, более совершенных методов, разработанных в 1960–1980 гг., а также новейшим разработкам в этой области, проведенным на кафедре грунтоведения и инженерной геологии МГУ.

## 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГИДРОФИЛЬНОСТИ ГРУНТОВ

Гидрофильтральность, обуславливающая величину показателей физико-химических свойств грунтов, по В. А. Приклонскому [1], определяется общим содержанием в них связанной воды, образующейся под действием поверхностных сил (электростатических и молекулярных).

Исследования, проведенные Е. М. Сергеевым [2], Б. В. Дерягиным [3], Р. И. Злочевской [4–6], В. И. Осиповым [7], Л. И. Кульчицким [8, 9] и многими другими, позволили установить механизм связывания воды с поверхностью глинистых частиц, выявить основные закономерности развития этого процесса и оценить влияние различных категорий воды на формирование физико-химических свойств глинистых минералов. Механизм связывания воды в грунтах может быть различным за счет процессов физической адсорбции, капиллярной конденсации и осмотических процессов. В соответствии с этим выделяют три категории физически связанный воды: адсорбционную, капиллярную и осмотическую. Первая, наиболее прочно удерживающаяся на поверхности минералов за счет водородных, ион-дипольных

и диполь-дипольных взаимодействий, называется прочносвязанной водой, а капиллярная и осмотическая — рыхлосвязанной.

Прочносвязанная вода образуется непосредственно на поверхности частиц в результате процессов адсорбции молекул воды из паров. Основными центрами адсорбции на поверхности глинистых минералов являются:

- 1) валентнененасыщенные атомы боковых сколов кристаллов;
- 2) катионы-компенсаторы;
- 3) атомы кислорода и гидроксильных групп на базальных поверхностях кристаллов.

Эти центры адсорбции энергетически неоднородны. Наиболее активными являются катионы-компенсаторы и валентнененасыщенные атомы боковых сколов. На них и адсорбируются молекулы воды на первой стадии гидратации при относительной влажности воздуха 20–30%. Вода этой категории наиболее прочно удерживается на поверхности глинистых частиц и называется *водой островной адсорбции*, однако она не образует сплошного гидратного слоя, а несколько молекул воды, соединяясь вместе, создают изолированные ассоциации или рои на поверхности минерала.

Образование сплошной пленки связанный воды начинается с появления второй разновидности прочносвязанной воды — *воды полистойной адсорбции* при относительной влажности воздуха 30–90%. Этот вид воды удерживается на поверхности минерала за счет сил молекулярного взаимодействия дальнего порядка, поэтому энергия ее связи с частицами значительно ниже по сравнению с водой островной адсорбции. Содержание прочносвязанной воды в грунтах определяется их химико-минеральным составом, дисперсностью и составом обменных катионов. Особенно велико влияние химико-минерального состава, а именно, кристаллохимического строения поверхности минералов.

Прочносвязанная вода по своей структуре отличается от свободной воды. Наличие силового поля поверхности минералов обуславливает повышенную ориентацию молекул воды вблизи поверхности, т. е. придает структуре связанный воды большую упорядоченность, но характер последней иной, чем в структуре льда. Кроме того, наличие катионов вблизи поверхности частиц, с которыми активно взаимодействуют молекулы воды, определенным образом деструктурирует образующийся покров связанный воды и еще больше усложняет ее структуру. Все это затрудняет построение единой модели

прочносвязанной воды. Изменение структуры прочносвязанной воды вызывает существенное изменение ее свойств по сравнению со свойствами свободной воды. Прочносвязанная вода отличается повышенной плотностью, вязкостью, наличием предела вязкости, ниже которого она ведет себя как упругое тело, в пленке толщиной 0,09 м модуль сдвига ее всего в 300 раз ниже модуля сдвига свинца. Для нее характерны пониженная диэлектрическая проницаемость (2–4 по сравнению с 80 для свободной воды), повышенная теплопроводность, близкая к значениям для минералов, и низкая температура замерзания: 30–50°C.

В отличие от большинства исследователей, считающих, что прочносвязанная вода физически связана с поверхностью глинистых минералов, Л. И. Кульчицкий [8] и некоторые другие авторы относят ее к химически связанный воде. Сторонники химической связи предполагают образование на поверхности дегидратированных глинистых минералов при взаимодействии с водой особой категории поверхностных солеобразных соединений типа кристаллогидратов. В этом их убеждает, наряду с данными рентгеноструктурных анализов, и тот факт, что теплоты гидратации «сухих» глин, почв, крахмала и других материалов оказались одного порядка с теплотой образования кристаллогидратов ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и др.) при гидратации их безводных форм. На основании результатов своих экспериментальных исследований Л.И. Кульчицкий делает вывод, что вода как жидккая фаза появляется в грунтах лишь при относительной влажности воздуха около 90%. При влажности ниже этой границы адсорбированная вода, по его мнению, является составной частью поверхностных глинистых гидратов, представляющих с кристаллохимической точки зрения единое целое с решеткой глинистых минералов.

Однако новые экспериментальные данные позволили получить свидетельство высокой подвижности молекул воды у поверхности глинистых минералов. В частности, большие возможности для изучения молекулярной подвижности связанный воды открыл метод ядерного магнитного резонанса. С его помощью было показано, что адсорбированная вода глинистых минералов является динамичной фазой со сложным механизмом движения, и даже при толщине ее слоя всего в два молекулярных диаметра адсорбированная вода по своей подвижности гораздо ближе к нормальной жидкой воде, чем к твердой фазе (лед).

Слабосвязанная вода, как уже указывалось, образуется при капиллярной конденсации и осмотических процессах. Капиллярная во-

да подразделяется на капиллярно-разобщенную, собственно-капиллярную и подвешенную. Капиллярно-разобщенная или стыковая вода углов пор образуется в местах соприкосновения частиц, в узких участках пор при неполном заполнении пор водой. При полном водонасыщении грунта и заполнении капиллярных пор водой образуется собственно капиллярная или подвешенная вода, в зависимости от того, соединяется ли она с уровнем грунтовых вод или нет. Подвешенная вода, в отличие от собственно капиллярной, не имеет непосредственной связи с уровнем грунтовых вод и образуется обычно при промачивании грунта сверху. Капиллярная вода, подобно свободной, передает гидростатическое давление, но по ряду свойств отличается от последней и стоит ближе к связанной воде. В частности, она замерзает при температуре ниже 0°C, а в ультракапиллярах температура снижается до -12°C.

Образование осмотической воды обусловлено градиентом концентрации ионов, находящихся в поровом растворе и вблизи грунтовых частиц. В результате выравнивания этих концентраций появляется осмотическая вода, молекулы которой связаны с катионами диффузного слоя ионов и таким образом удерживаются вблизи частиц. Плотность ее приближается к плотности свободной воды, температура замерзания -1,5°C, что значительно выше, чем температура замерзания капиллярной воды.

Вода, заполняющая поры грунта и не связанная с поверхностью частиц, называется свободной и подразделяется на два вида: гравитационную и иммобилизованную. Последняя находится в замкнутых порах грунта и не способна, в отличие от гравитационной воды, к движению под действием гравитационных сил. Свободная вода обладает всеми свойствами воды открытых водоемов.

Влажность пород, т. е. общее содержание в них воды, оказывает большое влияние на все физико-механические свойства этих пород. При этом показатели всех свойств, в том числе и физико-химических, зависят от категории воды, заполняющей поровое пространство. Так, наличие в грунте только прочносвязанной воды обусловливает его высокую прочность, слабую деформативность и хрупкий характер разрушения. При появлении рыхлосвязанной воды, и особенно осмотической, происходит заполнение ультракапилляров, в результате чего грунт начинает проявлять липкость и прочность его существенно снижается. При дальнейшем увеличении содержания осмотической воды и заполнении макрокапилляров грунта прочность продолжает

снижаться и грунт проявляет пластичность и набухание. При появлении в грунте свободной воды он резко снижает свою прочность, теряет пластичность и липкость и может перейти в текучее состояние с нарушением структуры.

Учитывая вышесказанное, определение граничных значений влажности, характеризующих содержание в грунте различных видов воды, представляет важную практическую задачу. Значения влажности, соответствующие содержанию различных категорий воды в грунте и являющиеся для данного грунта константами, называют *характерными влажностями*.

Содержание прочносвязанной воды остройной адсорбции оценивается гигроскопической или лабораторной влажностью ( $W_g$ ), общее содержание прочносвязанной воды остройной и полислойной адсорбции характеризуется влажностью максимальной гигроскопичности ( $W_{mg}$ ). Влажность максимальной молекулярной влагоемкости ( $W_{mmc}$ ), близкая по величине к нижнему пределу пластичности ( $W_p$ ), по мнению предложившего этот показатель А. Ф. Лебедева, характеризует максимальное количество воды, удерживаемое молекулярными силами, т. е. общее содержание всей связанной воды. Однако как показали более поздние исследования это не соответствует действительности, так как при влажности, равной  $W=W_{mmc}$ , в грунте содержится общее количество прочносвязанной и капиллярной воды и только небольшая часть осмотической.

Максимальное количество всей физически связанной воды определяется другими характерными влажностями, значительно превышающими  $W_{mmc}$ , а именно, влажностью верхнего предела пластичности ( $W_L$ ) для грунта с нарушенной структурой или влажностью набухания ( $W_{наб}$ ) для грунта с ненарушенной структурой. Влажность, при которой все капиллярные поры заполнены водой, называется *капиллярной влагоемкостью* ( $W_c$ ) грунта. Эта влажность характеризует общее содержание капиллярной и прочносвязанной воды.

Максимально возможное содержание в грунте связанной и гравитационной воды при полном заполнении его пор определяется полной влагоемкостью ( $W_0$ ). Содержание гравитационной воды можно определить по разности полной и капиллярной влагоемкости. Если в грунте не содержится крупных некапиллярных пор, то  $W_0$  может совпадать с  $W_c$ , что указывает на то, что в грунте нет свободной воды. При наличии микропор  $W_0$  может быть гораздо больше, чем  $W_c$ .

Общее количество воды, содержащейся в порах грунта в его естественном залегании, называется *естественной влажностью* ( $W$ ).

Последняя является важнейшей характеристикой физического состояния грунта, определяющей его прочность и другие свойства. Сравнивая значение естественной влажности грунта с величиной его характерных влажностей, определяющих количество различных категорий воды, можно оценить состояние и физико-механические свойства данного грунта.

Физико-химические свойства грунтов, как показали многочисленные исследования, обусловлены в основном присутствием в них слабосвязанной осмотической воды, содержание которой может значительно изменяться в зависимости от целого ряда факторов. Поскольку слабосвязанная вода гидратирует катионы диффузного слоя ионов в двойном электрическом слое, то все факторы, влияющие на величину электрохимического потенциала ( $\xi$ ) и толщину диффузного слоя, будут оказывать соответствующее влияние и на значение показателей физико-химических свойств грунтов. Основными факторами, определяющими величину  $\xi$ -потенциала и толщину диффузного слоя ионов, являются: 1) термодинамический потенциал ( $\psi$ ); 2) концентрация электролита внешнего раствора; 3) валентность ионов в диффузном слое; 4) диэлектрическая проницаемость жидкости; 5) pH среды; 6) температура грунта.

$\xi$ -потенциал растет с увеличением термодинамического потенциала, величина которого, в свою очередь, зависит от количества гетеровалентных изоморфных замещений в кристаллической решетке минерала, их локализации и общей площади межфазной поверхности. С ростом количества изоморфных замещений при прочих равных условиях повышается общий структурный заряд, определяющий термодинамический потенциал частицы. При изоморфизме в октаэдрических сетках минералов  $\xi$ -потенциал частиц будет меньше, чем при эквивалентных замещениях в тетраэдрических сетках минералов, что связано с экранированием заряда при нахождении его внутри структурного слоя (в октаэдрической сетке). В соответствии с этим величина  $\xi$ -потенциала, толщина диффузного слоя и в конечном счете толщина гидратной пленки связанной воды у различных минералов будут неодинаковы.

Еще большее значение приобретают особенности кристаллохимического строения глинистых минералов при рассмотрении суммарной величины  $\xi$ -потенциала глинистых частиц в целом, а не отдельной частицы. Так как суммарная величина  $\xi$ -потенциала тесно связана с общей межфазной поверхностью минерал — вода, то его значение

заметно возрастает с увеличением дисперсности частиц и содержанием набухающих межслоевых промежутков в структуре глинистых минералов. Этим объясняются наиболее высокие значения  $\xi$ -потенциала и наибольшая гидрофильтрность у минералов типа монтмориллонита по сравнению с минералами с жесткой кристаллической структурой типа каолинита и гидрослюды.

Толщина диффузного слоя и величина  $\xi$ -потенциала частиц сильно зависят от концентрации электролита в поровом растворе и состава обменных катионов. Появление электролита в поровом растворе снижает толщину диффузного слоя и катионы начинают снова уходить в адсорбционный слой. Это сопровождается снижением  $\xi$ -потенциала и при высокой концентрации электролита он может стать равен 0. При уменьшении концентрации электролита, наоборот, диффузный слой расширяется и  $\xi$ -потенциал растет.

Величина  $\xi$ -потенциала и толщина диффузного слоя существенно зависят от природы катионов-компенсаторов: валентности, поляризуемости и способности гидратироваться. При увеличении валентности катионов значения этих показателей снижаются. При одинаковой валентности катионов энергия их связи с поверхностью частиц определяется специфической адсорбционной способностью, обусловленной поляризуемостью и гидратируемостью катионов. Увеличение поляризуемости и снижение гидратируемости катионов способствуют уменьшению толщины диффузного слоя и  $\xi$ -потенциала, так как это повышает электростатические взаимодействия катионов с поверхностью частицы. Поляризуемость катионов и их способность гидратироваться зависит от ионного радиуса: с ростом последнего поляризуемость повышается, а гидратируемость снижается. Поэтому с увеличением ионного радиуса диффузный слой и  $\xi$ -потенциал уменьшаются.

Диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды также существенно влияет на толщину диффузного слоя и  $\xi$ -потенциал. С ее повышением снижается энергия взаимодействия катионов с поверхностью частиц, что приводит к увеличению  $\xi$ -потенциала и толщины диффузного слоя. Этим объясняется наибольшее развитие электрохимических явлений в водной среде по сравнению с другими жидкостями. На характер двойного электрического слоя и значение его параметров существенное влияние оказывает pH среды. Это влияние обусловлено не только повышенной способностью ионов  $H^+$  и  $OH^-$  адсорбироваться на поверхности частиц, но и процессами ионизации атомов структуры минералов на боковых сколах октаэдрической

сетки, приводящими к перезарядке последних в кислой среде. В результате этого боковые сколы глинистых частиц в кислой среде заряжаются положительно, в щелочной и нейтральной остаются отрицательно заряженными, как и базальные поверхности. Таким образом, двойной электрический слой в щелочной среде является однородным по всей поверхности, а в кислой среде он оказывается знакопеременным. В щелочной среде общая величина термодинамического и электрохимического потенциалов будет выше, чем в кислой среде. Кроме того, образование разноименных двойных электрических слоев в кислой среде приводит к появлению у частиц жестких дипольных моментов, играющих важную роль в процессе структурообразования в таких системах. Влияние температуры на двойной электрический слой носит сложный характер. С повышением температуры  $\xi$ -потенциал должен расти из-за возрастания интенсивности теплового движения катионов-компенсаторов. Но одновременно с этим наблюдается снижение диэлектрической проницаемости воды. При повышении температуры от 20 до 60°C диэлектрическая проницаемость воды снижается от 80 до 66, что вызывает обратный эффект — уменьшение  $\xi$ -потенциала. В результате разности указанных противоположных эффектов влияние температуры на величину  $\xi$ -потенциала у каждого минерала может проявляться по-разному.

Несмотря на значительные успехи современной физической и коллоидной химии в области изучения поверхностных явлений дисперсных систем, вопросы взаимодействия воды с глинистыми минералами остаются до настоящего времени во многом дискуссионными. Как отмечает В. И. Осипов [7], последние исследования показали значительную сложность механизма связывания воды с глинистыми минералами. Наибольшие дискуссии вызывают вопросы влияния поверхности кристаллов и состава обменных катионов на гидрофильность грунта. Существовавшая ранее точка зрения об исключительной роли обменных катионов в процессе гидратации считается сейчас несостоятельной. Исследования показывают, что решающим фактором в модификации структуры и свойств адсорбированной воды является поверхность минерала.

По мнению В. И. Осипова [7], следует различать *удельную* и *общую гидрофильность*. Первая — это показатель гидрофильных свойств поверхности минерала (его внешних и внутренних граней). Удельная гидрофильность равна количеству связанной воды, деленному на удельную поверхность минерала (в  $\text{г}/\text{см}^2$ ) или толщине гид-

ратной пленки связанной воды (в нм). Общая гидрофильность характеризуется количеством связанной воды, выраженной в процентах или в граммах на 1 г сухой навески минерала. Общую гидрофильность можно найти по удельной — путем ее умножения на суммарную поверхность минерала.

Удельная гидрофильность характеризует процессы структурообразования и физико-химические свойства с позиции контактных взаимодействий. Обычно в литературе говорят об общей гидрофильности, и тогда монтмориллонит будет самым гидрофильным, а каолинит наименее гидрофильным минералом. Но гидратируемая поверхность у монтмориллонита гораздо больше, чем у каолинита. Если это учесть, то удельная гидрофильность у ненабухающих минералов больше, чем у набухающих, и поэтому толщина гидратных пленок связанной воды на базальных поверхностях этих минералов больше, чем у монтмориллонита.

Обычно считают, что влияние обменных катионов на гидрофильность связано с двумя эффектами: различной энергией их гидратации и различной способностью диссоциировать с поверхности минералов и образовывать диффузионный слой ионов. В. И. Осипов в результате проведенных им исследований трактует этот вопрос по-новому. Он показал, что роль обменных катионов заключается не только в вышеуказанных эффектах, но и в модификации кристаллической структуры глинистых минералов.

У набухающих минералов количество прочносвязанной воды обусловлено главным образом удельной гидрофильностью минерала и энергией гидратации катионов. Так как последняя растет с увеличением ионного радиуса, то количество прочносвязанной воды у монтмориллонита растет по ряду  $\text{K}^{3+} > \text{K}^{2+} > \text{K}^+$ . При  $\text{W} > \text{W}_{mg}$  картина гидратации монтмориллонита резко меняется. У Li- и Na-форм процесс продолжается на внешних и внутренних гранях кристаллов, а у многовалентных и некоторых одновалентных (K, Cs) форм — только на внешних. Поскольку закрытие внутренних поверхностей резко снижает гидратируемую поверхность минералов, то общее содержание связанной воды зависит уже не от энергии гидратации катионов и степени их диссоциации, как обычно считается, а от влияния катионов на баланс сил между слоями, т.е. изменяется от состава обменных катионов в иной зависимости по сравнению с прочносвязанной водой.

У каолинита образование прочносвязанной и слабосвязанной воды идет только на внешних поверхностях и обусловлено их удельной

гидрофильностью. Так как модификация кристаллического строения каолинита при его гидратации слабо зависит от состава обменных катионов, то влияние последних на количество прочносвязанной воды и общее содержание связанной воды здесь незначительно.

Следует отметить, что в последнее время стали появляться работы, в которых критикуется принцип классификации воды в породах, указывается на недостаточно строгую обоснованность, произвольность и искусственность установления границ между отдельными видами воды и нецелесообразность вообще разделения влаги по категориям. По мнению Р. И. Злочевской [6], это связано с тем, что вода в дисперсных грунтах находится одновременно под действием нескольких сил разной природы. Поэтому следует говорить лишь о преобладании тех или иных сил в определенных интервалах влажности, а сам переход от одной формы воды к другой характеризуется не каким-то строго определенным значением влажности, а некоторой областью значений. Как указывает Р. И. Злочевская [6], факт невозможности однозначного подразделения воды по категориям в дисперсных породах стал особо явным с развитием и использованием термодинамического подхода к исследованию состояния влаги в грунтах. Согласно термодинамическим закономерностям, энергетическая характеристика влаги в породах находится в квазиравновесном состоянии с породой, уравновешивающим ее силовые поля. Водоудерживающая способность грунта может характеризоваться величиной работы, затрачиваемой на преодоление сил, удерживающих воду. Полная суммарная работа по переносу воды складывается из отдельных ее составляющих: адсорбционной, капиллярной, осмотической и гравитационной, характеризующих различные виды воздействия на термодинамическое состояние воды в породе. Долевое участие этих составляющих при постоянной температуре и давлении определяется главным образом влажностью породы, причем начало отсчета, нулевые их значения принято вести от плоской поверхности свободной воды.

Учитывая определенную условность выделения вышерассмотренных категорий воды, мы считаем все же целесообразным придерживаться подобной классификации, поскольку она достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными по изменению физико-механических свойств грунтов в зависимости от вида воды. Дальнейшее развитие термодинамических основ грунтоведения позволит, возможно, существенно уточнить, а может, и пересмотреть указанную классификацию.

## 2. ИЗУЧЕНИЕ СОРБИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Как указывалось в гл. 1, дисперсные грунты способны адсорбировать на поверхности слагающих их частиц молекулы воды из пара, содержащиеся в воздухе, образуя пленки прочносвязанной воды. Чем выше относительная влажность воздуха, численно равная относительной упругости водяных паров ( $P/P_S$ ), тем большее количество парообразной влаги сорбируется на глинистых частицах.

Соотношение между относительной влажностью воздуха и количеством влаги, сорбируемой почвами, изучалось многими исследователями. Обстоятельный критический обзор работ по этому вопросу был проведен А. А. Роде [10]. Исследования показали, что процесс сорбции неоднороден и в нем следует различать три этапа, соответствующие трем участкам на изотерме адсорбции (рис. 1). Первый участок (I) соответствует образованию прочносвязанной воды островной адсорбции, он имеет линейный характер. Второй участок (II) характеризует содержание воды полислойной адсорбции, а третий участок (III) соответствует образованию, наряду с прочносвязанной, капиллярной воды. Граница между вторым и третьим участками проходит при относительной упругости пара  $P/P_S = 0,92$ . Принято считать, что вода островной адсорбции образуется при относительной влажности воздуха 20–30%, и ее содержание в грунте определяется гигроскопической влажностью ( $W_g$ ). Определяется  $W_g$  при  $t = 20^\circ\text{C}$  и  $P/P_S = 0,55$  (эти условия близки к лабораторным, поэтому гигроско-

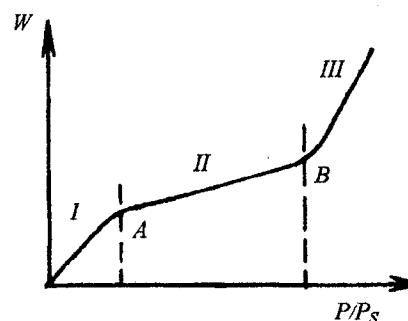


Рис. 1.

ническую влажность называют еще лабораторной). Определение максимальной гигроскопичности  $W_{mg}$ , характеризующей максимальное количество прочносвязанной воды (островной и полислоевой адсорбции), проводится при  $P/P_S = 0,94$  по методу Митчерлиха.

По данным М. П. Лысенко [11], при влажности, равной  $W_g$ , в глинистых грунтах различного состава и генезиса отмечается гидратный слой в две молекулы воды, а при  $W=W_{mg}$  примерно в четыре молекулы воды. Причем количество адсорбированной воды на единицу поверхности близко для грунтов разного минерального и гранулометрического состава. Таким образом, толщина водной пленки инвариантна в пределах адсорбционной влаги (до  $W_{mg}$ ). М. П. Лысенко [11] также указывает, что процесс сорбции молекул воды поверхностью глинистых частиц идет и при  $W > W_{mg}$ , т. е. можно считать, что  $W_{mg}$  — это условная величина, так как она зависит от принятой методики ее определения, т. е. от относительной влажности воздуха или от исходной влажности грунта. Исследования М. П. Лысенко также показали, что при  $P/P_S = 0,20$  толщина водной пленки не зависит от удельной поверхности грунтовых частиц и равна 276 нм, что соответствует диаметру одной молекулы воды. Это указывает на то, что содержание воды островной адсорбции возможно следует определять при  $P/P_S < 0,2$ . По данным Л. И. Кульчицкого [8], прочносвязанная вода вплоть до  $P/P_S = 0,9$  не образует сплошного молекулярного слоя, а имеет островной характер, и вообще, по его мнению, как жидкая фаза вода появляется лишь при  $P/P_S > 0,88$ .

Как видно, вопросы, касающиеся классификации воды по энергии связи с поверхностью глинистых частиц и граничных значений характерных влажностей, остаются до сих пор дискуссионными.

Изучение сорбционной способности глинистых грунтов при различных значениях  $P/P_S$  проводится по единой методике. Небольшие навески (4–5 г) воздушно-сухого грунта, насыпанного в стеклянные бюксы, помещают в эксикаторы, на дне которых находятся насыщенные растворы различных химических реагентов, создающих при  $t = 20^\circ\text{C}$  соответствующую влажность воздуха, а именно, насыщенные растворы  $\text{CH}_3\text{COOK}$  — 20%,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  — 55%,  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  — 88%, 10%-ный раствор  $\text{H}_2\text{SO}_4$  — 94% и дистиллированная вода — 100%. Бюксы с грунтом взвешивают на аналитических весах 2–3 раза в неделю до достижения постоянной массы навески и затем определяют влажность стандартным методом. При высокой относительной влажности, близкой к 100% (>88%), момент достижения равновесия влажности принимается в известной мере условно.

По полученным значениям характерных влажностей можно рассчитать величину удельной поверхности грунта, толщину водных пленок и число молекулярных слоев воды. Следует отметить, что величина удельной поверхности более точно характеризует степень дисперсности грунта, чем содержание глинистой фракции, а по толщине водной пленки можно судить об удельной гидрофильности грунта. Удельную поверхность грунта можно определить по методу Кутелика, изложенному в работе Б. Н. Мичурина [12]

$$S_0 = 36,14 W_{P/P_S = 0,2} \text{ мг/г}^2$$

Здесь  $W_{P/P_S}$  — равновесная влажность грунта при относительной влажности воздуха 20% или относительной упругости пара, равной 0,2 (над насыщенным раствором ацетата калия или 58%-ным раствором серной кислоты).

Толщина водных пленок ( $h$ , нм) рассчитывается по формуле

$$h = \frac{W \cdot 10^3}{\rho_0 S_0},$$

где  $W$  — влажность грунта в долях единицы,  $\rho_0$  — плотность воды,  $\text{г/см}^3$ .

Число молекулярных слоев воды  $N$  вычисляется по формуле

$$N = \frac{h \cdot 10^8}{0,276},$$

где 0,276 — диаметр молекул воды, нм.

Расчеты  $S_0$ ,  $h$ ,  $N$  для различных характерных влажностей, полученные М. П. Лысенко [11] для монтмориллонитовых и каолинитовых глин, показали, что при влажности, равной пределу раскатки ( $W_p$ ), толщина гидратной пленки у монтмориллонита (1,32 нм) в несколько раз меньше, чем у каолинита (9,15 нм), что обусловливает значительное снижение сцепления у последнего. Поскольку, как известно, при одинаковой консистенции водонасыщенные грунты с нарушенной структурой имеют одинаковую прочность, то равенство прочности при  $W=W_p$  для данных глин возможно лишь за счет повышения угла внутреннего трения у каолинитовой глины. В то же время, прочность бентонита, имеющего малую толщину водных пленок, обусловлена в основном силами сцепления. Эта закономерность, хотя и в менее выраженной форме, соблюдается и при высокой влажности, равной верхнему пределу пластичности ( $W_L$ ), при которой толщина пленки

у монтмориллонитовой глины только в 2 раза меньше, чем у каолинитовой.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИГРОСКОПИЧЕСКОЙ ВЛАЖНОСТИ

Влажность горной породы, обусловленная ее гигроскопичностью, т. е. ее свойством сорбировать парообразную воду из воздуха, называется гигроскопической. Она практически равна влажности воздушно-сухого грунта.

Определение  $W_g$  заключается в следующем: воздушно-сухую пробу грунта растирают в фарфоровой ступке и затем просеивают через сито с диаметром отверстий 0,5 мм. Из средней пробы просеянного грунта отбирают навеску не менее 5 г (при взвешивании на аналитических весах) в заранее взвешенном стеклянном боксе и взвешивают его с точностью до 0,01 г. Далее продолжают анализ как при обычном определении влажности грунта [13].

### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ГИГРОСКОПИЧЕСКОЙ ВЛАЖНОСТИ

Максимальную гигроскопическую влажность грунты приобретают путем сорбции влаги из воздуха, почти полностью насыщенного водяным паром. Эта влажность соответствует максимальному содержанию прочносвязанной воды в грунте.

Для определения  $W_{mg}$  обычно применяют метод Митчерлиха, заключающийся в установлении равновесного состояния влажности грунта в воздухе, почти полностью насыщенном водяным паром. При определении  $W_{mg}$  проводят подготовку грунта к анализу так же, как и при определении  $W_g$ . Затем из средней пробы грунта отбирают навеску не менее 5 г в заранее взвешенный стеклянный бокс и помещают его в эксикатор, в котором находится либо 10%-ный раствор  $H_2SO_4$ , либо насыщенный раствор  $K_2SO_4$ . Бокс с воздушно-сухим грунтом оставляют в эксикаторе на несколько дней для установления равновесного состояния влажности грунта в атмосфере, насыщенной водяным паром. Равновесное состояние влажности грунта фиксируется периодическим взвешиванием бокса до достижения им постоянной массы. После этого бокс с грунтом помещают в сушильный шкаф

для высушивания при  $t = 100\text{--}105^\circ\text{C}$ . Последующий расчет  $W_{mg}$  производится по известной формуле [13].

### 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ

Одним из распространенных методов определения максимальной молекулярной влагоемкости глинистых пород является метод влагоемких сред. Определение  $W_{mmc}$  по возможности следует проводить на образцах грунтов с естественной влажностью.

Подготовка пород к анализу сохраняется такой же, как и при определении влажности верхнего предела пластичности. Испытания образцов на максимальную молекулярную влагоемкость проводятся на приборе Мартынова. На дно металлического стаканчика прибора укладывается 20 листов фильтровальной бумаги. На дно грунтодержателя ( $h=2$  мм) помещают один лист фильтровальной бумаги, на которую укладывают заранее подготовленную грунтовую массу, после чего полученный образец грунта переносят в металлический стаканчик и сверху кладут 19 листов фильтровальной бумаги. Далее производится прессование в течение 10 мин под давлением, равным  $65,5 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Указанное давление соответствует отжатию свободной воды. После снятия давления грунтовую лепешку освобождают от фильтровальной бумаги и определяют ее влажность по известному способу [13].

### 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ

Способность грунтов уплотняться под нагрузками зависит от влажности. Влажность, при которой достигается наибольшая плотность грунта при заданной затрате работы, называется оптимальной влажностью ( $W_{оп}$ ), а плотность скелета — максимальной ( $\rho_{d_{max}}$ ). Величина оптимальной влажности близка к влажности нижнего предела пластичности и максимальной молекулярной влагоемкости. При оптимальной влажности связные грунты находятся на границе перехода от полутвердой консистенции к тугопластичной. Грунты при этой влажности достаточно устойчивы: не обладают липкостью, не способны к пылеобразованию, легко разрабатываются и уплотняются.

На этом свойстве грунтов и основан один из методов повышения прочности и водоустойчивости — уплотнение при оптимальной влажности до максимальной плотности. Кроме того, уплотнение при оптимальной влажности является обязательным условием, обеспечивающим наибольший эффект и при иных методах укрепления грунтов: известковании, цементации, битумировании и др.

### 6.1. Стандартный метод

Определение оптимальной влажности и максимальной плотности производится в специальном приборе — так называемом стандартном уплотнителе — по методике, принятой в дорожном деле.

Испытание производится следующим образом. Воздушно-сухой растергтый грунт, просеянный через сите с отверстиями в 5 мм, в количестве около 0,8 кг помещают в экискатор и увлажняют до значения влажности на 6–8% меньше нижнего предела пластичности. Увлажненный грунт тщательно перемешивают и из него берут пробу на влажность.

Определяют массу разъемного цилиндра с вкладышем. Разъемный цилиндр вставляют в поддонник с таким расчетом, чтобы плоскость разреза цилиндра была перпендикулярна стопорным винтам. В цилиндр опускают вкладыш и винтами закрепляют в поддоннике. На цилиндр надевают съемное кольцо. Грунт насыпают в собранный прибор до верхнего края формы. Затем вставляют пуансон с направляющим стержнем и гирай и осуществляют уплотнение ударной гирай, сбрасываемой с высоты 30 см. Число ударов принимается равным 30 для супесчаных и 40 для суглинистых и глинистых грунтов. После уплотнения пуансон и съемное кольцо осторожно снимают и избыток грунта тщательно срезают до уровня краев разъемного цилиндра. Стопорные винты ослабляют, разъемный цилиндр с вкладышем извлекают из поддонника и определяют массу цилиндра с вкладышем и образцом грунта. Взвешивание производится с точностью до 0,1 г. Массу изготовленного образца  $P$  рассчитывают по формуле

$$P = P_1 - P_2.$$

Плотность уплотненного грунта определяется по формуле

$$\rho = \frac{P_1 - P_2}{V},$$

где  $P_1$  — масса разъемного цилиндра с вкладышем и грунтом, г;  $P_2$  — масса пустого разъемного цилиндра с вкладышем, г;  $V$  — объем уплотненного грунта, см<sup>3</sup>.

После определения плотности грунт из разъемного цилиндра удаляют, разминают и высыпают обратно в экискатор. Если грунт удалить затруднительно, то ударом по деревянному предмету цилиндр разделяют на две части, это дает возможность свободно извлечь грунт из цилиндра.

Затем в грунт доливают воду в таком количестве, чтобы увеличить влажность его примерно на 2–3%. Перемешав грунт и отобрав пробу на влажность, испытание повторяют, но теперь уже при более высокой влажности. С увеличением влажности плотность уплотненного грунта возрастает. Опыт производят до тех пор, пока плотность влажного грунта не станет постоянной или не будет уменьшаться.

### 6.2. Ускоренный метод (по Г. Ф. Богданову, 1965)

Определение производится в цилиндрической форме для изготовления образцов объемом 10 см<sup>3</sup>. Форма состоит из корпуса, поршня, шпильки и накладного кольца. Испытание проводят следующим образом.

Грунт в количестве около 0,5 кг высушивают до воздушно-сухого состояния, растирают и просеивают через сите в 2 мм. Из просеянного грунта берут 6–7 навесок по 30 г каждая. Первую навеску увлажняют добавкой воды в количестве 3 мл, тщательно перемешивают до равномерного увлажнения и помещают в форму. В форму вводят поршень и грунт уплотняют на прессе нагрузкой 30 кг/см<sup>2</sup>. Грунт под нагрузкой выдерживают две минуты, затем в поршень вставляют стопорную шпильку, на форму накладывают выталкивающее кольцо и, нажимая на него, вдавливают поршень в форму до соприкосновения шпильки с корпусом формы. Накладное кольцо с формы снимают и избыток вытолкнутого из формы грунта срезают ножом. Шпильку из поршня удаляют и, установив вновь накладное кольцо на форму, нажимая на него, выталкивают образец из формы. Приготовленный образец взвешивают ( $g_1$ ) и ставят на просушивание в сушильный шкаф. Из всех остальных приготовленных навесок образцы готовятся аналогичным способом с той разницей, что влажность в каждом исследуемом образце должна отличаться от влажности предыдущего

на 2%, т. е. ко второй навеске должна быть прилита вода в количестве 3,6 мл, к третьей — 4,2, четвертой — 4,8 и т. д.

С увеличением влажности грунта масса образцов вначале будет возрастать, а затем это значение установится равным значению в предыдущем измерении или может несколько снизиться. Изготовление образцов заканчивают, когда масса образцов уже не будет увеличиваться.

После высушивания каждый образец взвешивают ( $g$ ) и рассчитывают влажность грунта при формовке и плотности скелета

$$W = \frac{g_1 - g}{g} 100\%, \quad \rho_d = \frac{g}{v} \text{ г/см}^3,$$

где  $v$  — объем изготовленного образца.

После окончания испытаний и определения влажности для каждого экспериментального значения плотности  $\rho = g_1/v$  рассчитывают плотность скелета

$$\rho_d = \frac{g}{V} = \frac{\rho}{1 + 0,01W}.$$

На основании полученных данных вычерчивают кривую зависимости плотности скелета грунта от его влажности (рис. 2). При помощи этого графика определяют влажность, соответствующую максимальной плотности скелета ( $\rho_{d_{max}}$ ), она и будет оптимальной влажностью  $W_{op}$ , обеспечивающей наилучшие условия уплотнения грунта при заданной нагрузке уплотнения.

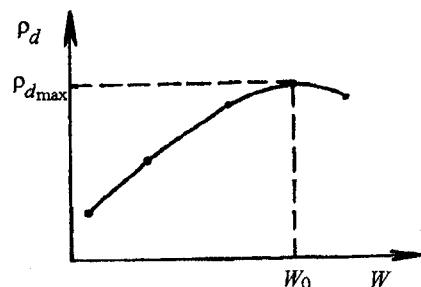


Рис. 2.

## 7. ПЛАСТИЧНОСТЬ И КОНСИСТЕНЦИЯ ГРУНТОВ

### 7.1. Общие сведения

Под пластичностью грунта понимается его способность под воздействием внешних сил изменять форму (деформироваться) без разрыва сплошности и сохранять приданную ему форму после прекращения этого воздействия. Пластичностью при определенной влажности и небольших давлениях обладают только глинистые и лессовые породы, мергели и мел, торф, почвы и некоторые искусственные грунты.

Для характеристики пластичности связанных грунтов используют три показателя: 1) верхний предел пластичности (предел текучести)  $W_L$ ; 2) нижний предел пластичности  $W_p$  (предел раскатки); 3) число пластичности  $J_p = W_L - W_p$ .

Верхний предел пластичности представляет собой граничную влажность, при превышении которой грунт переходит из пластичного состояния в текучее. Нижний предел пластичности характеризует граничную влажность между полутвердым и пластичным состоянием грунта. Число пластичности показывает диапазон колебаний влажности, в пределах которого грунт сохраняет пластичное состояние. Чем больше число пластичности, тем грунт пластичнее.

Пластичность связанных грунтов определяется составом и свойствами как твердых частиц грунта, так и взаимодействующей с ним жидкостью. К факторам первой группы относятся гранулометрический состав и химико-минеральный состав, форма частиц, состав обменных катионов. Влияние жидкой компоненты на пластичность обусловливается ее химическим составом и концентрацией растворенных веществ.

Важнейшим фактором, влияющим на пластичность грунтов, является гранулометрический состав. Эта зависимость изучена наиболее хорошо. Установлено, что частицы размером 2–1 мм имеют небольшую пластичность, у частиц с размером менее 1 мм пластичность уже значительна, она сильно зависит от содержания глинистой фракции и возрастает пропорционально увеличению содержания коллоидов, особенно органических. Из всех показателей пластичности верхний предел наиболее тесно связан с гранулометрическим составом, с нижним же пределом связь незначительна.

Минеральный состав также оказывает существенное влияние на пластичность. Максимальная пластичность отмечается для монтмориллонита и наименьшая для каолинита, что связано с соответствующей разностью дисперсности и гидрофильтрности этих минералов.

Обменные катионы по своему влиянию на пластичность располагаются в следующий ряд: Li > Na > K > Mg > Ca > H > Fe > Al. Этот ряд отвечает изменению содержания слабосвязанной воды и дисперсности грунта в зависимости от состава обменных катионов.

Состав и концентрация водного раствора, взаимодействующего с грунтом, также оказывает существенное влияние на его пластичность, поскольку состав раствора влияет на состав обменных катионов, а концентрация во многом определяет толщину диффузного слоя и количество слабосвязанной воды. Повышение концентрации электролита раствора ведет к значительному снижению пластичности, особенно у высокодисперсных грунтов типа монтмориллонита. Тесная связь числа пластичности и дисперсности позволила разработать классификацию связных глинистых грунтов по пластичности (в %)

Супесь	$1 < J_p < 7$
Суглинок	$7 < J_p < 17$
Глина	$J_p > 17$

Сопоставление пределов пластичности и естественной влажности грунтов позволяет ориентировочно судить, в каком состоянии они находятся в естественном залегании, т. е. определить их консистенцию. Консистенция характеризует степень подвижности частиц под воздействием внешних сил при данной влажности. Если влажность не превышает нижний предел пластичности, то грунт находится в твердой консистенции. При изменении влажности в диапазоне нижнего и верхнего пределов пластичности грунты имеют пластичную консистенцию. Если же влажность больше верхнего предела пластичности, то грунт находится в текучей консистенции.

Применяемые в настоящее время в инженерно-геологической практике стандартные методы определения пределов пластичности (ГОСТ 5180-84 — метод раскатывания грунта в жгут для определения нижнего предела пластичности и метод балансирного конуса для верхнего предела пластичности) не обеспечивают необходимой точности и, как уже давно утверждают многие исследователи, нуждаются в усовершенствовании или даже замене. При этом общее мнение, которое было высказано М. Н. Гольдштейном (1973), сводится к тому, что для определения обеих границ пластичности целесообразно

использовать один и тот же метод пенетрационных испытаний связных грунтов. Метод пенетрации для определения пределов пластичности впервые был использован П. О. Бойченко [14]. Он предложил определять значение  $W_p$  и  $W_L$  грунтов на пенетрометре своей конструкции с конусом при вершине  $30^\circ$  и постоянной массой 300 г.

Согласно методике П. О. Бойченко, за нижний предел пластичности принимается влажность, соответствующая глубине погружения конуса в грунт на 4 мм, а за верхний предел — влажность грунта при погружении конуса на глубину 22,5 мм. Указанные величины являются средними глубинами погружения конуса в грунт, влажность которого равна нижнему и верхнему пределам пластичности, определяемым стандартными методами. В качестве верхнего предела пластичности П. О. Бойченко рекомендовал принимать влажность грунта, при погружении конуса на глубину 32 мм, что соответствовало  $W_L$ , определенному на приборе В. В. Охотина.

Исследования Е. Н. Богданова [15] подтвердили правоту Бойченко, поскольку именно влажность, при которой конус погружали на 32 мм, соответствовала переходу грунта в текучее состояние (потерю прочности с уменьшением угла внутреннего трения до нуля), а стандартный метод дает явно завышенную прочность.

Консистенция грунтов определяется также, как и пластичность,косвенным и прямым методами. Косвенный метод основан на сопоставлении величины естественной влажности грунта и показателей его пластичности. Согласно СНиП, консистенция оценивается показателем текучести, рассчитываемым по формуле

$$J_L = \frac{W - W_L}{J_p}$$

Важнейший недостаток  $J_L$ , игнорируемый нормативными документами, заключается в том, что этот показатель по смыслу и форме его определения характеризует физическое состояние, а следовательно, и механические свойства грунтов, только исключительно для полностью водонасыщенных грунтов нарушенного сложения. В трехфазных грунтах с нарушенной и ненарушенной структурой и даже в водонасыщенных высокоструктурных грунтах различного генезиса  $J_L$  непосредственно не характеризует механические свойства. Этих недостатков можно избежать при использовании пенетрационного метода, т. е. прямого метода определения консистенций грунтов. Последний основан на непосредственном определении механической прочности грунтов с помощью пенетрации.

Впервые он был предложен П. О. Бойченко [14]. Прямой метод определения консистенции глинистых грунтов П. О. Бойченко предложил на основании экспериментально установленного им положения, что все водонасыщенные связные грунты нарушенного сложения при одинаковом удельном сопротивлении пенетрации  $R=P/h_2$ , где  $P$  — нагрузка на конус и  $h$  — глубина его погружения имеют одну и ту же консистенцию. В. Ф. Разоренов [16] подтвердил установленные П. О. Бойченко зависимости, предложил аналитические зависимости между консистенцией и удельным показателем пенетрации и усовершенствовал методику определения пределов пластичности и консистенции прямым методом. Методика проведения пенетрации В. Ф. Разоренова является более совершенной по сравнению с методикой П. О. Бойченко, так как последняя проводится при постоянной нагрузке на конус, в отличие от первой, проводимой при возрастающей нагрузке. Однако наиболее научно обоснованной является методика пенетрационных испытаний, разработанная Е. Н. Богдановым [15], который установил, что инвариантность удельного сопротивления пенетрации проявляется лишь при определении глубины погружения конуса, соответствующей активной глубине, изменяющейся в зависимости от угла раскрытия конуса и консистенции грунта. Кроме того, по выше указанным методикам в отличие от стандартной методики (ГОСТ 5180-84) определение пластичности глинистых грунтов, во избежание необратимого свертывания коллоидов, следует проводить на грунтах с естественной влажностью, а не на высушенных до воздушно-сухого состояния.

## 7.2. Методы определения

### 7.2.1. Определение пределов пластичности методом ГОСТ 5184-64

**Определение влажности верхнего предела пластичности.** Применяется конус Васильева массой 76 г, с углом при вершине 30°. На расстоянии 10 мм от вершины на конусе вырезана круговая метка. Верхний предел пластичности или предел текучести по возможности следует определять по образцам естественной влажности. Часть грунта (примерно 100 г) разминают шпателем и протирают через сито с диаметром отверстий 2 мм. После этого протертый грунт замачивают дистиллированной водой в фарфоровой чашке (если он имеет незначительную естественную влажность), тщательно перемешивают и по-

мешают на сутки в эксикатор с водой. Подготовленную массу грунта переносят в стаканчик прибора бровень с его краями и поверхность заглаживают шпателем. На поверхность грунта устанавливают предварительно смазанный вазелином конус, который начнет погружаться в грунт под действием собственной массы. Если конус за 5 с погружается в грунт на глубину 10 мм, то считается, что влажность грунта равна влажности верхнего предела пластичности. Если за 5 с конус погружается на глубину меньше 10 мм, то, соответственно, влажность грунта ниже влажности верхнего предела пластичности. В этом случае грунт из стаканчика переносят обратно в фарфоровую чашку, добавляют дистиллированной воды, перемешивают и повторяют испытание. Если конус погружается в грунт на глубину, большую, чем 10 мм, то в грунте наблюдается избыток влаги. Тогда грунт необходимо подсушить на воздухе, тщательно перемешивая его, а затем повторить испытание.

Когда требуемое состояние грунта будет достигнуто, из стаканчика отбирают пробу грунта и определяют его влажность.

**Определение влажности нижнего предела пластичности.** Используется метод раскатывания грунта в жгут диаметром 3 мм. При определении нижнего предела пластичности, как правило, исследуют часть грунта, оставшуюся после определения влажности верхнего предела пластичности. Грунтовую пасту доводят до пластичного состояния, перемешивая ее и подсушивая на воздухе. Часть приготовленной массы скатывают в шарик  $d=10\text{ mm}$ , который затем на стекле раскатывают в жгут  $d=3\text{ mm}$ , не допуская раскатывания грунта в более тонкий жгут. Затем жгут опять скатывают в шарик и снова раскатывают до тех пор, пока жгут  $d=3\text{ mm}$  не станет покрываться трещинами и крошиться. Для получения более стабильных результатов, не зависящих от субъективных факторов, рекомендуется прекращать раскатку грунта, когда раскрошившийся грунт более невозможно слепить в комок. После этого грунт помещают в предварительно взвешенный бюкс и приступают к раскатыванию следующей порции грунта. Для получения более достоверных значений влажности нижнего предела пластичности масса грунта в бюксе должна составлять не менее 10–15 г.

**Определение консистенции косвенным методом.** Как указывалось выше, в инженерно-геологической практике для оценки консистенции используется показатель текучести  $J_L$ , рассчитываемый по формуле  $J_L=(W-W_L)/J_P$ . В зависимости от величины  $J_L$  связные грунты

подразделяются в соответствии с классификацией СНиП II-15-74 на ряд групп по консистенции (табл. 1).

Таблица 1

Грунт	Форма консистенции	Показатель текучести
Супеси	Твердые	$J_L < 0$
	Пластичные	$0 < J_L < 1$
	Текущие	$J_L > 1$
Суглинки и глины	Твердые	$J_L < 0$
	Полутвердые	$0 < J_L < 0,25$
	Тугопластичные	$0,25 < J_L < 0,5$
	Мягкопластичные	$0,5 < J_L < 0,75$
	Текучепластичные	$0,75 < J_L < 1$
	Текущие	$J_L > 1$

Иногда для научных целей используют показатель консистенции:

$$M_L = (W_L - W) / J_p; M_L = 1 - J_L.$$

**Усовершенствованный стандартный метод определения верхнего предела plasticности по А. Ф. Бархатову.** А. Ф. Бархатов и Е. Н. Богданов [17] показали, что определение границы текучести стандартным методом имеет два существенных недостатка. Во-первых, определение погружения глубины конуса по риске «на глаз» влечет за собой погрешность из-за образования валика выпирания, в результате чего и проба на влажность берется при погружении конуса не на 10 мм, а в среднем при его погружении на 9,6 мм. Это снижает точность метода и вызывает необходимость установки измерительного устройства. Во-вторых, перед взятием пробы на влажность необходимо строго подобрать замес, соответствующий глубине погружения конуса 10 мм, что представляет собой довольно трудоемкую операцию.

Указанные авторы предложили на основе пенетрометра П. О. Бойченко использовать конус с углом при вершине  $30^\circ$  и массой 0,076 кг (соответствующей массе стандартного балансирующего конуса), оборудованный индикатором часового типа (рис. 3), что позволило резко увеличить точность определения глубины погружения конуса. Приведенные А. Ф. Бархатовым и Е. Н. Богдановым [17] результаты показали, что в пределах глубины погружения указанного конуса от 8 до 12 мм зависимость  $h=f(W)$  практически постоянная. При этом с

ростом числа пластичности (рис. 4) наклон этих участков прямой (от 8 до 12 мм) увеличивается, а отношение  $W_L/W_i$  изменяется от 1,06 (при  $h=8$  мм) до 0,96 (при  $h=12$  мм). При наличии уравнения прямой  $W_L/W_i=f(h)$  нет необходимости строгого подбора замеса, соответствующего глубине погружения конуса 10 мм, а достаточно приготовить один замес при глубине погружения конуса в пределах от 8 до 12 мм.

Измерив таким образом по индикатору с точностью до 0,01 мм глубину погружения конуса и определив по графику  $W_L/W_i=f(h)$ , показанному на рис. 4, соответствующий коэффициент, можно рассчитать значение

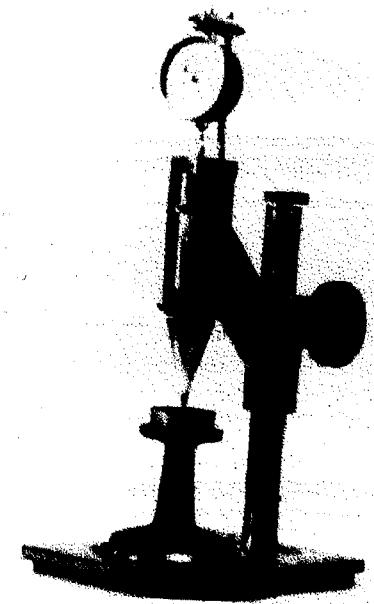


Рис. 3.

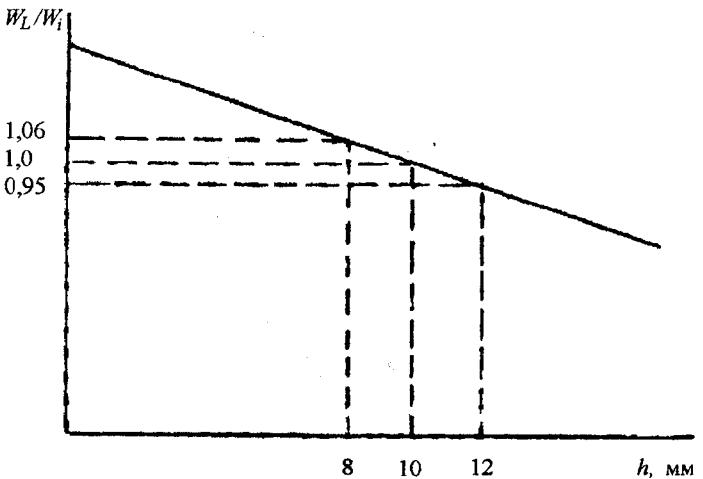


Рис. 4.

$W_L$ , умножив последний на влажность грунта при данной глубине погружения конуса.

### 7.2.2. Определение пластичности и консистенции по методу П. О. Бойченко

Определение пределов пластичности производится на пенетрометре конструкции П. О. Бойченко (рис. 5). Он состоит из основания (1) с прикрепленной к нему колонной (2), по которой перемещается кронштейн (3). В направляющих отверстиях кронштейна помещается стержень (4) со стальным конусом (5), поверхность которого тщательно отшлифована, и грузом (6). Угол при вершине конуса равен  $30^\circ$ , масса подвижной части системы 300 г. В исходном положении стержень удерживается защитной кнопкой (7). Глубина погружения конуса фиксируется по шкале и ионикусу с точностью до 0,1 мм. В начальном положении отсчет по шкале должен быть равен 0. Перед

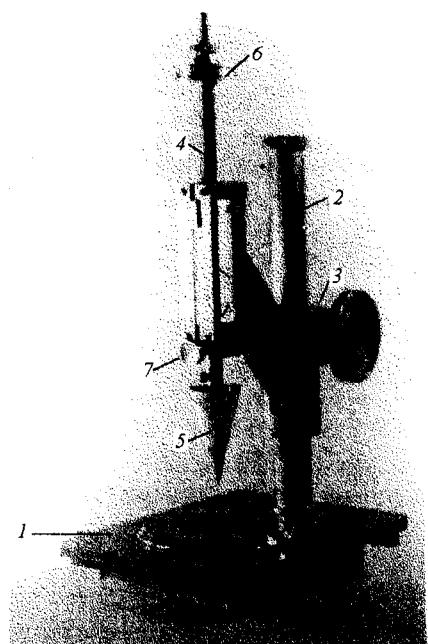


Рис. 5.

началом испытаний, а также после каждого определения глубины отпечатка конус необходимо вытирать насухо и по окончании работы поверхность его смазывать техническим вазелином.

Как показали исследования Бойченко [13], зависимость между глубиной погружения конуса  $h$  и влажностью  $W$  грунта, построенная в логарифмическом масштабе, близка к линейной в пределах изменения  $h$  от 3 до 40 мм. Характер кривой дает возможность находить численные значения пределов пластичности путем графической интерполяции и экстраполяции по определениям  $h$  и  $W$  в двух состояниях грунта при условии, что в одном случае  $h$  близко к 4 мм ( $W_p$ ), а во втором к 22,5 или 32 мм ( $W_L$ ). Таким образом, одну пенетрацию следует проводить при влажности грунта, соответствующей погружению конуса от 3 до 6 мм, а вторую соответственно при  $h$  от 18 до 28 мм или от 26 до 37 мм.

**Определение пластичности.** Для определения  $W_p$  лучше экспериментировать с грунтом в пластичном состоянии ( $h$  более 4 мм). При этой консистенции грунт легко формуется и требуется меньше времени для снижения его влажности, если это понадобится. Перед испытанием грунт помещают в обойму (кольцо) с внутренним диаметром 50 мм разной высоты: 20, 30, 40 и 50 мм.

Определение пределов пластичности следует проводить на образцах при влажности, близкой к естественной. Частицы крупнее 3 мм при их содержании более 5% необходимо удалить путем протирания грунтов через сито диаметром 3 мм. Если грунт находится в твердой или полутвердой консистенции, то его следует увлажнить до пластичной консистенции. Если грунт слишком влажный, то его слегка подсушивают путем перемятия руками или нарезав мелкими кусками и перемешивая в чашке. Влажность грунта должна быть близка к влажности раскатки. Приготовленный к опытам грунт помещают в обойму (кольцо) высотой 20 мм, установленную на стекле и слегка смазанную внутри вазелином. Грунт укладывается слоями с послойным трамбованием деревянным цилиндрическим стержнем. Кольцо заполняется до высоты на 1–2 мм ниже верхнего края и затем производится уплотнение грунта на винтовом прессе для обеспечения слипания отдельных комочек в монолитную массу. Перед уплотнением под кольцо с грунтом кладут кусок кальки или плотной бумаги, а нижняя часть штампа слегка смазывается вазелином, чтобы грунт не прилипал. Вращением рукоятки винта опускают штамп пресса на грунт, чтобы он прошел внутрь кольца. Вращают рукоятку пресса до

наступления механической текучести грунта, т. е. до момента выдавливания грунта через зазоры между штампом и кольцом или между кольцом и основанием пресса, а для легких грунтов — при появлении в зазорах воды, выжимаемой из грунта. После прессования срезают грунт с нижней стороны кольца вровень с краями, вставляют в кольцо выступ диска, проталкивают образец вверх на высоту выступа (5 мм) и срезают весь излишний грунт также вровень с краями, загладив после этого поверхность плоской стороной ножа.

Затем устанавливают кольцо вместе с диском на основание пенетрометра и подводят конус к поверхности грунта таким образом, чтобы его острие слегка касалось поверхности образца. При этом положении конуса закрепляют кронштейны на колонке, завинчивая его стопорный винт. Правильность положения конуса проверяется передвижением обоймы с грунтом по подставке пенетрометра: при точной установке острие конуса прочерчивает тонкую линию. Затем, резко нажимая на кнопку защелки, дают возможность конусу внедриться в грунт в течение 5 с, после чего кнопку отпускают. Отсчетом по шкале с конусом определяют глубину отпечатка конуса ( $h$ ) с точностью до 0,1 мм. При определении нижнего предела пластичности, т. е. при небольшой влажности грунта делают 3–5 контрольных измерений и за окончательный результат принимают среднее значение  $h$ , исключив случайные, главным образом заниженные величины, возможные при попадании конуса на отдельные крупные частицы. После пенетрации из обоймы отбирают в бокс пробу на влажность (лучше брать две параллельные пробы).

Для определения  $W_L$ , соответствующего этому показателю, определенному по ГОСТу, используют обоймы высотой 30 мм, так как при этой влажности глубина погружения конуса должна быть равна 22,5 мм.

Для определения  $W_L$  грунт требуется увлажнить, тщательно перемешать и уложить в кольцо, установленное на стеклянную или пластмассовую пластину по возможности более плотно и с некоторым избыtkом грунта, который затем снимается ножом. Уплотнение грунта под прессом не производится и диск не вставляется.

Вместе с пластинкой обойма переносится на основание пенетрометра и производится измерение глубины погружения конуса. Она должна находиться в пределах от 17 до 27 мм. Длительность погружения, в течение которого кнопка защелки нажата до отказа, 5 с. Затем из обоймы отбирается в бокс проба на влажность. Поскольку

глубина погружения конуса при  $W=W_L$  достаточно велика, то острие конуса устанавливается в центре обоймы и определяется глубина только одного отпечатка.

Верхний предел пластичности по Бойченко, соответствующий глубине погружения конуса 32 мм, определяется таким же образом, как и в предыдущем случае, но в более высоких кольцах — 40 мм. И здесь проводятся два испытания: первое при глубине от 27 до 32 мм и второе — после дополнительного увлажнения при  $h=32\text{--}37$  мм.

Величины  $W_p$  и  $W_L$  определяются путем графической интерполяции с точностью до 0,1–0,2%, поэтому масштаб графика должен быть достаточно большим. Полученные значения влажности  $W$  и глубин погружения конуса  $h$  наносят на график (рис. 6), проводят прямую, соединяющую эти точки, затем от оси абсцисс соответственно при  $h=4$  и 22,5 или 32 мм проводят линии до пересечения с этой прямой. Затем из точек пересечения проводят перпендикуляры к оси ординат и находят  $W_p$  и  $W_L$ .

Следует отметить, что достоинствами метода П. О. Бойченко помимо самого главного: оба предела пластичности определяются оди-

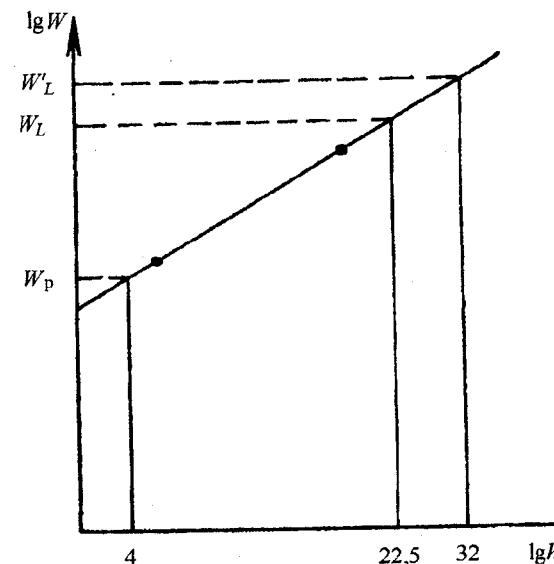


Рис. 6.

наково, являются также высокая точность, поскольку ошибки субъективного характера, как при раскатке, исключаются, и сохранение состава грунта при подготовке к анализу (так как удаляются только частицы крупнее 3 мм при значительном их содержании, а не крупнее 1 мм, как требует ГОСТ). Следует также отметить, что  $W_p$ , полученные по методу П. О. Бойченко, весьма близки к значениям  $W_p$  на границе раскатки в основном для среднего суглинка, а для легких суглинков и супесей  $W_p$ , как правило, меньше  $W_p$  раскатки, так как для последних глубина погружения конуса обычно превышает 4 мм, а для легких супесей может быть более 11 мм. Глины, наоборот, на границе раскатки имеют высокую прочность и  $h$  для них меньше 4 мм (2,6 мм). Поэтому  $W_p$  обычно больше, чем влажность на пределе раскатки.

**Определение консистенции.** Известно, что косвенный показатель консистенции — показатель текучести  $J_L$ , определяемый по соотношению между естественной влажностью и пределами пластичности, не учитывает влияния на прочность грунта структурных связей и пористости. Поэтому П. О. Бойченко предложил использовать для оценки консистенции метод пенетрации, являющийся прямым методом, позволяющим определить консистенцию грунта как с нарушенной, так и с ненарушенной структурой, по глубинам погружения конуса и коэффициенту консистенции  $C_B$ . Коэффициент консистенции  $C_B$  по численным значениям и физическому смыслу соответствует показателю текучести:  $J_L = (W - W_p)/J_p$ , где  $W$  — влажность грунта нарушенной структуры при его прочности, равной прочности грунта с естественной структурой (эквивалентная влажность по М. И. Гольдштейну). Изменение  $C_B$  в зависимости от погружения конуса приводится в табл. 2.

Таблица 2

$h$ , мм	$C_B$						
1	2	3	4	5	6	7	8
1,0	-0,27	6,0	0,15	11,0	0,48	20,0	0,90
1,2	-0,25	6,2	0,16	11,2	0,49	21,0	0,94
1,4	-0,23	6,4	0,18	11,4	0,51	22,0	0,98
1,6	-0,21	6,6	0,20	11,6	0,52	23,0	1,02
1,8	-0,19	6,8	0,21	11,8	0,53	24,0	1,06

1	2	3	4	5	6	7	8
2,0	-0,17	7,0	0,23	12,0	0,55	25,0	1,10
2,2	-0,16	7,2	0,24	12,2	0,56	26,0	1,13
2,4	-0,13	7,4	0,25	12,4	0,57	27,0	1,17
2,6	-0,12	7,6	0,27	12,6	0,58	28,0	1,20
2,8	-0,09	7,8	0,28	12,8	0,59	29,0	1,24
3,0	-0,08	8,0	0,29	13,0	0,60	30,0	1,27
3,2	-0,07	8,2	0,31	13,2	0,61	31,0	1,30
3,4	-0,05	8,4	0,32	13,4	0,62	32,0	1,33
3,6	-0,03	8,6	0,33	13,6	0,63	33,0	1,37
3,8	-0,01	8,8	0,35	13,8	0,64	34,0	1,40
4,0	0,00	9,0	0,36	14,0	0,65	35,0	1,44
4,2	0,01	9,2	0,37	14,2	0,66	36,0	1,47
4,4	0,03	9,4	0,39	14,4	0,67	37,0	1,50
4,6	0,05	9,6	0,40	14,6	0,69	38,0	1,59
4,8	0,07	9,8	0,41	14,8	0,70	39,0	1,59
5,0	0,08	10,0	0,43	15,0	0,71	40,0	1,61
5,2	0,09	10,2	0,44	16,0	0,74	41,0	1,64
5,6	0,12	10,6	0,46	18,0	0,82	43,0	1,70
5,8	0,13	10,8	0,47	19,0	0,86	44,0	1,73

Подразделение на подформы консистенции с учетом показателя  $C_B$  приведено в табл. 3.

Таблица 3

Форма	Подформа	$h$ , мм	$C_B$
Пластичная	Текущая	> 22,5	> 1
	Текущепластичная	16,2	0,75
	Очень мягкопластичная	11,3	0,50
	Мягкопластичная	7,4	0,25
	Тугопластичная	4	0
	Полутвердая	0,5	-0,33
Твердая	Твердая	< 0,5	< -0,33

В классификации СНиП (см. табл. 1) отсутствует очень мягкопластичная подформа консистенции, а для трех подформ значения  $J_L$  увеличиваются на 0,25 по сравнению со значениями табл. 3. Очевидно, что смещение подформ консистенции проведено с целью достижения соответствия наименований консистенции при их естественном состоянии со значениями показателя  $J_L$ . Для некоторых разновиднос-

тей грунтов это соответствие имеет место, но для грунтов, различных по генезису, составу и степени литификации, прочность структурных связей колеблется в широких пределах. Поэтому при нарушении структуры некоторые грунты почти не изменяют своей консистенции, у других же изменение консистенции может быть на несколько подформ.

Определение консистенции по П. О. Бойченко методом пенетрации производится следующим образом. При испытании консистенции грунтов конусом образец предварительно должен быть врезан в обойму. При этом недопустимо нарушение естественного сложения. Обоймы можно использовать те же, что и для определения пластичности (диск здесь не применяется). Образец зачищается бровень с краями с обеих сторон обоймы и устанавливается на стекле на основание пенетрометра, затем производится определение глубины погружения конуса вышеописанным способом. Если конус опускается на глубину < 15 мм, то с каждой стороны обоймы получают 3–4 отпечатка и затем находят среднюю глубину. Случайные величины, в основном заниженные, при этом исключаются. Для некоторых пластичных грунтов отмечаются случаи, когда заглубление конуса с течением времени после его внедрения в результате свободного падения становится весьма значительным. Для таких грунтов следует установить зависимость глубины отпечатка конуса от времени погружения в течение 3 мин. Кнопка при этих опытах должна быть все время нажата до упора. Если окажется, что глубины отпечатков конуса при отсчете через 5 с и 3 мин отличаются более чем на 10%, то для таких грунтов надо указывать глубину погружения конуса как при отсчете через 5 с, так и после практически полного затухания процесса заглубления в грунт конуса.

Консистенцию грунта можно определять также непосредственно в целых монолитах, отбираемых из буровых скважин. Испытание конусом при этом производят на боковой поверхности монолита, для чего снимают ножом по узкой полосе вдоль монолита парафиновую оболочку и верхний слой грунта примерно на глубину 5 мм. Если диаметр монолита больше высоты подъема конуса, то следует повернуть колонку пенетрометра на 180° и установить пенетрометр на ровную подставку, а монолиту придать устойчивость посредством двух тяжелых призм, подпирающих его с двух сторон, а для устойчивости пенетрометра уложить на его основание груз (плоские гири). Испытания конусом следует производить в различных местах мо-

нолита. При слоистой текстуре для каждого слоя устанавливается средняя глубина погружения по 2–4 опытам.

Для характеристики консистенции грунтов в нарушенном сложении при естественной влажности определение глубины погружения конуса производится с использованием обойм точно так же, как и при определении пределов пластичности. По полученным значениям глубин погружения конуса ( $h$ ) по табличным данным (см. табл. 2) устанавливают значения показателя консистенции  $C_v$ . Величины  $C_v$ , соответствующие промежуточным значениям  $h$ , находят по интерполяции с округлением до 0,1. Подформы консистенции в зависимости от коэффициента консистенции указаны в табл. 3.

### 7.2.3. Определение пластичности и консистенции по В. Ф. Разоренову

Способ В. Ф. Разоренова основан на следующих предпосыпках.

- Границы пластичности  $W_p$  и  $W$  определяются по результатам пенетрационных испытаний как минимум двух образцов при двух любых значениях влажности, находящихся примерно в интервале границ пластичности.
- Образцы испытываются в условиях, близких к полному водонасыщению  $S_r > 0,96–0,97$ .
- Значениям влажности на границах пластичной ( $W_p$ ) и текучей ( $W_L$ ) консистенций грунта соответствуют удельные сопротивления пенетрации, равные  $R_p=0,1863\text{МПа}$  и  $R=0,00745\text{МПа}$ , где  $R=P/h_2$  ( $P$  — нагрузка на конус,  $h$  — глубина погружения).
- В условиях полного водонасыщения грунта между влажностью ( $W$ ) и логарифмом удельного сопротивления пенетрации  $R$  наблюдается функциональная линейная зависимость. Поэтому в полулогарифмическом масштабе соответствующие графики изображаются прямыми. В водонасыщенных связных грунтах нарушенной структуры число пластичности  $J_p$  пропорционально тангенсу угла наклона построенной прямой к оси ординат и является мерой интенсивности изменения механических свойств грунта

$$J_p = 1,398 \frac{W_2 - W_1}{\lg R_1/R_2}.$$

С учетом вышеизложенного границы пластичности определяются графически следующим образом. По двум экспериментальным точкам  $W_1$  и  $R_1$  и  $W_2$  и  $R_2$  в координатах  $W-\lg R$  проводятся прямые

(рис. 7). Пересечение прямых с двумя горизонтальными линиями  $R=0,186\text{ МПа}$  и  $R=0,0075\text{ МПа}$  определяют две расчетные точки, абсциссы которых соответствуют границам пластичности и текучести.

Практически по аналогии с методикой сдвиговых испытаний, как правило, необходимо проводить испытания третьего контрольного образца, обеспечивающего возможность объективного контроля за точностью и достоверностью всех испытаний.

Как указывалось выше, В. Ф. Разоренов [16] подтвердил положение П. О. Бойченко о том, что все водонасыщенные грунты нарушенной структуры при одинаковом удельном сопротивлении пенетрации  $R$  имеют одну и ту же консистенцию. Для связных водонасыщенных грунтов нарушенной структуры между значениями показателей консистенции  $J_L$  и  $M_L$  и удельным сопротивлением пенетрации  $R$  была установлена логарифмическая связь

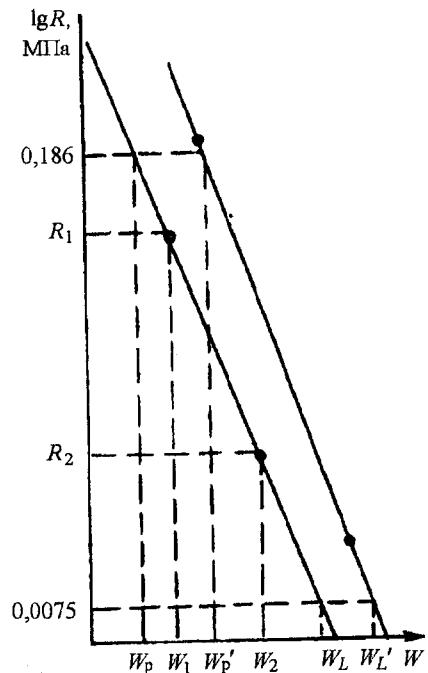


Рис. 7.

$$J_L = \frac{\lg R_p / R_0}{\lg R_p / R_L}, \quad M_L = \frac{\lg R / R_L}{\lg R_p / R_L}.$$

где  $R_0$ ,  $R_p$  и  $R_L$  — удельное сопротивление пенетрации грунта соответственно при исходной влажности, влажности нижнего и верхнего пределов пластичности.

В полулогарифмическом масштабе эта зависимость имеет прямолинейный характер. В работе П. О. Бойченко данная зависимость построена в обычном масштабе и носит криволинейный характер. Приняв граничные условия  $R=0,0075\text{ МПа}$  и  $R_p=0,186\text{ МПа}$ , В. Ф. Разоренов получил следующую аналитическую зависимость для водонасыщенных связных грунтов нарушенной структуры:  $M_L=1,522+0,715 \lg R_0$ .

Консистенцию связных грунтов по результатам пенетрации можно определить по данным табл. 4.

Таблица 4

Форма консистенции	$M_L$	$J_L$	$R$ , МПа
Твердая Полутвердая	> 1 0,75–1	< 0 0–0,25	> 0,186 0,083–0,186
Тугопластичная	0,50–0,75	0,25–0,5	0,30–0,083
Мягкопластичная	0,25–0,50	0,50–0,75	0,017–0,037
Текущепластичная	0–0,25	0,75–1	0,0075–0,017
Текучая	< 0	> 1	< 0,0075

Несомненным достоинством вышеприведенного уравнения является то, что с его помощью можно определить коэффициент консистенции грунтов нарушенной и ненарушенной структуры как в водонасыщенном, так и в трехфазном состоянии. Поэтому уравнение В. Ф. Разоренова можно использовать при определении консистенции связных грунтов с нарушенной структурой и для определения «эквивалентной консистенции» связных грунтов ненарушенного сложения. Этот прием был предложен М. И. Гольдштейном еще в 1940 г.

Таким образом, определение консистенции прямым методом по П. О. Бойченко и В. Ф. Разоренову позволяет оценить консистенцию естественных грунтов, в отличие от косвенных методов, не учиты-ва-

ющих влияние на прочность грунтов их структурных связей и пористости.

Методика пенетрационных испытаний, усовершенствованная Е. Н. Богдановым [15], сводится к следующему: 1) испытания проводятся ступенчато-возрастающей нагрузкой с уравновешенной подвижной системой; 2) величина ступени должна быть согласована с прочностью грунта и назначаться так, чтобы глубина погружения конуса с углом при вершине  $\alpha=30$  находилась в пределах от 1 до 3 мм, последующая ступень должна быть больше предыдущей в 1,2–1,5 раза (меньшие значения принимаются для грунтов твердой консистенции); 3) замеры глубины погружения конуса производятся через каждые 30 с при затухании скорости деформаций до 0,1 мм/мин; 4) испытание продолжается до получения  $R=\text{const}$  для 3–5 ступеней нагрузки, т. е. до достижения активной зоны ( $h_{\text{акт}}$ ), ниже которой устанавливается предельное равновесие и при дальнейшем погружении конуса идет многократно повторяющееся развитие фазы выпирания с соблюдением инвариантности  $R$ . Глубина  $h_{\text{акт}}$  для конуса 30° для грунтов текучей консистенции составляет 20 мм, для твердой — менее 12 мм; 5) габариты кольца с грунтом выбирают с учетом вероятного значения  $h_{\text{акт}}$ , но не менее 20 мм высотой. Между диаметром кольца ( $D$ ) и диаметром погруженной части конуса ( $d$ ) необходимо выполнять соотношение  $D/d > 3$ –7 при  $\alpha=30$ . Для проведения пенетрационных испытаний рекомендуется использовать пенетрометр конструкции Батурина—Богданова.

## 8. НАБУХАНИЕ ГРУНТОВ

Под набуханием понимается способность дисперсных грунтов увеличивать объем в процессе взаимодействия с водой и растворами.

Набухание глинистых грунтов происходит в результате расклинивающего действия сольватных оболочек связанный воды, образующихся при гидратации глинистых минералов и тонкодисперсных органогенных и органоминеральных частиц. Расклинивающему действию противостоят силы притяжения, обусловливающие структурное сцепление. В зависимости от типа структурных связей силы притяжения на контактах могут превышать расклинивающее давление или быть меньше его. В первом случае, когда расклинивающее действие полностью компенсируется силами притяжения, набухание глинистых

систем не происходит, а во втором — система стремится прийти в равновесное состояние путем увеличения расстояния между частицами, т. е. будет набухать. При этом в грунтовой системе развивается определенное давление, которое называется давлением набухания. Оно может быть обнаружено и измерено с помощью внешней нагрузки и будет равно той нагрузке, при которой увеличения объема грунта при гидратации наблюдать не будет.

В основе набухания лежит действие адсорбционных, осмотических и капиллярных сил, определяющих напряжение, с которым вода удерживается в структурированной системе. Наибольшую роль, по мнению многих исследователей, играют осмотические процессы, причиной которых является разница концентраций солей в поровом растворе и в воде, окружающей грунт. Если концентрация внешнего раствора меньше концентрации солей в поровом растворе, то происходит набухание грунта, если больше, то будет развиваться обратный процесс — осмотическая усадка. Роль этих явлений выражается по-разному, в зависимости от минерального состава глинистых грунтов и наиболее ярко — в монтмориллонитовых глинах. У каолинитовых глин, по данным Р. И. Злочевской и В. И. Дивиселовой, в процессе набухания имеют место как осмотические явления, так и капиллярное впитывание воды. Способность грунтов к набуханию характеризуется рядом показателей: 1) деформацией или степенью набухания ( $\delta$ , %), определяемой по относительному изменению объема или высоты при невозможности бокового расширения образца при набухании и выражаемой в процентах; оно определяется при свободном набухании грунта или под нагрузкой; 2) влажностью набухания ( $W_n$ , %), соответствующей такому состоянию грунта, при котором прекращается процесс поглощения жидкости; 3) давлением при набухании ( $P_n$ , МПа), которое развивается при невозможности объемных деформаций в процессе набухания. Если  $\delta < 4\%$  и  $P_n < 0,025$  МПа, то грунт классифицируют как ненабухающий, при  $\delta$  от 4 до 10% и  $P_n$  от 0,025 до 0,1 МПа — слабонабухающий,  $\delta=10$ –15% и  $P_n=0,1$ –0,25 МПа — средненабухающий и  $\delta > 15\%$  и  $P_n > 0,25$  МПа — сильнонабухающий.

Основными факторами, определяющими способность грунта к набуханию, являются: 1) химико-минеральный и гранулометрический составы; 2) структурно-текстурные особенности (в частности, характер структурных связей); 3) состав обменных катионов; 4) влажность и плотность; 5) химический состав и концентрация водного раствора,

взаимодействующего с грунтом; 6) величина внешнего давления на грунт.

Огромное влияние на набухание грунтов оказывает их минеральный состав и, в первую очередь, состав глинистых минералов. Минералы с подвижной кристаллической решеткой (например, монтмориллонит) имеют значительно большие показатели набухания по сравнению с минералами, обладающими жесткой кристаллической решеткой. С увеличением содержания глинистых и особенно коллоидных частиц в грунте набухание глинистых грунтов сильно возрастает.

Большое влияние на способность грунтов к набуханию оказывает состав обменных катионов, причем это влияние возрастает по мере увеличения емкости обмена. Влияние обменных катионов на набухание обусловлено соответствующим изменением дисперсности грунта благодаря различному количеству связанной воды, образующейся в диффузном слое мицеллы. Поэтому с уменьшением валентности обменных катионов способность грунта к набуханию возрастает и наибольшее набухание имеют тяжелые глины, содержащие в обменном комплексе одновалентные катионы.

Величина набухания сильно зависит от характера структурных связей. Исследования В. И. Осипова [7] показали, что глинистые грунты, обладающие наиболее слабыми (дальними коагуляционными) и наиболее прочными (фазовыми) контактами, практически не набухают. Породы с переходными контактами ионно-электростатической природы характеризуются максимальным набуханием. Наличие близких коагуляционных и смешанных (коагуляционных и фазовых) контактов обуславливает слабое и среднее набухание.

При нарушении структурных связей способность грунтов к набуханию возрастает. Наибольшее набухание в нарушенном сложении по сравнению с ненарушенным характерно для фазовых и смешанных (коагуляционных и фазовых) контактов, наименьшее — для близких коагуляционных и переходных контактов.

Величина набухания тесно связана с количеством поглощенной воды. С возрастанием начальной влажности грунта ее количество уменьшается и соответственно снижается степень набухания. С увеличением плотности слаболитифицированных глинистых грунтов способность к набуханию возрастает.

Набухание глинистых грунтов существенно зависит от состава и концентрации солей во внешнем растворе. Состав последнего опре-

деляет состав обменных катионов, а следовательно, и величину набухания. Рост концентрации электролита внешнего раствора приводит к уменьшению толщины диффузного слоя и количества связанной воды, а соответственно, и набухания. Наиболее резко снижается набухание с повышением концентрации солей у Na-монтмориллонитовых глин. При этом установлено, что максимум набухания отмечается при концентрациях раствора от 0,001 до 0,01 Н, а не в дистиллированной воде. Причиной этому, по мнению Р. И. Злочевской [5], может быть влияние небольшого количества анионов, поступающих из раствора электролита, которые ослабляют взаимодействие обменных катионов с поверхностью и увеличивают их диссоциацию. Кроме того, возможна частичная специфическая адсорбция анионов глиной, что способствует повышению заряда поверхности и увеличению количества противоионов. Наблюдается также явление замены обменных  $H^+$ -катионов, всегда в некотором количестве присутствующих в обменном комплексе грунтов и взаимодействующих с водой и растворами низких концентраций, на катионы раствора электролита, обладающие большей, чем  $H^+$ , степенью диссоциации.

Деформация набухания грунтов зависит от величины внешней пригрузки, действующей на грунт, снижаясь по мере роста нагрузки. Если величина внешней пригрузки равна или больше давления набухания, то деформация набухания не проявляется.

Проведенные в последние годы исследования и, в частности, работы Р. Э. Дацко [18] позволили дать классификацию процессов набухания, развивающихся в грунтах, в зависимости от начальной влажности и соотношения концентраций порового и внешнего растворов, а также для процессов набухания глинистых грунтов под действием промышленных стоков. Р. Э. Дацко показала, что последние вызывают так называемое химическое набухание, обусловленное разрушением алюмосиликатов и кристаллизацией солей алюминия, железа и кальция, как кристаллогидратов, что сопровождается развитием давления набухания, достигающего единиц мегапаскалей, что существенно превышает давление от сооружения и ведет к формированию трещин.

Как показали исследования Р. Э. Дацко [18], осмотическая усадка глинистого грунта за счет осмотического оттока воды начинается при концентрации фильтрующегося раствора, названного порогом осмотической усадки  $C_{п.о.у.}$ . Для NaCl была получена эмпирическая зависимость

$$C_{\text{п.о.у.}} = \frac{B\sqrt{M_c}}{W - W_p},$$

где  $M_c$  — содержание глинистой фракции в долях единицы,  $W$  — влажность грунта,  $W_p$  — нижний предел пластичности,  $B$  — эмпирический коэффициент в г/л, зависящий от минерального и гранулометрического состава (для гидрослюдистой глины  $B$  составляет 14–16, для суглинка — 10–12).

В глинистых породах с влажностью, близкой к  $W_p$ , осмотический отток влаги практически прекращается. Для электролитов с более высокой растворимостью ( $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ )  $C_{\text{п.о.у.}}$  уменьшается на 15–25%. Наряду с оттоком воды из породы идет диффузия солей в сторону уменьшения их концентрации, т. е. в грунт, согласно закону Фика. Наиболее активно эти процессы идут в породах с высокой влажностью, меньшее значение имеет содержание глинистой фракции. В породах с влажностью ниже  $W_p$  скорость диффузии резко снижается. На скорость процессов засоления влияют сорбционные процессы. С уплотнением пород и уменьшением содержания глинистой фракции сорбционная способность снижается и при  $W < W_p$  сорбция практически прекращается. Набухание глинистых пород наблюдается при концентрации фильтрующихся растворов  $C_\phi < C_{\text{п.о.у.}}$ . В зависимости от концентрации фильтрующегося  $C_\phi$  и порового  $C_{\text{п.}}$  растворов, естественной влажности  $W$  и влажности набухания  $W_{\text{наб}}$  Р. Э. Дацко [18] выделила пять типов набухания:

1. *Диффузионный тип набухания.* Он наблюдается для пород с  $W > W_{\text{наб}}$  и  $C_\phi > C_{\text{п.}}$ . Увеличение влажности идет за счет диффузии гидратированных ионов из внешнего раствора в поры глинистого грунта. Степень гидратации ионов зависит от их размера и валентности и возрастает с увеличением валентности и уменьшением ионного радиуса катионов. Набухание ( $\Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}}$ ) определяется количеством воды, поступившей вместе с ионами в породу ( $Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}}$ ) из внешнего раствора, и количеством воды, которое ушло из породы в процессе осмоса ( $Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}}$ )

$$\Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}}.$$

Концентрация раствора при  $Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}}$  отвечает порогу осмотической усадки глинистого грунта. Повышение концентрации внешнего раствора приводит к образованию солей в комплексной форме,

что снижает  $Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}}$  за счет уменьшения гидратированности диффундирующего вещества.

2. *Диффузионно-адсорбционный тип набухания.* Он характерен для глин, в которых  $W < W_{\text{наб}}$  при  $C_\phi > C_{\text{п.}}$ . Здесь уравнение баланса влаги имеет вид

$$\Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{адс}}^{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}},$$

где  $Q_{\text{адс}}^{\text{H}_2\text{O}}$  определяет адсорбционную способность грунта по отношению к воде. При влажности, близкой к пределу раскатки, значением  $Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}}$  можно пренебречь. Величина и давление набухания при  $C_\phi > C_{\text{п.}}$  возрастают в 1,4–2 раза.

3. *Адсорбционный тип набухания.* Он наблюдается для пород при  $C_\phi = C_{\text{п.}}$  и  $W < W_{\text{наб}}$ . Баланс влаги соответствует  $\Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{адс}}^{\text{H}_2\text{O}}$ .

4. *Осмотическо-адсорбционный тип набухания.* Он возникает при  $C_\phi < C_{\text{п.}}$  и  $W < W_{\text{наб}}$ . Уравнение баланса влаги будет следующим:

$$\Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{адс}}^{\text{H}_2\text{O}} + Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}}.$$

При осмотическом притоке влаги в породу одновременно идет диффузия гидратированных ионов во внешний раствор. Уменьшение содержания солей в породе вызывает диспергацию агрегатов, повышение удельной поверхности и соответственно увеличение адсорбционной способности грунта. Чем меньшей агрегирующей способностью обладает ион, тем легче идет его диффузия из породы. Диффузионный вынос солей зависит также от формы их присутствия в породе (ионная или комплексная). Отмечается рост величины и давления набухания на 40–60% по сравнению с набуханием при  $C_\phi = C_{\text{п.}}$ .

5. *Осмотический тип набухания.* Он реализуется при  $C_\phi < C_{\text{п.}}$  и  $W > W_{\text{наб}}$ . Здесь уравнение баланса влаги имеет вид

$$\Delta Q_{\text{наб}}^{\text{H}_2\text{O}} = Q_{\text{осм}}^{\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{диф}}^{\text{H}_2\text{O}}.$$

Особенности протекания процессов набухания в глинистых грунтах при действии кислот и щелочей, как показали исследования Р. Э. Дацко, определяются их влажностью и концентрацией растворов. На основании этих параметров она выделяет три типа набухания с учетом его химической природы.

1. *Диффузионно-химический тип набухания.* Он отмечается для растворов с pH 9–11 и pH 2–4 при  $W > W_{\text{наб}}$ .

2. Адсорбционно-химический тип набухания возникает при  $\text{pH}$  9–11 и  $\text{pH}$  2–4 при  $W < W_{\text{наб}}$ .

3. Химический тип набухания. Он реализуется при  $\text{pH} > 12$  и  $\text{pH} < 2$  при любой влажности.

Действие кислот на породы имеет в основном химический характер, причем изменение вещественного состава последней наблюдается уже при  $\text{pH} < 4$ . Менее активно взаимодействуют глинистые породы с растворами щелочей. При низких концентрациях изменение свойств грунтов определяется физико-химическими процессами, при средних идут одновременно с физико-химическими химические процессы и отмечаются максимальные значения давления набухания, и при высоких концентрациях идут в основном химические изменения, что влечет за собой преобразования не только глинистых минералов, но и кремнезема. Образование алюмосиликатов  $\text{Ca}$  и  $\text{Na}$  всегда сопровождается захватом молекул воды, вследствие чего их объем превышает объем первоначальных минералов, что приводит к растрескиванию уплотненных пород и их ослаблению. Для глин малой степени литификации формирование цементоподобных минералов сопровождается вытеснением воды из порового пространства, что способствует цементации и упрочнению этих пород.

Из наиболее известных методов определения величины и влажности набухания глинистых грунтов можно рекомендовать метод А. М. Васильева, который используется для испытания пород как естественного, так и нарушенного сложения и влажности. Набухание определяют с помощью прибора А. М. Васильева (рис. 8). Перед началом опыта необходимо измерить линейные параметры рабочего кольца прибора (диаметр  $d$  и высоту кольца  $h$  от края кольца до металлического штампа, на который надевается кольцо: эта высота в последующем будет характеризовать высоту образца исследуемого грунта) и массу кольца ( $g_1$ ). Далее из монолита грунта вырезают образец режущим краем кольца прибора и избыток грунта срезают. Затем с одной стороны в кольцо вводят металлический штамп, диаметр которого равен внутреннему диаметру кольца. Этим штампом вытесняют часть породы, которую срезают ножом вровень с торцевой частью кольца, после чего кольцо с грунтом взвешивают ( $g_2$ ). В ванночку прибора 2 устанавливают перфорированное донце 6, сверху укладывают один лист фильтровальной бумаги, ставят кольцо с грунтом 5 торцевой частью на донце, сверху укладывают еще один лист фильтровальной бумаги. Внутрь кольца вкладывают перфорирован-

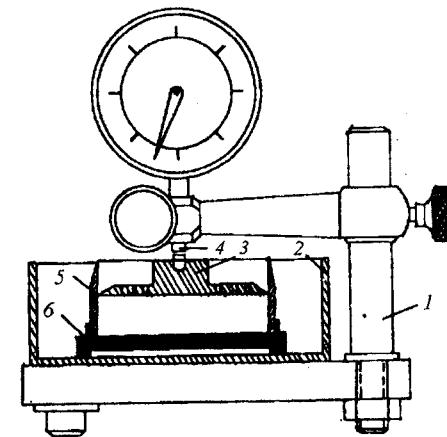


Рис. 8.

ный поршень 3. Ванночку устанавливают на штатив прибора 1, на котором закреплен индикатор часового типа 4. Индикатор на штативе с помощью кронштейна регулируют таким образом, чтобы его ножка опустилась на поршень прибора, и записывают начальный отсчет  $h$ . Этим заканчивается сборка прибора и подготовка грунта к испытанию.

В ванночку, где установлено кольцо с породой, заливают воду таким образом, чтобы избежать образования воздушного пузыря. Необходимо поддерживать постоянный уровень воды в ванночке в течение всего опыта. Отмечают время заливки воды в ванночку и следят за показаниями индикатора, записывая их через определенные интервалы времени (2–5–10–20–30 мин и далее через каждый час до конца рабочего дня, затем через сутки) до тех пор, пока набухание образца не прекратится (т. е. изменения показаний индикатора составят не более 0,02 мм за сутки). По окончании опыта кольцо с грунтом извлекают из прибора, взвешивают (масса  $g'_2$ ) и помещают в сушильный шкаф, где грунт высушивают до постоянной массы при  $t=105^\circ\text{C}$ . Охладив кольцо с породой в эксикаторе, его взвешивают, получают массу  $g_3$  и вычисляют начальную влажность ( $W_{\text{наб}}$ ) и влажность набухания по следующим формулам:

$$W_{\text{наб}} = \frac{g_2 - g_1}{g_3 - g_1}, \quad W_{\text{наб}} = \frac{g'_2 - g_3}{g_3 - g_1}.$$

Здесь  $g_1$  — масса кольца, г;  $g_2$  — масса кольца с грунтом, г;  $g'_2$  — масса кольца с грунтом после набухания, г;  $g_3$  — масса кольца с грунтом после высыхивания, г.

Величину набухания в каждый момент времени выражают обычно в долях единицы или в процентах от начального объема образца грунта по приращению высоты образца в результате набухания

$$\delta_{h_i} = \frac{\Delta h}{h_i},$$

Здесь  $\delta_{h_i}$  — относительная деформация набухания в каждый момент времени;  $\Delta h = h_i - h_0$  — абсолютная деформация, где  $h_i$  — отсчет по индикатору в каждый момент времени;  $h_0$  — начальный отсчет по индикатору;  $h$  — первоначальная высота образца грунта, см.

Величину набухания рассчитывают как

$$\delta_h = \frac{h_k - h_n}{h_n},$$

где  $h_k$  — высота образца грунта в кольце прибора после набухания, см;  $h_n$  — высота образца грунта в кольце прибора до увлажнения, см.

Развитие деформаций набухания во времени изображают в виде графика изменения величины набухания во времени.

## 9. УСАДКА ГРУНТОВ

Усадкой грунта называется уменьшение его объема в результате удаления воды при высыхании или при развитии физико-химических процессов (синерезис, осмос). В наибольшей степени усадка проявляется в глинах, другим же связанным грунтам она свойственна в меньшей степени. Необходимо отметить, что усадка — сложный физико-химический процесс, приводящий к изменению структурных связей между частицами.

Усадка глинистого водонасыщенного грунта протекает в три стадии: замедленная, нормальная и остаточная усадки (рис. 9).

На первой стадии (I) вода испаряется в основном из крупных пор, а общее уменьшение объема грунта меньше объема испарившейся воды. На второй стадии (II) уменьшение объема глинистого грунта максимально и примерно равно объему испарившейся воды. При

дальнейшем высыхании изменение объема значительно отстает от изменения объема испарившейся влаги — начинается стадия остаточной усадки (III), величина которой не превышает 2–3% от общей усадки. Эта стадия протекает различно у глин разной структуры и минерального состава. Для каолиновой глины характерно небольшое увеличение объема системы на третьей стадии (кривая I). Это связано с уменьшением сил, действующих на скелет. Для гидрослюдистой глины (кривая 3) характерно монотонное, очень небольшое по величине уменьшение объема на стадии остаточной усадки. Для монтмориллонитовой, а также галлуазитовой и пальгортитовой глины после завершения нормальной усадки наблюдается некоторое увеличение объема, а затем его уменьшение вплоть до достижения нулевой влажности (кривая 2). Подобное увеличение объема происходит тогда, когда в грунте остается гигроскопическая влага, которая характеризуется островным распределением на поверхности частиц и не может обеспечить равномерное покрытие их поверхности. Необходимо отметить, что граница между второй и третьей стадиями (условный предел усадки) в грунтах с преобладанием глинистых минералов с нераздвижной кристаллической решеткой находится между влажностями  $W_{mtc}$  и  $W_{mg}$ . Это свидетельствует о том, что такие грунты на стадии нормальной усадки теряют значительную часть капиллярной и большую часть осмотической воды.

Величину усадки грунта характеризуют по уменьшению линейных размеров или объема образца. В соответствии с этим различают относительную линейную ( $b_L$ ) и объемную ( $b_V$ ) усадки:

$$b_L = \frac{l_1 - l_2}{l_1}, \quad b_V = \frac{V_1 - V_2}{V_1}.$$

Здесь  $l_1$  и  $V_1$  — начальные длина и объем образца;  $l_2$  и  $V_2$  — длина и объем того же образца после усадки.

Величина относительной линейной и объемной усадок обычно выражается в процентах. Величина усадки грунтов зависит от их

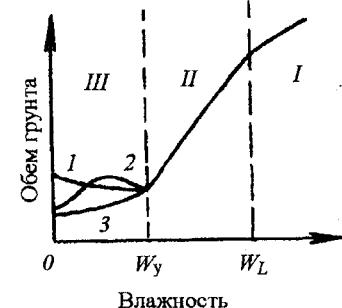


Рис. 9.

дисперсности, химико-минерального состава, влажности-пористости, структуры и текстуры. Наиболее ярко усадка выражена у глинистых пород. Ее величина зависит от содержания в грунте глинистых частиц; чем выше дисперсность у глинистых грунтов, тем больше усадка. Влияние минерального состава на усадку выражается через кристаллохимические особенности поверхности минеральных частиц и их кристаллическую структуру, а также через дисперсность и начальную плотность. Величина объемной усадки при прочих равных условиях будет наибольшей для монтмориллонитовых глин и наименьшей — для каолинитовых и гидрослюдистых. Влияние обменных катионов и концентрации солей в поровом растворе на величину усадки выражается через изменение толщины слоя связанный воды и начальную плотность (влажность). Монтмориллонитовые глины, насыщенные ионами Na или Li, обнаруживают наибольшую усадку, так как для них характерны высокая гидрофильность и начальная влажность. Для гидрослюдистых глин высокая усадка будет также характерна в случае обменного натрия; при наличии в обменном комплексе глин обменного K, Ca, а также трехвалентных катионов усадка будет меньше. Величина усадки глинистых грунтов также зависит от начальной пористости и влажности: чем выше начальная пористость (влажность), тем больше усадка.

Определение величины относительной линейной и объемной усадки, а также предела усадки ( $W_y$ ) производят на образцах грунтов естественного сложения и влажности.

Величину относительной линейной усадки определяют следующим образом. Перед вырезанием образца грунта из монолита естественного сложения и влажности производят измерение линейных параметров режущего кольца, а также взвешивают его. После этого вырезают образец грунта с параллельным отбором пробы для определения его начальной влажности; взвешивают кольцо с грунтом. На поверхности грунта штангенциркулем делают две перекрещивающиеся насечки с размерами  $l_1$  и  $l_2$ . Вырезанный образец грунта, не вынимая из кольца, высушивают на воздухе в течение 1–2 сут. По мере подсыхания образец дает усадку и отходит от стенок. При достижении этой стадии усадки образец грунта вынимают из кольца и продолжают сушить на воздухе 1 или 2 сут. Подсохший образец сушат в сушильном шкафу при  $t=105^{\circ}\text{C}$  до постоянной массы. В течение всего опыта производят периодическое взвешивание кольца с грунтом (а затем непосредственно самого образца грунта) с замерами штангенциркулем

размеров насечек на поверхности образца. Изменение влажности образца в каждый момент времени рассчитывается по формуле

$$W_i = \frac{g_{bi} - g_c}{g_c},$$

где  $g_{bi}$  — масса образца грунта в каждый момент времени;  $g_c$  — масса образца, высшенного в сушильном шкафу. Строят график зависимости изменения длины насечек от влажности в каждый момент времени.

Определение величины относительной объемной усадки аналогично ходу опыта по определению величины относительной линейной усадки, за исключением периодического взвешивания образца грунта и нанесения насечек на его поверхность. По достижении образцом грунта постоянной массы при его высушивании в сушильном шкафу определяют объем высшенного образца методом парафинирования. Затем вычисляют величину и влажность (предел) усадки

$$V_y = \frac{V - V_0}{V} \cdot 100\%,$$

где  $V_y$  — объемная усадка;  $V$  — объем режущего кольца;  $V_0$  — объем высшенного образца;

$$W_y = W_h - \frac{100 \cdot (V - V_0)}{g},$$

где  $W_y$  — предел усадки;  $W_h$  — начальная влажность породы;  $g$  — масса сухого образца породы после усадки.

По мнению В. Я. Калачева [19], процесс набухания и усадки следует рассматривать вместе как две стороны одного и того же процесса. Действительно, набухающие грунты легко представить как переуплотненные в результате усадки. Методически было бы правильно фиксировать изменение объема исследуемого образца и его влажности в любой момент времени без прекращения процесса набухания — усадки.

По предлагаемой В. Я. Калачевым методике образец помещается в водонепроницаемую оболочку, открытую с одной стороны, и устанавливается в закрытой капсуле этой стороной над пересыщенным раствором электролита, например, LiCl с известным значением относительного давления паров  $P_i/P_S$ . Изменяя вид электролита, а следовательно, регулируя  $P_i/P_S$ , можно контролировать любой режим

сушки, ускоряя его при  $P_i/P_S \sim 0$  либо замедляя при  $P_i/P_S=0,5-0,8$ . Фиксирование изменения объема образца ведется по градуированным капиллярам, сообщающимся с пространством между герметичной оболочкой, в которую помещен образец, и корпусом, заполненным контрольной жидкостью (водой). Самое незначительное изменение объема образца в процессе сушки вызывает перемещение мениска в оттариированном стеклянном капилляре. Подобным же образом контролируется и изменение влажности: испарившаяся из образца в процессе сушки вода конденсируется в пересыщенном растворе электролита, находящегося в нижней части корпуса, увеличивая его объем. Это увеличение также фиксируется с помощью оттариированного стеклянного капилляра. Зная начальную влажность образца и приращение объема электролита, можно рассчитать остаточную влажность образца в любой момент времени, а последующая графическая обработка изменения объема образца и его влажности позволяет точно выделить не только стадии, но и предел усадки.

По этой же методике довольно просто определить и набухание грунта. Разница состоит лишь в том, что пересыщенный электролит заменяется водой (поровым раствором), которая приводится в соприкосновение с образцом. В данном случае набухание идет без ограничения деформирования, а изменение объема образца, как и его влажности, определяется по той же системе градуированных капилляров. Эксперименты, проведенные по этой методике в МГУ, показали ее перспективность.

## 10. ЛИПКОСТЬ ГРУНТОВ

Под липкостью понимают способность грунтов при определенном содержании воды прилипать к поверхности различных предметов. Липкость наиболее характерна для связных глинистых и лесосовых пород, почв и т. д. Она проявляется при относительно небольших внешних нагрузках, действующих на предмет ( $0,1-0,5$  МПа) при влажности, близкой к нижнему пределу пластичности ( $W_p$ ). При дальнейшем увеличении влажности липкость резко возрастает и, достигнув максимума при влажности, близкой к полной влагоемкости, также резко уменьшается (рис. 10).

Количественной характеристикой липкости грунтов является усилие ( $\text{Н}/\text{см}^2$ ), требующееся для отрыва прилипшего предмета от грунта

при различной его влажности. Показателями липкости являются влажность начального прилипания ( $W_{\text{нач}}$ ), влажность максимального прилипания ( $W_{\text{макс}}$ ) и максимальное прилипание ( $\delta$ , см. рис. 10).

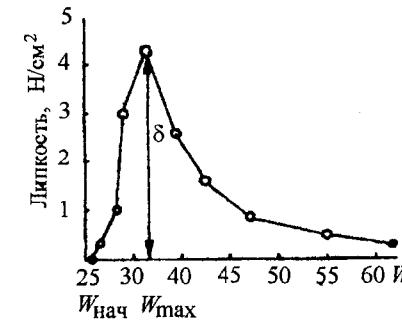


Рис. 10.

Поскольку липкость проявляется при влажности, близкой к  $W_p$ , то можно считать, что прилипание грунтов обусловлено содержанием в них рыхло связанный воды. Е. М. Сергеев [2] объясняет природу липкости следующим образом. При влажности ниже  $W_{\text{нач}}$  связанная вода удерживается со значительной силой вокруг частиц грунта и поэтому ее взаимодействие с другими телами крайне слабое. С увеличением влажности и толщины гидратных пленок создаются условия, при которых вода, обладая еще достаточной вязкостью, по периферийной части оболочек с одинаковой силой взаимодействует и с частицами и соприкасающимися с ними предметами. В этих условиях грунт обладает максимальным прилипанием. При дальнейшем увеличении влажности с телами взаимодействуют уже такие пленки воды, которые располагаются далеко от поверхности гравитационных частиц и испытывают слабое молекулярное притяжение со стороны частиц. Они обладают небольшой вязкостью. При этих условиях липкость грунта резко снижается.

Вышеуказанные закономерности характеризуют проявление липкости грунтов при относительно небольших значениях внешнего давления (от  $0,1$  до  $1$  МПа). Однако при возрастании внешнего давления влажности начала прилипания, как и максимальной липкости, снижаются. Причем в проявлении этого свойства начинают принимать участие энергетически более связанные категории воды. Исследования

Р. И. Злочевской [5] показали, что отмечаемый при  $W < W_p$  максимум прилипания наблюдается при небольших давлениях, являющихся недостаточными для максимального развития контактов между грунтом и штампом. Увеличение же внешнего давления до 5 МПа привело к резкому возрастанию липкости, а доведение его до 80 МПа позволило зафиксировать проявление липкости при  $W < W_{mg}$ . Это свидетельствует о том, что вода полимолекулярной адсорбции обладает способностью взаимодействовать с посторонними предметами. Сколько-нибудь заметная липкость отсутствует лишь при влажности, близкой к гигроскопической ( $W_g$ ) при внешнем давлении в несколько сотен мегапаскалей. Очевидно, при этой влажности молекулы воды настолько связаны с поверхностью глинистых минералов и ионов, что не могут смачивать другие тела, а поэтому липкость отсутствует. Исходя из этого, Р. И. Злочевская считает, что липкость грунтов следует рассматривать как функцию их влажности и величины внешнего давления, прижимающего предмет к грунту. По ее мнению, проявление липкости глинистых грунтов по мере увеличения их влажности состоит в следующем. На первой стадии гидратации молекулы воды прочно адсорбируются поверхностью глинистых минералов и поэтому при соприкосновении такой системы с посторонним предметом не в состоянии смачивать его. При увеличении влажности ( $W > W_g$ ) в грунтах появляется связанный вода полислойной адсорбции, которая, очевидно, при возрастании внешнего давления до нескольких десятков мегапаскалей (в местах контакта частиц) переходит в менее связанную воду, способную взаимодействовать с посторонними телами, что приводит к появлению липкости.

При дальнейшем увлажнении ( $W > W_{mg}$ ) грунта происходит значительное улучшение условий контакта. Здесь уже в полной мере проявляется когезионный тип отрыва, что указывает на взаимосвязь липкости и сцепления. При достижении  $W = W_{mmc}$  сцепление грунта возрастает из-за наиболее полного развития капиллярных сил. Это ведет к значительному возрастанию липкости, так как влажность грунта соответствует наибольшему развитию капиллярных менисков в порах грунта и в местах контакта штампа с грунтом. Суммарный эффект капиллярного «поднятия», возросшая площадь контакта штампа с грунтом и наличие в грунте, наряду с водой, полимолекулярной адсорбции, капиллярной и осмотической влаги обуславливает наибольшее значение липкости при этой влажности.

При последующем увеличении влажности ( $W_p > W_{mmc}$ ) липкость грунтов интенсивно падает, что объясняется уменьшением количества

капиллярных менисков в результате заполнения капилляров поровым раствором и перехода грунтов из трехфазного в двухфазное состояние. При повышении влажности ( $W > W_p$ ) идет дальнейшее снижение липкости, связанное с увеличением ионно-электростатического отталкивания развивающихся диффузных слоев и практически полным исчезновением капиллярной составляющей. Адгезия грунтов текучей консистенции весьма мала и определяется когезией грунтовой суспензии.

Липкость грунтов зависит от целого ряда факторов. Помимо вышеизложенной зависимости от внешнего прижимающего давления, на нее оказывают влияние химико-минеральный и гранулометрический составы грунта, состав обменных катионов, концентрация электролита порового раствора, структурные особенности, физическое состояние (плотность, влажность) и материал, из которого состоит прижимающий предмет. Воздействие минерального состава проявляется через изменение дисперсности и гидрофильтрости грунта. При прочих равных условиях монтмориллонитовые глины обладают примерно в два раза большей липкостью, чем гидрослюдистые. Липкость также сильно зависит от гранулометрического состава. Установлено, что липкость фракции  $< 1 \text{ мм}$  в 10–20 раз больше, чем фракции 5–10 мм. Липкость песков и супесей ничтожна по сравнению с липкостью глин.

В зависимости от состава обменных катионов липкость возрастает по ряду:  $\text{Na} > \text{NH} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{H} > \text{Fe} > \text{Al}$ , т. е. изменение липкости здесь соответствует изменению дисперсности и содержанию слабосвязанной воды. Высокая липкость солонцов связана с большим содержанием  $\text{Na}$  в обменном комплексе. Понижающее влияние на величину липкости обменного  $\text{Ca}$  может компенсироваться наличием значительного количества органического вещества, которое сильно повышает липкость, что характерно для чернозема, отличающегося большой липкостью, несмотря на значительное количество  $\text{Ca}$  в обменном комплексе.

Грунты с не нарушенной структурой всегда обладают меньшей липкостью по сравнению с грунтами нарушенного сложения. Липкость изменяется в зависимости от состава и концентрации солей в жидкой компоненте грунта. Содержание в воде коагулирующих веществ и веществ с положительной адсорбцией приводит к уменьшению липкости, при отрицательной адсорбции липкость увеличивается.

Зависимость липкости от концентрации электролита носит экстремальный характер. Для каолинита максимальная липкость наблю-

дается при концентрации 0,1–0,5 н солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{FeCl}_2$ ; для монтмориллонита при концентрации 0,05–0,1 н для  $\text{NaCl}$  и  $\text{CaCl}_2$  и при 0,001–0,01 н для  $\text{FeCl}_2$ . При повышении концентрации электролита в вышеуказанных пределах липкость значительно уменьшается.

На величину липкости грунтов с нарушенным сложением существенное влияние оказывает время действия нагрузки на штамп, причем влияние этого фактора различно для грунтов разного минерального состава. Так, для каолинита характерный участок перегиба на кривой липкости соответствует 3–5 мин, а для монтмориллонита — 30–40 мин. При более длительном времени действия нагрузки на штамп происходит уплотнение грунта и отжатие свободной и части рыхлосвязанной воды. В процессе уплотнения через определенное время, соответствующее участку перегиба на кривой динамики липкости, грунт приобретает новую структуру и в дальнейшем плотность–влажность грунта изменяется мало, также как и его липкость. С уменьшением скорости отрыва штампа на грунт липкость падает, при этом достаточно значительно для грунтов мягко- и текучепластичной консистенции, и почти не проявляется при влажности, близкой к пределу раскатки. При повышении температуры липкость грунтов снижается.

Величина липкости зависит от того, к какому предмету прилипает грунт (металл, резина, кожа, дерево и т. д.). Установлено, что глинистые грунты сильнее прилипают к дереву, чем к железу, а песчаные и торфяные, наоборот, к металлам. Причина этого не ясна, но можно предположить, что это связано с особенностями минерального состава и структурой поверхности взаимодействующего с грунтом предмета.

Определение липкости глинистых грунтов производится на модернизированном приборе В. В. Охотина, электрическая схема которого приведена на рис. 11.

Прибор представляет собой панель, на которой устанавливается рама из двух стоек с перекладиной. На раме смонтирован блок, через блок перекинута струна, на одном конце которой подвешивают штамп площадью 8,5  $\text{cm}^2$ , а другой конец присоединен к амперметру. На панели под штампом устанавливается формочка для исследуемого грунта. Переменное напряжение 220 В с частотой 50 Гц поступает на силовой трансформатор (Тр). С его вторичной обмотки снимается напряжение переменного тока и поступает на выпрямитель, собранный на диоде  $D$  и конденсаторе  $C$ . Напряжение постоянного тока величиной 15 В с выхода выпрямителя подается на потенциометр  $R_1$ .

Транзистор  $T$  вместе с резистором  $R_2$  образует управляемый источник тока, величина которого регулируется движком потенциометра  $R_1$ , как показано на рисунке. В цепь источника тока включен дроссель  $D\Gamma$ , выполняющий роль электромагнита. Усилие вытягивания сердечника в электромагните определяется величиной протекающего через него тока  $I$ , который регулируется потенциометром  $R_1$ . В опыте регистрируется усилие отрыва штампа от образца грунта, замеряемое амперметром  $A$ .

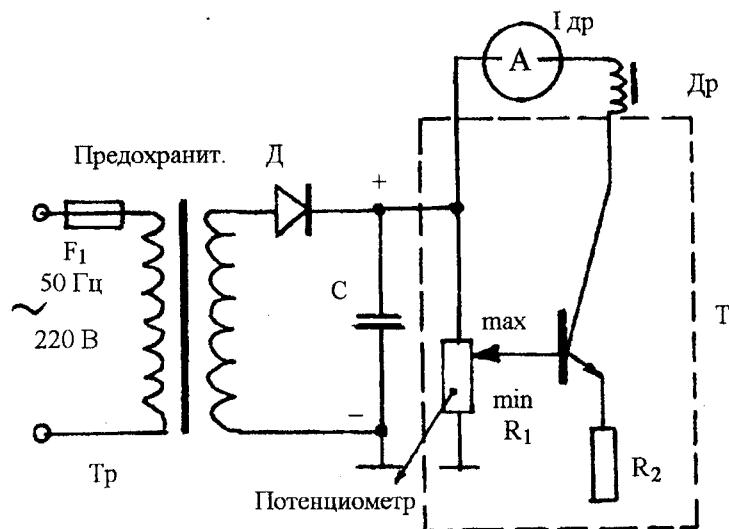


Рис. 11.

Определение липкости проводится для грунтов нарушенного сложения.

При испытании грунтов нарушенного сложения воздушно-сухую пробу растирают в фарфоровой ступке и просеивают через сито с отверстиями 2 мм. Из просеянной части пробы отбирают навеску, равную 100 г, и увлажняют ее до получения влажности, примерно равной влажности нижнего предела пластичности ( $W_p$ ). После этого часть грунта отбирают в формочку, вводят в формочку штамп и на эту систему под прессом подают определенное прижимающее давле-

ние. Следует заметить, что при определении липкости грунтов необходимо правильно и обоснованно выбрать величину предварительной прижимающей нагрузки, поскольку последняя в значительной степени зависит от характера воздействия на грунт различных механизмов. Выбирать ее для каждого конкретного случая следует в соответствии с табл. 5.

Таблица 5

Прижим. нагрузка, МПа	Время действия, с	Материал штампа	Температура испытаний	Работа
0,01–0,2	3–5	Сталь	Температура грунта в массиве	Экскавация грунта
0,05–0,3	До 600	Сталь	То же	Разработка грунта и транспортировка скреперами
0,01–0,1	До 3600	Сталь	Температура воздуха	Транспортировка грунта автосамосвалами
0,005–0,02	До 600	Резина	То же	Транспортировка грунта конвейерными лентами
0,01–0,1	> 3600	Сталь	"	Транспортировка грунта в ж/д вагонах
0,01–0,05	До 60	Сталь	Температура грунта в массиве	Погружение грунта автопогрузчиками
0,1–1 0,05–0,3	3–5	Резина, сталь	То же	Движение колесных и гусеничных транспортных средств

По окончании прессования проводят испытание на липкость на описанном выше приборе. В момент, когда произошел отрыв грунта от штампа, из формочки отбирают пробу на влажность и определяют ее значение по известному способу. Испытания проводят при последовательном увеличении влажности ( $\approx$  по 3 мл  $H_2O$  на каждый опыт) данной пасты до тех пор, пока отрывающее усилие не достигнет максимума и при последующих испытаниях произойдет уменьшение отрывающего усилия. Сила липкости  $F_l$  определяется исходя из того, что цена деления на шкале амперметра соответствует определенной нагрузке ( $g/cm^2$ ), которая измеряется перед испытанием при проведении тарирования прибора.

По результатам испытаний строится график зависимости силы липкости  $F_l$  ( $N/cm^2$ ) от влажности  $W$  (%), по которому находят максимальную величину липкости  $F_{l \max}$  ( $N/cm^2$ ), влажность начального прилипания  $W_{\text{нач}}$  (%) и влажность максимального прилипания  $W_{\max}$  (%).

В МГУ в сотрудничестве с ПНИИСом разработан весьма эффективный и надежный метод определения липкости (В. Я. Калачев, Б. Г. Трофимов [20]) на приборе УИЛ-2, предназначенный для грунтов с естественной и нарушенной структурой. Прижимающая нагрузка и сила прилипания устанавливаются по величине силы тока в цепи по показаниям миллиамперметра. Плавное изменение тока в цепи осуществляется двумя ползунковыми реостатами. Указанный прибор, помимо вышеуказанных трех показателей липкости грунта, определяет четвертый показатель — максимальную липкость при естественной структуре грунта.

Как было отмечено выше, важным моментом при определении липкости грунтов является правильный выбор величины предварительной прижимающей нагрузки, так как последняя в значительной мере обусловливает значение липкости. Прижимающее давление зависит от характера воздействия на грунт. Давление колеса, гусеницы транспортного средства на грунт, давление на ленту транспортера, на кузов автосамосвала и т. д. может изменяться от 0,1 до 1 МПа. Выбрать ее для каждого конкретного случая следует в соответствии с табл. 5.

Установлено, что чем выше скорость отрыва штампа от грунта, тем больше липкость. В то же время, в большинстве случаев проявления липкости в практике земляных работ скорость отрыва рабочих органов транспортных и землеройных машин и механизмов примерно одинакова и составляет несколько секунд, что позволяет определить

ее как практически мгновенную и рекомендовать для практического применения.

Рекомендуется проводить изучение липкости грунтов в лабораторных условиях при температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Если температура разрабатываемого грунта приближается к  $0^\circ\text{C}$ , то результаты лабораторного определения липкости следует увеличить на 20%. На основании гиперболической зависимости влажности максимального прилипания ( $W_{\max}$ ) от величины прижимающей нагрузки ( $P$ ) авторы предложили расчетный метод определения влажности максимального прилипания по формуле

$$W_{\max} = \frac{5 + PW_{mmc}}{P} K.$$

Здесь  $W_{mmc}$  — максимальная молекулярная влагоемкость, %,  $K$  — коэффициент, зависящий от гидрофильтрости грунта, который рассчитывается по формуле  $K=1+0,2 W_g / B$ , где  $W_g$  — гигроскопическая влажность грунта, %,  $B$  — показатель, равный 1 для значений  $P$  от 0,1 до  $1 \text{ Н}/\text{м}^2$  или равный величине  $P$ , имеющей значение больше  $1 \text{ Н}/\text{м}^2$ .

При определении липкости грунтов естественного сложения изменение их влажности следует проводить способом последовательного увеличения содержания в них воды. Для этого, определив липкость при естественной влажности, следует прилить на поверхность грунта 5 мл воды, после чего, выдержав в эксикаторе с водой в течение 2 ч, найти липкость и взять контрольную пробу на влажность. И так вплоть до получения перегиба на кривой липкость — влажность.

## 11. РАЗМОКАНИЕ ГРУНТОВ

Под размокаемостью понимается способность грунтов терять связность и превращаться в рыхлую массу с полной потерей прочности при взаимодействии со спокойной водой. Это явление — следствие ослабления структурных связей между элементарными частицами или агрегатами грунта в процессе их гидратации. Способностью к размоканию обладают дисперсные грунты, а также слабосцепментированные осадочные породы с растворимым или глинистым цементом.

Для характеристики размокаемости грунтов обычно используют два показателя: 1) время размокания — время, в течение которого

образец грунта, помещенный в воду, распадается на структурные элементы разного размера; 2) характер размокания, дающий качественную картину процесса. Эти показатели определяются химико-минеральным составом грунтов, структурными особенностями, влажностью, составом и концентрацией взаимодействующего с грунтом водного раствора. На скорость и характер размокания дисперсных грунтов большое влияние оказывает гранулометрический состав. Так, на основании работ В. В. Охотина (1933), проводившего изучение скорости размокания в воде воздушно-сухих искусственно приготовленных путем смешения различных гранулометрических фракций образцов грунтов, можно сделать следующие выводы. Водопрочность легких суглинков в спокойной воде ничтожна. Размокаемость средних суглинков зависит от величины и характера их пор: при малой пористости размокаемость снижается с повышением содержания глинистых частиц, при большой же пористости средних суглинков она значительная независимо от содержания в них глинистых частиц. Размокаемость тяжелых суглинков зависит от содержания в них глинистых частиц: с увеличением их количества она возрастает. У глин с большой пористостью наблюдается такая же закономерность, а у глин с малой пористостью величина водопрочности приближается к максимальному значению для грунтов данного типа. Весьма значительная скорость размокания характерна для лессовидных суглинков и особенно для лессов. Большое влияние на размокаемость связных грунтов оказывает величина исходной влажности, при которой грунты вступают во взаимодействие с водой. Так, сухие грунты или грунты с незначительной влажностью, как правило, размокают значительно быстрее, чем водонасыщенные.

Скорость и характер размокания связных грунтов существенно зависят от состава обменных катионов. В работах В. С. Шарова (1948) образцы глин, насыщенные различными катионами, размокали не одинаково в зависимости от того, во влажном или сухом состоянии они попадали в воду. Так, влажные образцы исследованных глин, насыщенных  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , сначала набухали, а затем размывались в суспензию. Образцы, содержащие  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , в зависимости от состава грунта вели себя по-разному: одни из них незначительно набухали и осыпались с поверхности, другие распадались на чешуйки, третьи покрывались трещинами. Во всех случаях более устойчивыми были образцы, насыщенные  $\text{Ca}^{2+}$ . Образцы глин, насыщенные  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , остались целы.

Сухие образцы, насыщенные  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  и помещенные в воду, распадались на чешуйки разных размеров и в порошок в течение 2–15 мин. Na-образцы набухали и расплывались в суспензию, а K-образцы сначала распадались на отдельности, которые потом расплывались в суспензию. Ряд других исследований также показывает, что при постепенной гидратации и водонасыщенности грунты проявляют большую водопрочность, чем при быстром развитии этих процессов.

Определение скорости и характера размокания глинистых грунтов производится следующим образом: из монолита грунта вырезают 2 образца кубической формы размером  $2 \times 2 \times 2$  или  $5 \times 5 \times 5$  см. Одновременно из монолита отбирают пробу для определения естественной влажности грунта. Вырезанные образцы помещают в кристаллизатор с водой и записывают время и дату начала испытания. Воду при испытаниях применяют дистиллированную или близкую по составу к той, воздействию которой порода будет подвергаться в природных условиях. Помещенные в воду образцы начинают размокать. Все изменения образцов пород, наблюдающиеся в процессе размокания, фиксируют в начале через интервал 5–10 мин, затем через 30 мин, 1 ч и т. д. По мере замедления изменения состояния образцов интервалы между наблюдениями увеличивают до 1 раза в сутки. Общая продолжительность наблюдений иногда достигает 10–15 сут. Опыт считается законченным, когда образец грунта размокнет или когда процесс размокания приостановится и образец сохраняет свое состояние без изменений продолжительное время. Результаты опыта выражают в виде времени, требующегося для полного размокания образца породы, и дают описание характера размокания.

## 12. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПЛАСТИЧНОСТИ И КОНСИСТЕНЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ

Методы лабораторных исследований свойств грунтов изложены в соответствующих пособиях, учебниках и нормативных документах, в них связь между отдельными показателями свойств выражается математическими зависимостями. Меньше работ, изучающих закономерности между свойствами, — чаще между физическими и механическими свойствами, реже между физическими. И это при том, что

физические свойства, отражая состав и состояние грунтов, определяют механическое поведение последних.

Состав, содержание пылевато-глинистой фракции связных грунтов наиболее просто принято характеризовать числом пластичности, а вместе с ним значениями влажности на границах текучести и скатывания (пластичности).

Известны многочисленные исследования, направленные на установление зависимости предела пластичности  $W_p$  от предела текучести  $W_L$  либо в виде одночлена  $W_p = aW_L$  с переменным угловым коэффициентом 0,75 (для супесей) до 0,55 (для глин), либо в виде двучлена  $W_p = aW_L + b$ , в котором по обобщениям разных авторов угловой коэффициент изменяется в диапазоне от 0,11 до 0,68, а свободный член от 0,17 до 0,03 при сохранении общей закономерности: большему угловому коэффициенту соответствует меньший свободный член. Все обилие выражений для линейной зависимости пределов пластичности отчетливо подразделяется на три группы со следующими осредненными параметрами:  $a_1=0,475$ ,  $b_1=0,039$ ;  $a_2=0,350$ ,  $b_2=0,085$ ;  $a_3=0,230$ ,  $b_3=0,140$ . Существенные различия по этим уравнениям в оценке супесей с малым числом пластичности, но незначительны для суглинков и глин с  $J_p$  до 25%.

Кажутся очевидными причины, по которым зависимость между пределами пластичности не должна быть единственной для всех грунтов. Это генетические особенности, минеральный и гранулометрический составы грунтов, но, прежде всего, погрешности, с которыми определяются пределы пластичности по применяемым методам, усиливающиеся погрешностями при определении влажности на каждом из пределов. Именно наличие погрешностей, часто значительных и зависящих от исполнителя, позволяет многим исследователям склоняться к наличию единой зависимости между пределами пластичности, тем более что для грунтов с резко выраженными отличиями по генезису и составу были получены близкие уравнения регрессии.

Чтобы повысить значимость пределов пластичности в качестве классификационных показателей глинистых грунтов, необходимы разработка единого подхода к определению этих характеристик и присвоение им более строгого физического смысла, для чего в настоящее время есть все предпосылки.

Так, существуют предложения по распространению метода пенетрации и на предел пластичности [14–17] и на способ обработки результатов пенетрационных испытаний грунта в широком диапазоне

изменения влажности, в том числе за пределами пластичности. Способ заключается в использовании логарифмической шкалы для величины удельного сопротивления пенетрации. Способ позволяет установить предел текучести и предел пластичности по точкам перегиба трех сопрягаемых прямых, что свидетельствует о значительном изменении физико-механических свойств и в целом поведения грунта за этими точками [21].

По данным Е. Н. Богданова между пределом текучести по ГОСТ 5180-84 и близкой к нему влажностью на точке перегиба ( $W'_L$ ) существует связь  $W'_L = (1,05 \pm 1,10) W_L$ .

Ранее многие исследователи указывали на условность и неопределенность пределов пластичности, примитивность метода определения предела пластичности и несоответствие предела текучести по ГОСТ представлению о переходе грунта от пластичного состояния к текучему. Так, П. О. Бойченко утверждал, что влажность на пределе текучести должна отвечать глубине погружения конуса (масса 300 г, угол при вершине 30°), равной 32 мм против 22,5 мм с учетом действующего ГОСТа, а  $W'_L = 1,14 W_L$ . Интересно сравнение предела текучести LL по американскому стандарту D 423-66 и ГОСТ 5180-84.  $LL = 1,25 W_L - 0,046$ . Из уравнения, действительного для  $W_L$  более 0,17, следуют те же 5–15% занижения предела текучести по ГОСТ. Можно предположить, что стандарт США полнее отражает физическую сущность предела текучести.

Е. Н. Богдановым [17] было показано, что за пределом текучести конуса с разными углами при вершине под воздействием равной нагрузки имеют одинаковый объем погруженной части (условие  $v=const$ ), тогда как при  $W < W_L$  это условие нарушается.

Меньше известно о пределе пластичности  $W_p$ . Использование для определения  $W_p$  пенетрационного метода основано на выборе глубины погружения конуса постоянной массы или постоянного удельного сопротивления пенетрации, соответствующим влажности и плотности грунта на границе раскатывания. Так, получилось, что для конуса массой 300 г предел пластичности достигается при глубине погружения 4 мм, для конуса массой 76 г — 1,2–1,5 мм, удельное сопротивление пенетрации 0,18–0,20 МПа. Так ли это, можно установить лишь по результатам пенетрационных испытаний глинистых грунтов в широком диапазоне влажности, включая и  $W > W_L$ .

По данным Е. Н. Богданова, обобщающим многие тысячи лабораторных исследований грунтов региона Санкт-Петербурга, зависи-

мость между пределами пластичности носит нелинейный характер и описывается степенной функцией  $W_p = 0,55 W_L^{0,80}$  и  $W_L = 2,13 W_p^{1,25}$ , которая в логарифмическом масштабе выражается прямой линией. Зависимость установлена для супесей, суглинков и глин с пределами текучести от 0,12 до 0,50 различного генезиса — озерно-ледниковых, ледниковых, кембрийских с преобладанием в составе глинистой фракции гидрослюдистых минералов. Тем не менее, приведенная зависимость не противоречит рассмотренным ранее линейным уравнениям и находит подтверждение фактическими материалами на грунтах из многих отдаленных регионов, которые приводятся в литературных источниках, причем в значительно более широком диапазоне  $W_L$  — до 1,0 и более.

Состояние глинистых грунтов принято характеризовать показателем текучести  $J_L$  (ранее показателем консистенции, т. е. подвижности грунта, что более соответствовало сущности данного понятия).

Для простоты расчета показателя текучести по влажности и пределам пластичности можно использовать номограмму. На оси абсцисс помимо  $W_p$  откладывается  $W_e$ . Тогда при  $W_e = W_p$  зависимость сводится к  $W_p = f(W_L)$ , на которой  $J_L = 0$ . На прямой, проведенной на графике под углом 45°,  $W_e = W_L$ , а  $J_L = 1$ . В промежутке между этими прямыми проведены лучи с  $J_L$  от 0 до 1, за пределами прямых — с  $J_L$  меньше 0 и больше 1. Номограмма позволяет решать как прямую, так и обратную задачу: по известным  $W_e$  и  $J_L$  восстановить пределы пластичности и тип глинистого грунта, а кроме того, явиться отправным источником для сопоставления с получаемыми опытным путем влажностями на пределах пластичности для грунтов различного происхождения и состава и быть наглядным графиком распределения по влажности, пределам и показателю текучести для конкретного типа грунта.

Показатель текучести в современных строительных нормативных документах отведена важнейшая роль в оценке несущей способности грунтов (СНиП 2.02.01-83) и несущей способности свай (СНиП 2.02.03-85). Величина  $J_L$  или даже интервал показателя текучести, в который попадает конкретная величина  $J_L$ , используется для ввода в таблицы и назначения механических свойств грунтов ( $\phi$ ,  $c$ ,  $E$ ) или расчетных сопротивлений свай. Между тем, не одно десятилетие зреет понимание того, сколь несовершенен показатель текучести как характеристики соотношения грунта и что необходим отказ от его применения. С такой оценкой нельзя не согласиться.

Показатель текучести определяется с высокой погрешностью, что предопределено структурой формулы и небольшой точностью исход-

ных данных. Размах в значениях  $J_L$  в пределах инженерно-геологического элемента может достигать 1, особенно для супесей, для которых возможны погрешности, соизмеримые с величиной числа пластичности. По частным определениям один и тот же грунт может быть отнесен и к твердым, и к мягкотекущим (для супесей и к текущим). Показатель текучести является характеристикой грунтов нарушенного сложения, так как грунты разного генезиса, состава и исходного состояния обладают различной чувствительностью к нарушению структуры, могут быть влажными или насыщенными водой.

Еще в 1956 г. П. О. Бойченко [14] предложил использовать для характеристики грунтов нарушенного сложения показатель консистенции  $C_b$ , сходный по смыслу с показателем текучести  $J_L$ . Также, как для  $J_L$ , приняты глубины погружения конуса массой 300 г: 4 мм для  $C_b=0,0$  и 22,5 мм для  $C_b=1,0$ .

Преимущества показателя консистенции  $C_b$  заключаются в том, что он отражает состояние грунта естественного сложения. Метод пенетрации, используемый для определения показателя консистенции по глубине погружения конуса, с равным успехом может быть применен как в поле при ведении буровых работ, так и в лаборатории, а значит, может быть средством получения массовой информации по всем скважинам — техническим и разведочным, по всем глубинам с необходимой частотой опробования, недоступной при лабораторных исследованиях, и быть средством контроля за качеством поступающих в лабораторию монолитов. Наконец, метод пенетрации применим к грунтам независимо от исходного состояния — от текущих до твердых включительно.

Естественно предположить, что показатель текучести превышает по значению показатель консистенции  $C_b$ , что принято связывать с разрушением структуры грунта. Действительно, сравнение  $J_L$  и  $C_b$  для грунтов разных состояний, составов и генезисов показывает, что разность между ними может достигать 0,5–0,6, правда, только для грунтов слабых — мягкопластичной — текучей консистенций. Для грунтов же твердой консистенции наблюдается близость значений  $J_L$  и  $C_b$ . В целом, по результатам сравнений  $J_L$  и  $C_b$  может быть сделан вывод о том, что зависимость между показателями консистенции  $J_L$  и  $C_b$  может считаться генетическим признаком грунта. Так, для суглинков ленточных пылеватых получена зависимость  $J_L=1,35 C_b+0,32$ . Для супесей моренных  $J_L=1,75 C_b-0,07$ .

Графически эти зависимости представлены на рис. 12. Как видно из графиков, для суглинков ленточных (кривая 1) разность между  $J_L$

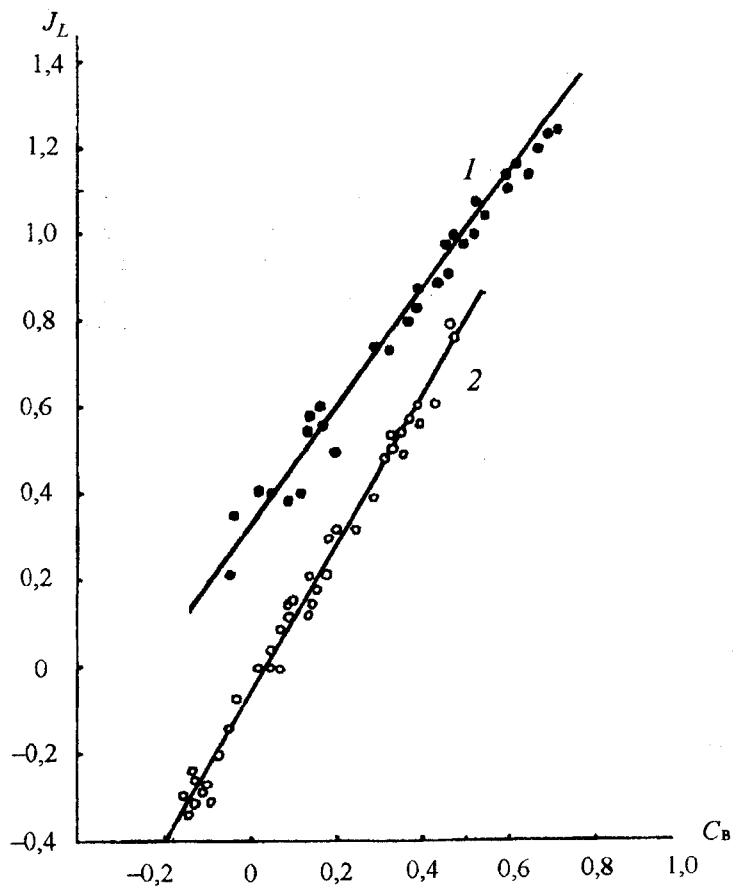


Рис. 12.

и  $C_b$  сохраняется большой во всем возможном диапазоне состояний этих грунтов, тогда как для моренных супесей (кривая 2) разность переменная и снижается от 0,4 до нуля с переходом к твердой консистенции. Наличие проявления генетических особенностей грунтов. Для кембрийских и протерозойских глин, для которых преобладает твердая (по  $J_L$ ) консистенция, отмечается близость  $J_L$  и  $C_b$ . Такая закономерность вряд ли означает, что слабые грунты более чувствительны к нарушению структуры. Скорее, причина заключается в особенностях качественной оценки посредством показателей консистен-

ции  $J_L$  и  $C_b$ , а сама чувствительность к нарушению должна определяться иначе.

Из рассмотрения графиков следует и то, что одному значению  $J_L$  будет соответствовать множество значений  $C_b$  для грунтов разного генезиса. Отсюда должен быть сделан вывод, что использовать показатель текучести для выхода на прочностные и деформационные свойства грунтов и на расчетные сопротивления свай (по боковой поверхности и под нижним концом) принципиально неверно. Однако показатель консистенции  $C_b$  также имеет ограниченное применение. Результаты пенетрационных испытаний связных грунтов правильное представлять в виде удельного сопротивления пенетрации  $R = P/h^2$ , МПа. Эта характеристика обладает многими цennыми свойствами. Имея размерность напряжений, она позволяет сравнивать грунты по прочности и усмотреть условность разделения на подформы по консистенции. Так, для грунтов от текучей до тугопластичной консистенции ( $C_b=1,0-0,25$ ) величина удельного сопротивления пенетрации возрастает всего от 0,01 до 0,04 МПа, тогда как в пределах лишь полутвердой консистенции ( $C_b=0,0-0,25$ ) изменяется от 0,13 до 1,5 МПа.

Удельное сопротивление пенетрации связано с прочностными свойствами грунта естественного сложения зависимостью  $c = K_\phi R$ , в которой  $K_\phi$  — коэффициент пропорциональности, являющийся функцией угла внутреннего трения грунта и угла при вершине конуса. Применение пенетрационных испытаний в комплексе с одним из других методов (одноосное сжатие, сдвиговые испытания) значительно повышает достоверность определения  $\phi$  и  $c$  и будет способствовать разрешению проблемы определения прочностных свойств связных грунтов. В отличие от показателя консистенции  $C_b$ , для выхода на который испытания проводятся конусом постоянной массы, знание величины  $R$  требует проведения испытаний ступенчато-возрастающей нагрузкой на всех грунтах, но особенно на грунтах твердой консистенции. Вопросы методики проведения пенетрационных испытаний и их интерпретация изложены в работах [14, 20].

## Литература

1. Приклонский В. А. Грунтоведение. М., 1955.
2. Сергеев Е. М. и др. Грунтоведение. М., 1983.
3. Дерягин Б. В. Учене о свойствах тонких слоев воды в приложении к объяснению свойств глинистых пород // Труды совещ. по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Ч. 1. М., 1956.
4. Злочевская Р. И. Связанная вода в глинистых грунтах. М., 1969.
5. Злочевская Р. И. и др. Гидратация и ее влияние на свойства грунта: Теоретические основы инженерной геологии: физико-химические основы. М., 1985.
6. Злочевская Р. И. Особенности гидратации и дегидратации глинистых пород // Инженерная геология сегодня. М., 1988.
7. Осипов В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М., 1979.
8. Кульчицкий Л. И. Природа гидратации глинистых минералов и гидрофильность глинистых пород // Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 2. М., 1972.
9. Кульчицкий Л. И. Роль воды в формировании свойств глинистых пород. М., 1975.
10. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Л., 1965.
11. Лысенко М. П., Андреева Е. В. Сорбция порообразной воды глинистыми грунтами различного минералогического состава // Вестн. Ленингр. ун-та. 1985. № 14.
12. Мичурин Б. Н. Энергетика почвенной влаги. М., 1975.
13. Ломтадзе Л. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. Л., 1972.
14. Бойченко П. О. Определение пределов пластичности и консистенции глинистых грунтов методом конуса. Л., 1961.
15. Богданов Е. Н. Определение прочностных свойств связных грунтов методом пенетрации // Современные методы определения механических характеристик слабых грунтов. Л., 1978.
16. Разоренов В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М., 1980.
17. Бархатов А. Ф., Богданов Е. Н. К методике определения пределов пластичности связных грунтов: Вопросы научно-технической направленности инженерно-строительных изысканий. Свердловск, 1974.
18. Дашко Р. Э. Теория и практика инженерно-геологического анализа и оценки водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений: Автореф. докт. дисс. М., 1985.
19. Калачев В. Я. Оптимизация методов лабораторного изучения грунтов. Инженерная геология сегодня: Теория, практика, проблемы. М., 1988.
20. Калачев В. Я., Трофимов Б. Г. Рекомендации по определению липкости грунтов в стационарных лабораториях и полевых условиях. М., 1983.
21. Богданов Е. Н. Связь результатов пенетрационных испытаний различными конусами с прочностными характеристиками глинистых грунтов // Грунтоведение и инженерная геология. Л., 1976. Вып. 1.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
1. Современные представления о гидрофильтрности грунтов . . . . .	—
2. Изучение сорбционной способности глинистых грунтов . . . . .	13
3. Определение гигроскопической влажности . . . . .	16
4. Определение максимальной гигроскопической влажности . . . . .	—
5. Определение максимальной молекулярной влагоемкости . . . . .	17
6. Определение оптимальной влажности . . . . .	—
6.1. Стандартный метод . . . . .	18
6.2. Ускоренный метод (по Г. Ф. Богданову, 1965) . . . . .	19
7. Пластичность и консистенция грунтов . . . . .	21
7.1. Общие сведения . . . . .	—
7.2. Методы определения . . . . .	24
7.2.1. Определение пределов пластичности методом ГОСТ 5184-64 . . . . .	—
7.2.2. Определение пластичности и консистенции по методу П. О. Бойченко . . . . .	28
7.2.3. Определение пластичности и консистенции по В. Ф. Разоренову . . . . .	35
8. Набухание грунтов . . . . .	38
9. Усадка грунтов . . . . .	46
10. Липкость грунтов . . . . .	50
11. Размокание грунтов . . . . .	58
12. Анализ зависимостей между показателями пластичности и консистенции для оценки физического состояния грунтов . . . . .	60
Литература . . . . .	67