1971 г. Август *Том 104, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

631.4

ФИЗИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ*)

Р. Скотт

Исходные причины почвообразовательного процесса кроются в физических явлениях размельчения и истирания скалистых масс и химических явлениях растворения и рекристаллизации скалистых минералов. Затем имеет место перенос и распределение этих материалов с помощью различных агентов и дальнейшее осаждение их на поверхности земли или под водой. Обычно почвы претерпевают ряд циклов: осаждения, взброса, эрозии и повторного осаждения. Их механические свойства, формирующиеся под влиянием напряжений, вызываемых инженерными конструкциями, зависят от типа почвы. При конструировании строений необходимо учитывать деформацию почв, возможные их деформации при отвалах и изучить все это в лабораторных условиях в специально поставленных для этой цели опытах. Таким образом, решение задач, связанных с инженерным почвоведением, включает программу полевых и лабораторных исследований почвы и в первую очередь с целью определения тех ее типов, которые представляют интерес для изучения; затем имеются в виду лабораторные исследования каждой почвы и далее аналитические расчеты или расчеты с помощью счетно-решающих устройств для определения тех механических смещений и напряжений, которые происходят в почве и сооружении.

Особый интерес представляют задачи, связанные с обвалами склонов, сооружением земляных дамб, опорных стен и свайных конструкций, со смещением и провалами почвы под строениями, а также определением свойств почвы на поверхности Луны и других планет.

1. ВВЕДЕНИЕ

Роль почвы при конструировании различных сооружений всегда считалась чрезвычайно важной, но факторы, определяющие ее инженерные свойства, оставались неизученными вплоть до последних 40 или 50 лет. Устойчивость или неустойчивость больших сооружений, таких, как средневековые соборы, зависела от того, были ли они возведены на пригодных для их фундаментов или на непригодных для них почвах. Неприятности, связанные с неприемлемыми для строительства почвами, были хорошо известны строителям еще в древности; там, где это было возможно, сооружения того времени покоились на скалах или очень твердых и плотных почвах. Для целей связи и торговли города строились на берегах рек и на морских берегах в заливах и бухтах. Зачастую в этих местах встречается много участков с относительно рыхлыми, легко сжимаемыми почвами, поэтому вначале были использованы площади с лучшими инженерными свойствами почв. В связи с расширением современной промышленности за последние несколько десятилетий появилась необходимость

---

*) R. F. Scott, The Physics and Mechanics of Soil, Contemp. Phys. 10, 449 (1969). Перевод Е. Б. Чудновской, под редакцией А. Ф. Чудновского.

Автор статьи Р. Ф. Скотт — сотрудник Калифорнийского университета, Пасадена, США.

в сооружении различных зданий в местах, которые нельзя назвать достаточно хорошими по своим свойствам для установки фундаментов. В XIX столетии сооружение сначала каналов, а затем железных дорог и метрополитенов потребовало рытья обширных участков всякого рода почв и скалистых материалов. Имеющие при этих обстоятельствах место провалы и усадки фундаментов, обвалы склонов, опорных стен и туннелей заставили инженеров искать пути для понимания специальных вопросов, связанных с изучением почв. Первые попытки в этом направлении были сделаны исследователями еще давно; сюда относятся исследования Кулона и Ренкина, которые изучали давления, оказываемые землей на опорные стенки; полученные ими результаты используются инженерами неправильно вплоть до настоящего времени. Однако систематических исследований как физических, так и механических свойств почв не было предпринято, и только после первой мировой войны К. Терцаги начал свои исследования в этой области. В последующие 15 лет Терцаги и все растущее число других исследователей заложили основы для понимания механических свойств почвы. В частности, Терцаги разъяснил физический смысл задачи затвердевания, когда слой глины под нагрузкой от сооружения медленно деформируется с течением времени. Он описал также рациональные методы для определения предельной выносливости к нагрузке оснований для фундаментов, а также методы расчетов напряжений и смещений нагруженных почв.

Такие задачи являются исключительно трудными для решения из-за механически неоднородных, анизотропных и неупругих материалов, какими являются почвы, и Терцаги и другие ученые вводили значительные упрощения при решении задач. Однако многие из встречающихся трудностей возникают из-за попытки сформулировать и решить столь сложные задачи на основе строгих методов математического анализа. Так как каждая почвенная задача является уникальной в отношении свойств и распределения материала, находящегося под нагрузкой, то аналитическое решение невозможно получить в общем виде без значительных упрощений в отношении поведения материала. В последнее десятилетие появление дискретных счетно-решающих устройств создало возможность для изменения этой ситуации. В типичных случаях для многих инженерных задач для почв, геометрическая конфигурация и свойства материала которых могут быть представлены моделями, близко отражающими реальную почвенную структуру, удается получать аналитическое решение с помощью счетно-решающего устройства. Поэтому представляется вероятным, что в ближайшие несколько лет по мере усовершенствования полевого и лабораторного оборудования будет сделан упор на более точное определение свойств и профиля почвы, ее подповерхностного слоя.

На последующих страницах будут изложены сведения о нашем современном уровне знаний в отношении свойств и состояния почвы, а также приведены сведения о существующем оборудовании для определения ее инженерных качеств.

2. СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОЧВЫ

Когда расплавленная скалистая масса выталкивается на поверхность или под поверхность земли, то различное охлаждение отдельных областей скалы вызывает появление в ней напряжений. Дальнейшие напряжения возникают в результате давления примыкающих материалов и деформаций, которые появляются в земной коре. Эти напряжения накладываются на естественные дефекты внутри и между кристаллами минералов скалы, в результате этого скалистые массы принимают вид экстенсив-

ной раздробленной системы. Ориентация раздробленных частиц зависит и от распределения напряжений в скале, и от естественных характеристик расположения мягкой части самого материала. Когда разрушается земная кора, частицы в скалистых массах обнажаются, так что отдельные глыбы между частицами могут быть смещены силой гравитации, водой или другими агентами. Превращение материнской породы в частицы малого размера называется «выветриванием».

При выветривании действуют два фактора: физико-механические процессы и химические процессы. При механическом выветривании частицы в скале раздвигаются из-за деформаций в скале, нагревания или охлаждения и замерзания воды до тех пор, пока неустойчивость приводит к тому, что частицы скалы откалываются от материнской породы и падают вдоль склона, разбиваясь по пути на более мелкие частицы при дальнейших столкновениях. Этот процесс дробления продолжается под действием воды рек, водных потоков и ветра после того, как на земле куски скал, уносимые водой, дробятся и перемалываются один о другой. Столкновения между отдельными скалами приводят к размыванию их на все меньшие и меньшие части. На Луне первоначальные скалистые массы, каково бы ни было их происхождение, обычно уже в первоначальном состоянии изборождены трещинами всевозможных размеров, и вполне вероятно, что внешняя поверхность скал и в будущем будет раскалываться под воздействием различного рода тепловых воздействий (расширения и сжатия). Однако отсутствие воды в настоящем и, по-видимому, в прошлом на лунной поверхности исключает этот эффективный агент истирания как источника образования зернистого материала на Луне. С другой стороны, отсутствие предохраняющей атмосферы на Луне представляет ее поверхность для бомбардировки метеоритами в течение миллионов лет. По произведенной оценке каждый метеорит, ударяясь о лунную поверхность со скоростью от 20 до 30 *км/сек*, размельчает массу лунной скалы, равную примерно его тысячекратной массе. Удары больших метеоритов, в результате которых появились кратеры Коперника и Тихо, вырыли огромные полости и разбросали обломки скал по всей лунной поверхности. Несомненно, некоторые частицы от ударов метеоритов вышли за границы лунного притяжения и не вернулись на Луну. Некоторые из них, возможно, попали на Землю. Непосредственно вблизи вырытых кратеров лунная поверхность покрыта покровом наносной скалистой породы. В изверженном большими кратерами покрове пробивают себе путь бесчисленные меньшие метеориты, с годами снижая размеры фракций до минимума, определяемого, по-видимому, характером скалистого минерала. Полагают также, что вулканы могли внести на лунную поверхность зернистый материал в виде вулканических зольных потоков. Этот материал образовался из охлажденной изверженной лавы, вырвавшейся из отверстий вулканов. На рис. 1 изображен кратер Тихо и изверженный им покров *).

Наши познания относительно Марса менее обширны, чем относительно Луны, но кратеры, обнаруженные «Маринером-4» в 1965 г. (рис. 2),

---

*) Автор не отразил в достаточной степени наличие в науке двух концепций: вулканической (теория внутренних факторов) и метеоритной (теория внешних факторов), не высказал соображений, приводимых учеными в пользу первой или второй точки зрения. По-видимому, наиболее правильным будет, и за это говорят многие факты, добытые как американскими, так и советскими автоматическими станциями, начиная от «Луна-9», говорить о компромиссной теории, предполагающей в различные периоды истории развития Луны нескольких фаз, в каждую из которых главную роль играли то первая, то вторая категория факторов. Наиболее достоверна позиция советских ученых, признающих фазы: «догеологическую» с преобладанием метеоритной бомбардировки, по преимуществу вулканическую и, наконец, в основном метеоритную. (*Прим. ред.*)

вызывают предположение, что природу поверхности Марса определили главным образом падавшие через разреженную атмосферу Марса метеориты,

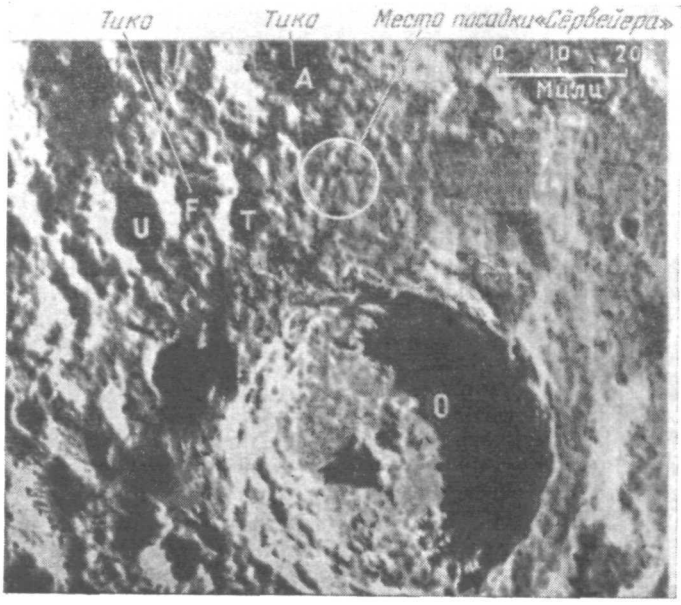

Рис. 1. Изображение лунного кратера Тихо и изверженного покрова, полученных со спутника III.
Указано место посадки «Surveyor VII».

хотя ветры и размельчили известную часть материала до мелкозернистого состояния. Мы мало знаем о природе поверхности других планет. Плотная земная атмосфера предохранила нашу планету от попадания метеоритов, за исключением лишь самых больших. Этот факт, а также динамическая природа земных и корковых процессов из-за наличия жидкого земного ядра позволяют сделать вывод о том, что удары метеоритов играли сравнительно небольшую роль в образовании земных почв.

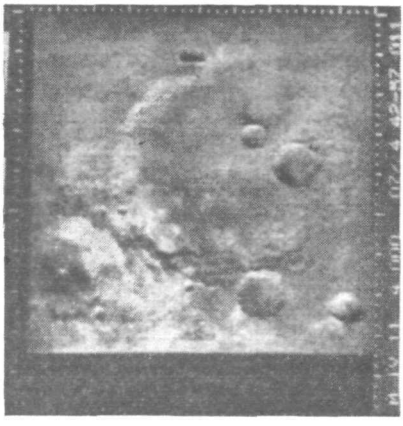

Рис. 2. Топография кратеров на поверхности Марса, полученная с помощью «Mariner IV».

Исследуя естественный процесс размельчения частиц, Мокко обнаружил две закономерности. Во-первых, чем меньше размер и объем отдельных частиц, тем меньше в них дефектов или трещин. Размеры дефектов различны. Наименьшее смещение кристаллической структуры составляет несколько микрометров. Таким образом, большой минерал имеет много изломов и трещин и поэтому является относительно слабым. Когда размеры минерала постепенно уменьшаются до размеров меньших, чем расстояния между первоначальными изломами, а затем смеще-

ниями, материал становится существенно крепче. Во-вторых, силы и напряжения, возникающие при столкновениях между двумя минералами или между минералами и какой-либо твердой поверхностью, уменьшаются с уменьшением размера образцов горной породы. Таким образом, при уменьшении размеров образуется естественный предел, ниже которого процессы столкновения обладают относительно малой эффективностью. Эта граница примерно лежит в пределах размеров частиц от 10 до 100 *мкм*, хотя под действием размалывания ледников создаются иногда и меньшие частицы. Физический процесс измельчения основного минералогического материала обычно приводит к созданию жестких и округлых частиц одинакового размера. Но иногда встречаются частицы иглообразной формы.

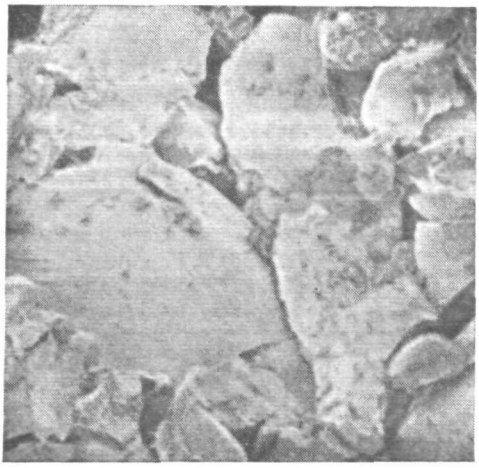

Рис. 3. Развернутая электронномикроскопическая фотография частиц ила и частиц меньших размеров.

Масштаб тот же, что и на рис. 5. Характер ориентации частиц указывает на то, что они относительно свежие. Меньшие частицы глины появляются главным образом в точках контакта между большими частицами. Увеличение 800×.

Сопутствуя этим физическим процессам измельчения, вода и растворимые в ней кислоты оказывают свое действие на поверхности скалистых материалов, растворяя и перемещая минералы, что в конечном итоге также способствует уменьшению размеров частиц. Когда размеры частиц велики, порядка футов или дюймов в диаметре, химическое выветривание мало влияет на уменьшение размеров пород, так как химические агенты могут смещать только поверхностные молекулы. Поэтому важной характеристикой является отношение числа поверхностных молекул к числу внутренних в данной части объема, а оно мало, когда размер частиц велик. Однако, когда продолжаются физические процессы истирания, постепенное уменьшение размера минерала приводит к увеличению отношения площади поверхности к объему, так что химический процесс становится более эффективным, когда размер кристаллов снижается (рис. 4 и 5) *).

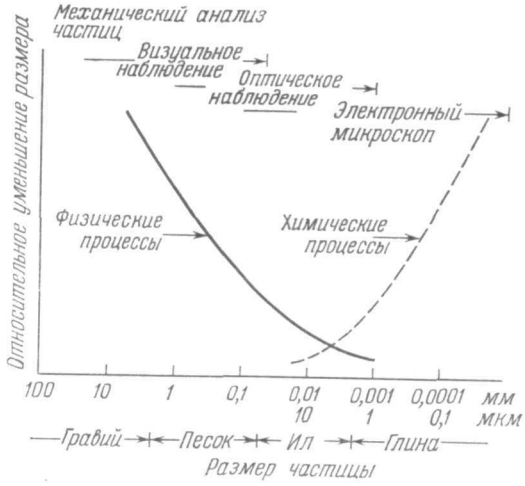

Рис. 4. Относительная эффективность различных новообразовательных процессов при уменьшении размеров частиц.

Горизонтальная шкала представляет границы размеров, обычно приписываемые различным почвам.

*) Автор не вводит и не использует понятие удельной поверхности дисперсных сред, в частности почв, оказывающееся весьма плодотворным для анализа и оценки сил взаимодействия между частицами подобных коллоидных систем: тем самым недо-

Вода, которая течет через почвенную массу и растворяет минералы, подвергается изменениям давления, температурным и химическим изменениям, так что от времени до времени элементы минералов, растворенные в воде, осаждаются и кристаллизуются из воды, образуя новые минералы. Эти новые минералы состоят из тех же составных элементов, что и первоначальные (кремний, кислород, водород, алюминий, магнезия, поташ, кальций, натрий, железо и т. д.), но обладают иной кристаллографической структурой. Их называют «глинистыми минералами», и они обычно имеют вид пласта или листовую структуру. Часто отношение их диаметра к толщине колеблется в пределах от 50 до нескольких сот. Из-за процесса кристаллизации и переноса в воде частицы не развиваются до значительных размеров. Некоторые глины образуются путем химических изменений метеоритной породы непосредственно (см. рис. 5).

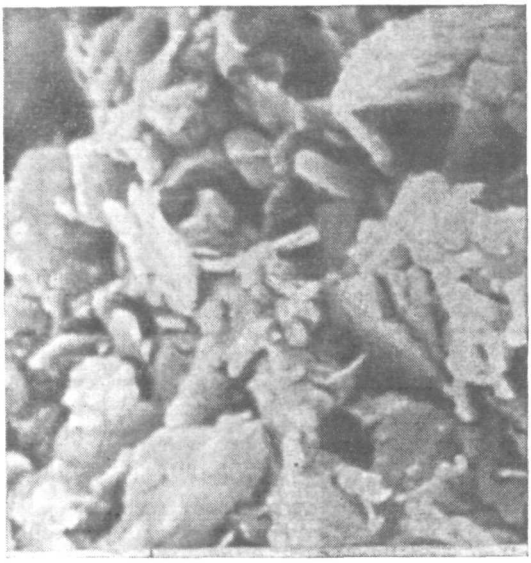

Рис. 5. Развернутая электромикроскопическая фотография глины.

С целью исследования образец почвы был высушен и раскатан для получения свежей поверхности. Увеличение 30 000×.

Глинистые минералы делятся на три основных класса: каолин, иллит и монтмориллонит. Размеры частиц в каждом глинистом минерале различны — от частиц 10—50 *мкм* в диаметре в каолине до пластинок в несколько сотых долей *мкм* в диаметре в монтмориллонитовых почвах. После осаждения почвенные образования подвергаются постоянной эрозии, так что и грубые, и более мелкие частицы сносятся реками и осаждаются в озерах и морях. Более крупные частицы падают быстрее, а более мелкие медленно оседают в воде на дно. Так как осадки и речные потоки сильно меняются, осаждения могут состоять из различных слоев относительно крупных и более мелких минеральных материалов или из сравнительно однородных осаждений, состоящих из почв с примерно одинаковыми по размеру частицами. За геологические периоды времени уровень воды и суши изменяется, и почвы могут вновь создаваться, выветриваться, образуя другие почвенные слои в других местах, или превращаться в осажденные минералы. Эти породы в свою очередь могут быть разрушены и выветрены. Следовательно, почвы образуют гетерогенные смеси — от осаждений с частицами диаметром в дюйм до глинистых слоев, состоящих из частиц с диаметром в десятые доли микрона.

Исследования показали, что химический состав окружающей воды, в которой осаждается глина, оказывает важное влияние на окончательное расположение частиц, так как наличие электролитов в порах, занятых

статочно полно раскрывается роль электрохимических взаимодействий в процессах почвообразования. Обстоятельное изложение этих вопросов находим в работах: Б. В. Дерягин, Л. Д. Ландау, ЖЭТФ **15**, вып. 11 (1945); Б. В. Дерягин, Физ. химия **24**, вып. 11 (1950); Б. В. Дерягин, Коллоид. ж. **15** (1953); **17** (1955); Дж. Овербек, Наука о коллоидах, М., ИЛ, 1955. (*Прим. ред.*)

водой, вызывает межчастичные электростатические силы или силы отталкивания Кулона, величина которых зависит от концентрации электролита и валентности составляющих ионов. Так как между соседними кристаллическими поверхностями действует основная притягивающая сила Ван-дер-Ваальса, результирующее взаимодействие между частицами может быть притягивающим или отталкивающим в зависимости от окружения. Если концентрация электролита низкая, то частицы глины отталкиваются одна от другой (если они не находятся в очень тесном контакте) и поэтому осаждаются по отдельности очень медленно. Когда частица достигает дна, она из-за отталкивания стремится принять более или менее параллельную ориентацию по отношению к ближайшей неподвижной частице. Когда концентрация электролитов более высока, как, например, в соленой или морской воде, частицы в общем обнаруживают силы притяжения. Когда случайные потоки и броуновское движение заставляют осаждающиеся пластинки беспорядочно сдвигаться одна по отношению другой, то частицы соединяются в комки или «хлопья» и оседают сравнительно быстро. Так как края пластинок глины заряжены положительно, а поверхности отрицательно, расположение частиц в образующихся комках и во всей почве определяется контактами между комками одних и поверхностями других частиц. Эти два расположения — параллельное (силы отталкивания) и случайное (силы притяжения) — называется соответственно «дисперсным» и «флоккурированным».

Хотя почвенные зерна могут быть связаны воедино растворимыми осадками в точках своего соприкосновения, в особенности в безводных зонах, мы обычно рассматриваем почвы как агрегаты частиц, которые не связаны в точках контактов. В своем естественном состоянии почвы могут быть полностью насыщены водой или могут быть частично насыщены ею и содержать пузырьки воздуха или другого газа. Некоторые почвы могут быть и почти совсем сухими. Абсолютно сухих почв на земле не существует, так как поверхности минералов имеют свойство впитывать воду. В некоторых случаях межпоровое пространство бывает заполнено маслом или битумом *).

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ

Согласно общепринятой терминологии почвы, в соответствии с размерами зерен, называются так, как показано на рис. 4. По одной классификации почвы с размерами зерен от 2 до 60 *мм* в диаметре называются гравием, с размерами от 0,6 до 2 *мм* — песком, с размерами от 0,002 до

---

*) В данном обзоре указываются две причины почвообразовательного процесса и игнорируется третий, очень важный фактор — биологический. Этим автор лишает почву главного признака, отличающего ее от горных пород,— плодородия. Эволюция основной массы растений на земном шаре, в течение геологического времени развивающихся на почве, и эволюция коры выветривания взаимосвязаны. Процессы физического, химического и биологического выветривания образуют единую и неразрывную основу почвообразования. В почве перемешаны наряду с первичными минералами — обломками исходных пород — и с вторичными минералами, возникшими в результате физического и химического выветривания, также органо-минеральные соединения как результат взаимодействия почвенных минералов с продуктами жизнедеятельности и разложения остатков растений. См., например: И. В. Тюрин, Органическое вещество почвы, М., Сельхозгиз, 1937; Н. М. Лазарев, Труды Всесоюзного научно-исследовательского института микробиологии, вып. 1 (1949); К. И. Рудаков, Микроорганизмы и структура почвы, М., Сельхозгиз, 1951; Д. М. Новогрудский, Почвенная микробиология, Алма-Ата, Изд. АН Казахской ССР, 1956; Л. Н. Александрова, Доклады советских почвоведов к 7-му Международному конгрессу в США, Изв. АН СССР (1960). (*Прим. ред.*)

0,06 *мм* — илом и с размерами, меньшими 0,002 *мм*,— глинами *). В основу классификации почв можно положить не только размер частиц, но и существующие различия в физических и химических свойствах почв, возникших в результате почвообразования, и различия в их механических свойствах, вызванных разнообразием размеров почвенных частиц.

Рассмотрим, как показано на рис. 6 единичное зерно почвы (обозначено как песок или гравий на рис. 6, *а* и частица глины на рис. 6, *б*),

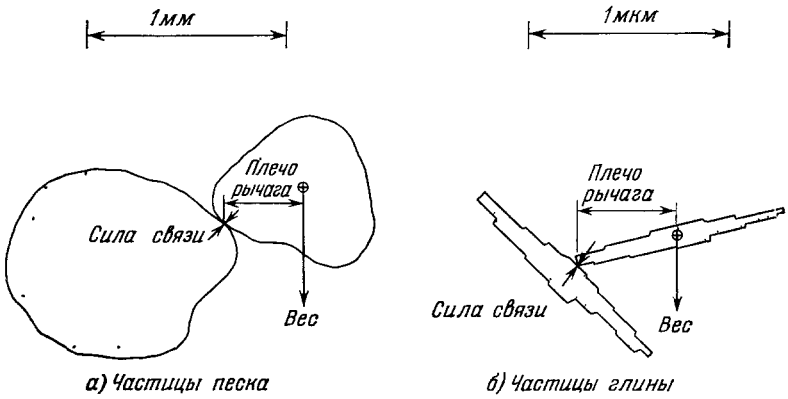

Рис. 6. Влияние размеров частиц на характер их упаковки.

которое, опускаясь в воде, приходит в соприкосновение с другой частицей, образуя часть почвенного слоя. Простой анализ действующих при этом сил показывает, как влияет на структуру образующегося почвенного материала размер частиц. Поверхность контакта между частицами составляет всего лишь 10^{-9} *м* в диаметре, и обычно притяжение частиц происходит главным образом в результате действия между соседними поверхностями ван-дер-ваальсовских сил притяжения в точке соприкосновения. По существу разницы между площадями контактов частиц песка или глины не будет, и силы связи в этих двух случаях будут сходными. Тем не менее для любой силы связи в точке соприкосновения частиц способность частицы песка к плавучести с учетом силы веса, действующей на них, показывает, что последние превышают сопротивление межмолекулярных сил, так что частица песка будет продолжать падение, образуя в конечном

*) Приведенную здесь классификацию механических элементов почвы по размерам зерен нельзя считать, как это утверждает автор, общепринятой. Она достаточно груба и не детальна. В качестве более приемлемой в смысле охвата всего спектра встречающихся в разнообразных почвах частиц можно среди многочисленных предложенных схем указать на классификацию Н. А. Качинского.

Название систем	Диаметр частиц, *мм*
Камни	3
Гравий	3—1
Песок: крупный	1—0,5
средний	0,5—0,25
мелкий	0,25—0,05
Пыль: крупная	0,05—0,01
средняя	0,01—0,005
мелкая	0,005—0,001
Ил	0,001

В книге Н. А. Качинского (Н. А. Качинский, Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения, М., Изд-во АН СССР, 1958) можно найти обоснование как этой классификации, так и критику других опубликованных в литературе. (*Прим. ред.*)

счете плотно упакованную массу зерен. В глинистом материале, наоборот, сила межчастичной связи превышает вес частицы и частицы глины остаются на месте осаждения. Таким образом, глинистая структура образуется в виде очень свободно расположенных пластинок. Это видно из рис. 5. Упаковку частиц в глинах часто называют структурой, напоминающей «карточный домик». Когда, например, на дне озера оседает слой песка, то структурное расположение частиц лишь слегка изменяется по мере прибывания новых частиц и постепенного увеличения давления на этот слой вышележащей почвы. Увеличение плотности слоя песка относительно мало, так как частицы уже приобрели довольно плотную упаковку с самого

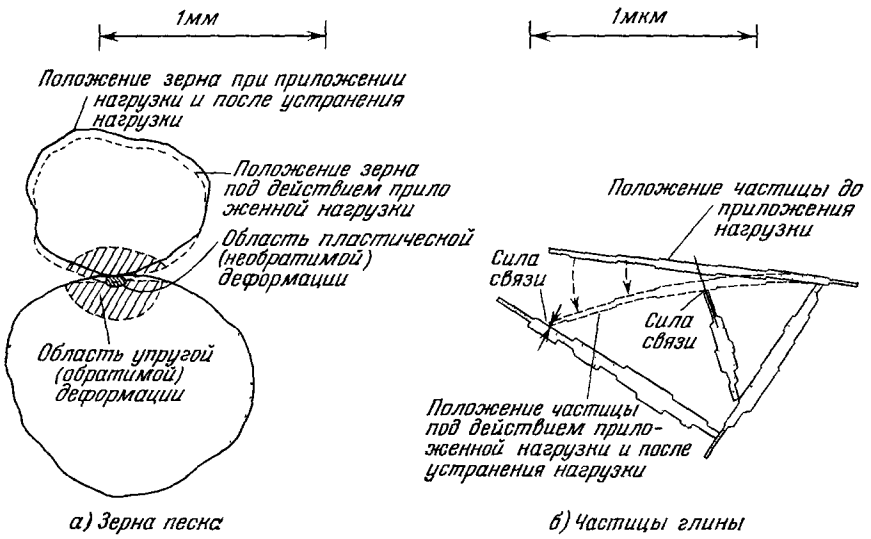

Рис. 7. Поведение частиц песка и глины при внешней нагрузке.

начала. Вместо этого увеличивается площадь контактного соприкосновения частиц. С другой стороны, в беспорядочно расположенной структуре глин постепенно увеличивающаяся нагрузка на любую группу частиц спрессовывает их плотнее и развивает большее изменение в ориентации частиц и структурном расположении. В случае глины, в результате увеличивающегося давления, возникает все больше и больше контактов между частицами.

Картина спрессовывания двух песчинок примерно изображена на рис. 7. Под действием приложенной нагрузки частицы песка (рис. 7, *а*) уплощаются и деформируются в точке контакта, развивая при этом все больше связей между соседними поверхностями. Часть деформации является пластической или необратимой, а большая часть — упругой или обратимой. Если нагрузка убирается, то освобождение скопившейся упругой энергии в частице превосходит энергию дополнительных связей, которые имели место между отдельными частицами, и частицы возвращаются к своей прежней конфигурации. В случае глинистых плоскостей (рис. 7, *б*) межчастичные связи у новых контактов, возникающие при нагрузке, достаточно сильны, так что при снятии нагрузки глина не возвращается к своему первоначальному структурному расположению. В самом деле, глина имеет «память» наибольшей нагрузки или напряжения, которым она подвергалась и которая зависит от числа контактов между частицами. Так как прочность почвы зависит от числа межчастичных связей на единицу объема, то ясно, что прочность грубой зернистой почвы зависи

от фактически имеющейся нагрузки, в то время как в почве, содержащей частицы глины, прочность до некоторой степени отражает наибольшую нагрузку, которая была приложена к почве ранее. Добавочная прочность, которой глина обладает благодаря этому эффекту, называется «сцеплением», и действительно в механике почвы термины «грубозернистая» и «лишенная сцепления» «мелкозернистая» и «связанная» употребляются как синонимы (рис. 8). На рис. 8 дана срезывающая сила почвы при различных давлениях. Стрелки показывают поведение почвы при нагрузке и разгрузке. Прямолинейная связь возникает как недостаток критерия Кулона.

Таким образом, из вышеизложенного можно видеть, что имеется ряд аспектов, относящихся к механическим свойствам почвы. Во-первых,

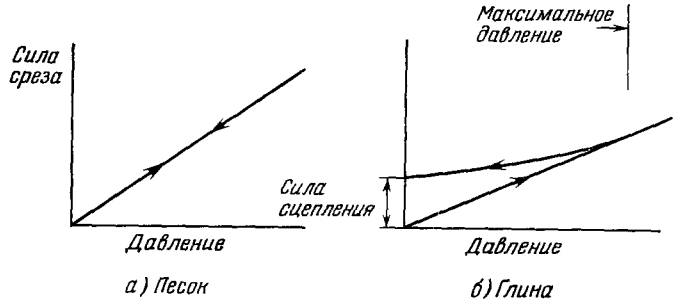

Рис. 8. Сопротивление почвы срезу при различных давлениях.
Стрелки показывают поведение почвы при нагрузке и разгрузке. Прямолинейная связь указывает на отклонение от соотношения Кулона.

самым главным из них является размер составляющих почву частиц; во-вторых, их упаковка или отношение объема пустого пространства к объему, занятому твердым веществом; в-третьих, в крупнозернистых почвах — степень угловатости и форма частиц. В глине из-за плоской формы частиц интересно также знать степень параллелизма частиц и их ориентацию по отношению к некоторому фиксированному направлению координат. Глины, содержащие частицы, расположенные параллельно одна другой, будут вести себя отлично от глин с беспорядочно расположенными частицами. Возникают некоторые специальные проблемы, связанные, например, со случаями, когда почва осаждается в морской воде, так что частицы в результате сил притяжения между ними будут иметь расположение, указанное на рис. 5 и 7 (конец контактируется с плоскостью), вслед за тем почва постепенно поднимается и выщелачивается дождевой или свежей водой, так что электролиты смещаются и вода, заключенная в порах, становится по существу такой, как в материале, осажденном в свежей воде. В этом случае, если глина разрушена до такой степени, что отдельные связи и контакты между частицами разорваны, то частицы глины будут стремиться принять конфигурации взаимного отталкивания и в результате по существу получается превращение глинистого материала в жидкость. Такие глины имеются в ряде мест на земном шаре, как, например, в реке Сент-Лоуренс (где они называются «леда»-глинами) и в Швеции и Норвегии, где их называют «быстрыми» глинами. На рис. 9 приведена интересная иллюстрация относительной прочности «леда»-глины перед и после разрушения переформированием. Если вдоль речного берега в результате эрозии или постепенного тектонического передвижения, приводящих к увеличению напряжения в такой потенциально быстрой глине, материал деформируется до такой степени, что связи

между частицами нарушаются, он может поплыть как жидкость, вызывая огромные разрушения, затопляя долины и образуя озера. На рис. 9 показаны свойства чувствительной «леда»-глины перед и после переформирования. Слева на рисунке изображен образец глины цилиндрической формы. Он может выдержать нагрузку в 11 *кг*. Переформирование полностью разрушает естественную структуру глины, образуя вязкую жидкость, как видно в правой части фотографии. (К образцу глины не добавлялось воды.)

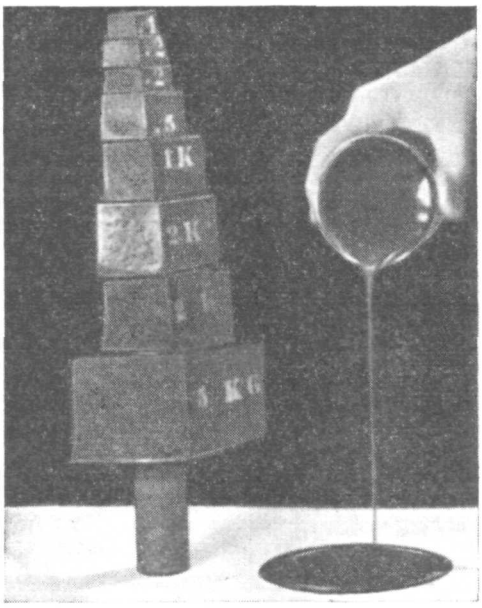

Рис. 9. Свойства «леда»-глины перед и после переформирования.

Слева изображен образец глины цилиндрической формы. Он может выдержать нагрузку в 11 *кГ*. Переформирование полностью разрушает естественную структуру глины, образуя вязкую жидкость, как это видно в правой части фотографии.

4. ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОГО ПОЧВОВЕДЕНИЯ

При конструировании сооружений, таких, как мосты, дамбы, здания и туннели, необходимо знать нагрузку, которая должна быть приложена к конструкции, включая ее собственный вес и прочность строительного материала. Для статической нагрузки это не трудно сделать, так как свойства стали и цемента относительно хорошо известны, материалы являются однородными и нагрузки четко определены. Кроме того, балки и колонны строения помещаются в точно контролируемых положениях так, что когда здание воздвигается на жестком фундаменте, силы и напряжения в различных частях сооружения могут быть рассчитаны. Однако, так как большинство сооружений строится на почве или в ней, почва сама по себе становится частью сооружения, и силы и напряжения в стальных и цементных частях зависят от деформаций и усадки почвы. Это вызывает необходимость исследования структуры различных почв под сооружениями и определения их инженерных свойств. Иногда, когда возникает вероятность скольжения склонов или холмов, интерес сосредоточивается на самой почве как инженерной конструкции. При сооружении земляных дамб фактически вся инженерная проблема сводится к поведению почвы. Исследование структуры почвы, расположения ее и инженерных особенностей выдвигает различные проблемы, начиная от проблем, связанных с конструированием сооружения с обычными (конструктивными) материалами. Как видно из предыдущего раздела, все почвы неоднородны и их свойства не стандартны, в отличие от свойств сталей и цемента, а поэтому они должны быть исследованы в лаборатории. Это выполнить удовлетворительно трудно, так как все почвенные материалы довольно мягки и несвязанные образцы почвы разрушаются при взятии проб. В процессе взятия образца почвы она неизбежно нарушается с последующим изменением свойств. В лаборатории мягкий почвенный материал подвергается ряду испытаний, с помощью которых можно определить наиболее важные инженерные свойства. Сюда относятся опыты по определению размеров зерен

материала, содержание воды в нем и возможный его минералогический состав. Из этих опытов могут быть установлены и некоторые другие свойства, такие, как сжимаемость и прочность, но обычно для этого необходимо провести дополнительные специальные механические испытания.

Хотя почва под действием увеличивающейся нагрузки непрерывно деформируется вплоть до давления, при котором отмечается разрыв, приходится из-за трудности анализа процесса прогрессирующей деформации рассматривать его, как это делают обычно, при двух режимах постоянных нагрузок. Первый из них — это точка разрыва. Необходимо сконструировать основания и фундаменты сооружений, находящихся в соприкосновении с землей, таким образом, чтобы почва не ускользала и не проваливалась под приложенной нагрузкой — строением. Второй режим —

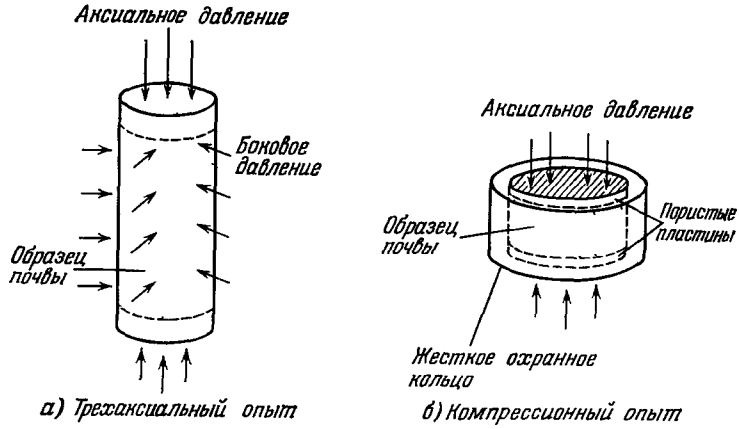

Рис 10 Два типа установок, обычно применяемых для исследования механических свойств почвы.

это деформация без разрушения. Хотя нагрузки, прикладываемые к грунту, могут быть не настолько велики, чтобы разрушить почву под сооружением, но почва может деформироваться либо немедленно, либо с течением времени до такой степени, что могут получиться недопустимые смещения и оседание строения. Эти смещения могут вызвать заклинивание дверей, разрушение трубопроводов, повреждение лифтов, трещины в стенах и даже разрушение стальных и цементных частей сооружения. Эти два типа испытаний, которые в основном применяются для определения свойств почвы в одном или обоих возможных режимах иллюстрируются на рис. 10. Первое — это так называемое «трехосевое испытание», в котором, как видно из рис. 10, *а*, цилиндрический образец почвы помещен в резиновую мембрану и подвержен сперва всестороннему давлению. Это давление приблизительно равно боковому давлению в грунте на глубине, из которой был взят образец. Затем к образцу прикладывается аксиальная нагрузка и измеряется деформация его при постепенном увеличении аксиальной нагрузки вплоть до разрушения образца. Имеется ряд вариантов этого рода опыта, которые применяются на практике, в зависимости от того, изменяется или сохраняется объем образца при приложении нагрузки. Так как у большинства почв поры наполнены водой, имеется возможность осуществить контролируемый способ высушивания образца Такие опыты называются «высушенные» или «невысушенные» соответственно тому, дают ли воде возможность уйти из почвы или войти в нее.

Так как условия напряжения в трехаксиальном опыте являются довольно специфическими условиями аксиальной симметрии, в то время

как естественные почвы подвергаются различным трехмерным режимам давления, то значительное число исследований было посвящено конструированию испытательного оборудования, способного создать для почвы рабочие условия с возможно более естественным состоянием напряжений. Один такой прибор, изобретенный автором и одним из его сотрудников, изображен на рис. 11. Почти идентичное оборудование, в котором 4-дюймовый куб почвы может испытываться при различных давлениях, приложенных к трем парам сторон, было независимо сконструировано русскими исследователями *). На рис. 11 представлена экспериментальная установка, используемая при почвенных исследованиях в Калифорнийском технологическом институте. Для определения величины общей деформации в глинах, которая может со временем получиться после сооружения здания, часто используется показанный на рис. 10, *б* «опыт с затвердеванием». Здесь образец снова имеет форму цилиндра и заключен в жесткое опорное кольцо (вместо резиновой мембраны, фигурирующей в трехаксиальном аппарате). Аксиальное давление прикладывается к почве посредством пористых камней в верхней части и на дне образца; это позволяет воде испариться из почвы при сдавливании почвенных зерен под нагрузкой. Вначале при приложении увеличенной нагрузки давление в воде, которая по существу несжимаема, возрастает до степени выравнивания с приложенным давлением. Так как дренаж может происходить только у верхней границы и дна, то возникает зависящий от времени процесс диффузии (аналогичный тепловому и другим диффузионным процессам), поскольку давление воды снижается сначала у этих границ, а затем по направлению к центру образца. С уменьшением водяного давления приложенная нагрузка перемещается на почвенный скелет, который сжимается. В насыщенной почве сумма давлений в воде и почвенном скелете всегда равна приложенному давлению. Этот процесс изменения давления и сжимаемости называется «компрессией». В компрессионном опыте к образцу прикладывается последовательно увеличивающаяся нагрузка в пределе, который должен развиваться в предполагаемой структуре. Зависящее от времени сжатие, так же как конечная стационарная деформация, измеряется при своей соответствующей нагрузке. Первая из них дает информацию, из которой может быть сделан расчет о том, сколько

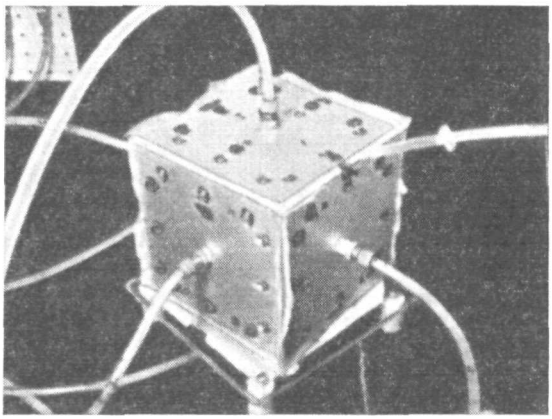

Рис. 11. Экспериментальная установка, используемая при почвенных испытаниях в Калифорнийском технологическом институте.

*) В СССР известен ряд подобных приборов различной модификации, предназначенных для работы в лабораторных условиях, более прецизионных. Обзор соответствующих методик читатель может найти, например, в работах: Н. В. Щукин, Электрификация сельского хозяйства № 1 (1950); П. У. Бахтин, Труды Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева 14 (1954); П. У. Бахтин, Динамика физико-механических свойств почв, М., Изд-во АН СССР, 1954; А. И. Оганесян, Почвоведение. Удельное сопротивление почвы и методы его определения, Ташкент, 1955. (*Прим. ред.*)

времени предполагаемая структура будет оседать, а конечное давление используется при расчете величины оседания.

На рис. 12 представлены типичные случаи поведения почвы в трехаксиальном и компрессионном опытах.

Поведение почвы в трехаксиальном и компрессионном опытах очень чувствительно, особенно в некоторых глинах, к величине разрушения (разрушение, деформация, высушивание или температурные изменения), которые претерпевает образец при бурении, взятии пробы, транспортировке, хранении и процессах лабораторной обработки. Для более надежного

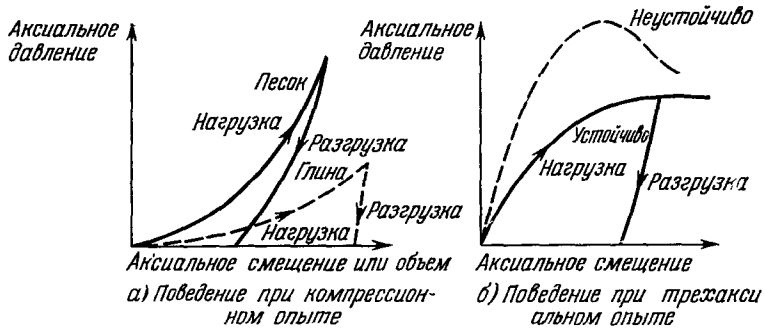

Рис. 12. Типичные примеры поведения почвы в трехаксиальном и компрессионном опытах.

предвидения изменений, которые может претерпеть строение, следует принимать на каждой ступени исследования специальные меры для избежания нарушения образца. Типичные реакции для песка и глины в компрессионном опыте на той стадии трехаксиального опыта, когда окружающее давление применяется с дренированием, изображены на рис. 12, *а*. На этой диаграмме дано только конечное сжатие при каждой нагрузке и видно, что каждая почва становится жестче при увеличивающихся давлениях, когда зерна прижимаются теснее одно к другому. Повышенная плотность почвы и увеличивающееся число связей между частицами дают почве увеличенную прочность при более высоких давлениях. Итак, когда глина уплотняется под тяжестью строения, она становится прочнее. В песке, как это было описано ранее, при снятии нагрузки прочность уменьшается, но в глине часть увеличившейся при большей нагрузке прочности сохраняется. Этот факт используется в некоторых схемах конструирования, заключающегося в дополнительной нагрузке, которую может оказать масса почвы, добавляемая к глине, первоначальная прочность которой неприемлемо мала. Глина уплотняется и упрочняется под дополнительной нагрузкой, которая убирается через некоторое время, так что на этом месте может быть воздвигнуто проектируемое сооружение. При сооружении здания используются преимущества увеличившейся прочности глины. Эта зависимость прочности от давления не имеет места при использовании промышленных материалов — стали и цемента, прочность которых по существу не зависит от приложенной нагрузки.

На рис. 12 показано поведение почвы в течение испытания на прочность или на срезывающее усилие в трехаксиальном (или другом предназначенном для испытания на срез аппарате). Когда нагрузка увеличивается, то вырастает и деформация, сначала почти пропорционально нагрузке, но затем с увеличивающейся скоростью, пока, наконец, материал деформируется при постоянной разрушающей нагрузке. Эта нагрузка отражает

максимальную прочность почвы при условиях производимого опыта. Почва действительно становится мягче, когда нагрузка увеличивается: на соответствующей диаграмме поведение стали в подобном опыте представилось бы линией, проходящей очень близко к вертикальной оси. Наклон линии для стали был бы в несколько тысяч раз больше наклона кривой, построенной для почв, а разрушающая нагрузка для мягкой стали примерно в тысячи раз превосходила бы нагрузки для почвы в нормальных пределах инженерных давлений.

В беспорядочных песках, некоторых глинах и искусственно уплотненных почвах, используемых для строительства набережных и дамб, почва ведет себя стабильно в продолжение опытов, ведущихся со срезывающими усилиями, что отражено кривой «устойчиво» на рис. 12, *б*. Однако плотные пески и хлопьевидные глины, образованные в морской среде, реагируют на опыт среза так, как показывает кривая, обозначенная «неустойчиво» на том же рисунке. Эти две кривые примерно описывают поведение длинной стальной полосы или колонны при растяжении и сжатии соответственно. При натяжении полоса растягивается до тех пор, пока она совпадет с относительно стабильной кривой напряжения в зависимости от растяжения, в то время как под сжимающей силой она слегка уменьшается в длине, пока при определенной нагрузке не сгибается. После изгибания колонна может противостоять только относительно небольшой нагрузке.

Нестабильное поведение почв важно в ряде практических обстоятельств. Например, в некоторых склонах холмов верхние почвенные слои с течением времени медленно деформируются под тяжестью из-за процесса, называемого «оползнем». На определенной глубине почва может обладать нестабильными деформационными напряжениями среза, так что при продолжающемся оползании склона в результате подрыва рекой основания или нижней части состояние напряжения от растяжения нижележащего слоя почвы проходит выше пика нестабильной кривой. Так как компонента тяжести нижней части холма относительно постоянна, ослабление прочности почвы благодаря процессу оползания может в конечном счете достичь стадии, описываемой нестабильной кривой рис. 12, *б*; это означает, что существующая прочность превышена. Движение поэтому ускорится, но видно, что увеличивающаяся деформация приводит даже еще к меньшей прочности. Следовательно, оползание усиливается до тех пор, пока склон холмов сползет вниз до нового положения равновесия. Такие разрушения холмов могут быть катастрофическими. Нестабильное поведение приводит также к прогрессирующим аварийным состояниям, развивающимся в почвах в других ситуациях, когда превышается наивысшая прочность почвы в одном районе и одновременно почва ослабляется и повышенная нагрузка падает на соседние участки почвы, которые в свою очередь могут ослабнуть и разрушиться. Итак, вся масса почвы может постепенно разрушаться под нагрузками, вызывающими напряжения, величина которых лежит значительно ниже наивысшей прочности материала.

Итак, в типичной задаче инженерного почвоведения определяется форма и распределение нагрузки от инженерного сооружения; далее программа решения задачи предполагает взятие проб и определение пространственного распределения нижележащих слоев почвы, а лабораторные испытания дают сведения о необходимых свойствах различных типов почв. Следующей задачей инженерного почвоведения является решение общих комплексных проблем механики, определяющих смещения и напряжения в почве, и обоснование того, что сооружение может быть воздвигнуто и будет существовать в безопасности без функциональных разрушений.

5. ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА СООРУЖЕНИЙ НА ПОЧВАХ

Ситуация, которая иллюстрирует некоторые трудности, присущие анализу механического состояния и поведения почв, изображена на на рис. 13, *а*. Здесь показана в поперечном сечении длинная плоская опора, которая переносит нагрузку в стене P (на каждую единицу длины) нижележащих слоев почвы. В реальной практике такие опоры ставятся на некотором расстоянии ниже поверхности грунта и состоят из прямоугольных опор, поддерживающих колонну, но рассматриваемая и изображенная на рис. 13 двумерная конфигурация достаточна для анализа возникающих здесь вопросов. Типичный грунт состоит из неоднородно связанных слоев различных материалов, положение которых при данном их распределении обычно определяется посредством сверления отверстий на расстоянии 20—100 футов одно от другого. Схема задачи инженерного почвоведения состоит из (рис. 13): а) опоры, покоящейся на земле; б) идеальной картины механики разрушающей нагрузки; в) идеальных условий для расчета оседания.

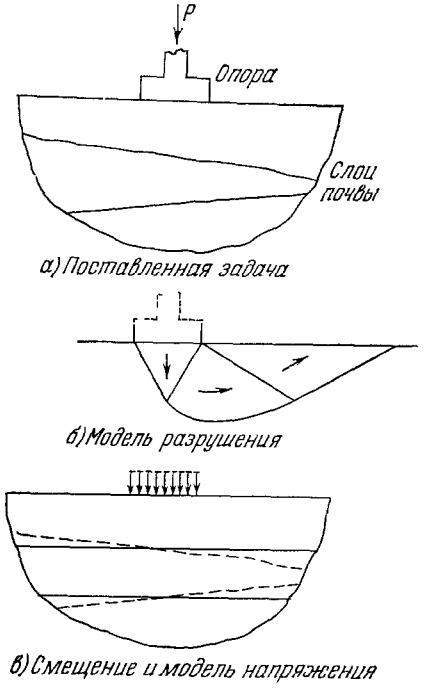

Рис. 13. Постановка задачи в инженерном почвоведении.

а) Основание, покоящееся на грунте, *б*) идеализированная схема анализа разрушающей нагрузки, *в*) идеальные условия для расчета осадки

Отверстия сверлятся на более близких расстояниях, если предварительное сверление показывает, что расположение почвенных слоев неравномерно по толщине и площади. Обычно только несколько образцов почвы из различных слоев испытываются на механические свойства в лаборатории. Инженерная задача заключается в определении P, или, в качестве альтернативы, ширины опоры, требующейся для поддержки величины P, которая должна быть использована инженером-строителем, конструирующим здание, поддерживаемое этой стеной. Хотя нагрузка P, которая вызовет разрушение почвы под опорой, является важной, более часто используемым критерием, который диктуется особенностями сооружаемого строения, является оседание опоры или разность между оседаниями двух соседних опор, которая не должна превышать определенной заранее величины. Это требование обеспечивает то, что строение не перенапрягается от грунтовых смещений.

Хотя реальная почва проходит через последовательный ряд увеличивающихся напряжений (типа изображенных на рис. 12) вплоть до разрушения, вычислительные трудности делают невозможным определить это поведение аналитически и промышленная индустрия все еще придерживается приближений Терцаги, рассматривающих две отдельные проблемы: деформацию и разрушение.

Для расчета максимальной нагрузки, которую может выдержать почва под фундаментом, принята модель, заимствованная и принятая из теории пластичности металлов. Эта модель изображена на рис. 13, *б*. Предполагается, что вообще не происходит никаких деформаций до тех пор,

пока при разрушающей нагрузке опора совместно с почвенным клином, воздействуя на почву, смещает ее на одну сторону через имеющую форму веера область разрушения. Разрушающая нагрузка почвы используется в соответствующих расчетах, которые дают наибольшее значение величины нагрузки, требуемой для оценки механизма проникновения фундамента. Сначала этот расчет, который предполагает нелинейность задачи, был сделан приближенно, поскольку невозможно было принять во внимание наличие слоев почвы различной прочности в районе разрушения. Теперь в пределах идеализации поведения материала возможно с помощью вычислительного устройства выполнить более точные численные расчеты, включающие слои с различными свойствами. Однако вместе с увеличением нашей возможности производить лучшие расчеты в идеализированной модели влияние неточностей, вытекающих из сравнения принятых нами условий и условий, при которых разрушается реальная почва в трех измерениях естественных режимов, становится более важным. Эти и другие рассуждения о деформации, которые будут рассматриваться ниже, привели в последние годы к повышенному интересу и более реалистическому определению факторов, влияющих на прочность почв.

Вопрос смещений, происходящих под фундаментами, рассматривается отдельно и проиллюстрирован на рис. 13, *в*. Здесь снова из-за математических трудностей поведение лежащей под фундаментом почвы сводится при всех условиях напряжения к поведению линейно упругого материала, однородного и изотропного; в схеме не рассматривается возможность разрушения материалов. В этом случае применяется аналитическое решение, полученное Буссинеском для смещений (и нагрузок) в полуограниченном массиве, находившемся под линейной нагрузкой у поверхности. Принято, что нагрузка приложена равномерно к грунту на полосе, ширина которой равна ширине фундамента. В действительности истинное распределение нагрузки между поверхностью грунта и фундаментом должно быть при решении проблемы учтено, но это затрудняет получение аналитического решения.

Смещения и напряжения в почве под нагрузкой, имеющей форму полосы, получены посредством интегрирования решения Буссинеска с линейной нагрузкой по ширине полосы. Встречаются некоторые трудности из-за математического характера полученного выражения для вертикальных смещений или оседания поверхности, но эти трудности обходятся путем рассмотрения оседания у фундамента как произвольно малой величины оседания на некотором расстоянии от фундамента. Конечно, признано, что решение таким образом сформулированной проблемы весьма отличается от точного, призванного учесть реальные почвенные профили, и в более поздних теоретически целенаправленных исследованиях делались значительные попытки получения математических решений проблемы, путем включения трех почвенных слоев с различными, но все же линейно упругими свойствами. Рассматривались, кроме того, круговые и эллиптические поверхности под нагрузкой, так же как и нагрузки от фундаментов, которые считаются линейно упругими.

На практике для малых обычно применяемых размеров фундаментов получено так много экспериментальных данных относительно их оседания в различных типах почв, что исследования почвы и информация, полученная в некоторых простых механических испытаниях, выполненных путем взятия проб и сверления, достаточны для оценки допустимой нагрузки или давления, которая не вызывает беспокойства. Однако расчеты вышеприведенного типа выполняются для больших или необычных фундаментов для условий оседания зданий на глинистых слоях, зависящих от времени.

В будущем такие расчеты разрушения и смещения, по-видимому, будут проводиться (за исключением грубых предварительных расчетных прикидок) с помощью счетно-решающих устройств, появившихся в последнее десятилетие. Этот метод, который может дать приближенное решение для почти точно сформулированной проблемы, в противоположность аналитическому приближению, которое дает точное решение для очень приближенной проблемы, в действительности предполагает расщепление рассматриваемой области на множество малых блоков и элементов. Механические свойства каждого элемента могут различаться, и степень приближенности решения может быть изменена тем, что принимаются малые размеры элементов для «хорошего» решения и большие для грубых приближений. Это называется «метод конечного элемента» (название возникает потому, что в аналитическом приближении рассматриваются бесконечно малые элементы). Объектом проблемы может быть только почва или почва и фундамент, или даже почва, фундамент и все строительное сооружение. В первом случае развитие метода конечного элемента, предполагающего участки с линейным упругим поведением, за последние несколько лет привело к быстрому расширению счетно-решающей программы конечных элементов, позволяющей ввести упруго-пластическое (разрушение) или даже непрерывно нелинейное поведение материала. При этом получили развитие трехмерные задачи, многие из которых были решены. Так же как в пластической задаче, рассмотрение этого метода анализа было ограничено из-за недостатка информации о свойствах почвы при обычных условиях напряжения. Это вызвало необходимость развития предварительной исследовательской работы по почвенной механике, которая концентрировалась на условиях, влияющих на разрушение почв, а не на процессах деформации вообще. Так как невозможно было рассматривать нелинейные проблемы деформации до введения счетно-решающих устройств и такой техники, как анализ методом конечных элементов, далее исследователи выполнили изучение почв с ориентацией на разрушение. Почвенники-исследователи решили базироваться на нахождении линейных упругих свойств и значении величины разрушения в каждом данном опыте с почвой.

Эта возможность производить анализы более точно в соответствии с реальным поведением материала, по-видимому, должна привести к изменению в направлении работ по крайней мере в некоторых исследованиях почвенной механики в последующие несколько лет.

На рис. 14 показано расположение ряда конечных элементов для решения различных задач, представляющих практический интерес. Хотя изображены прямоугольные блоки, возможна и форма в виде треугольников или другая полигональная форма. Так как каждому элементу могут быть приданы произвольные материальные свойства, можно видеть, что рис. 14 может довольно точно представлять геометрическое расположение и свойства почвенных слоев под фундаментом рис. 13, *а* с той степенью точности, до какой они известны. Влияние неточностей в положении и свойствах почвенных слоев может быть быстро исследовано проведением ряда решений конечных элементов. В конечном счете эта процедура тесно связана с полевой программой исследований постоянного изменения конструкции строения, если в поле встречаются различные почвы или возникают другие проблемы. В настоящее время многое сделано для улучшения конструирования приближенно, без применения вычислительной техники. Конструктивные модификации основаны на опыте или суждении руководящих инженеров.

Не все инженерные строения удается легко рассчитывать, рассматривая почву с помощью пластического или упругого анализа, так

как конструирование сооружений не включает категорически один или другой вид деформации. При этих обстоятельствах техника конструирования использовала некоторые типы основных расчетов, но основывалась главным образом на обеих моделях с учетом наиболее полных опытных

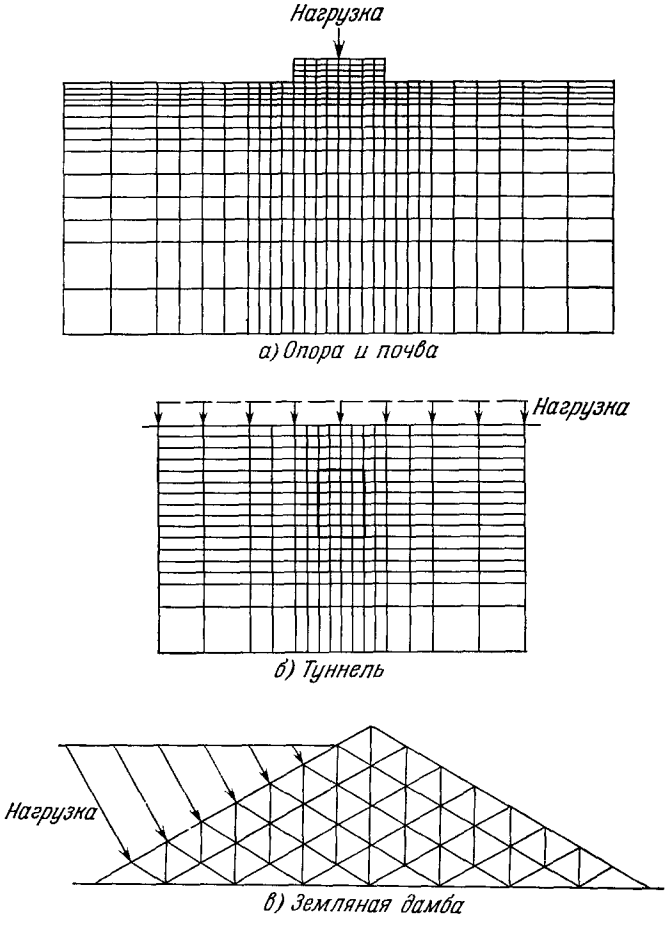

Рис. 14. Применение метода конечных элементарных представлений в различных проблемах инженерного почвоведения.
а) Нагрузка, как на рис. 13; б) подповерхностный туннель, нагруженный поверхностным грузом; в) земляная дамба с водяным давлением.

данных для получения реалистической конструктивной информации. Один из таких случаев — это подпорная стенка типа стенки в виде набора ряда плоскостей. В этом методе конструирования, который часто используется для поддерживания почвы, соседней с экскавацией, отдельные, имеющие вид плоскостей глыбы загоняются в грунт, образуя ряд в виде стенки. Глыбы, которые соединяются друг с другом своими вертикальными концами, могут быть изготовлены из цемента или из дерева, но чаще всего изготавливаются из специально прокатанных стальных секций. Для предотвращения того, чтобы стенку, продвигаемую в котлован, не накренило на одну сторону, она прикрепляется креплениями в виде стрежней к якорям, которые могут представлять собой другие цементные глыбы, внедренные в землю на некотором расстоянии за стенкой. Для образования котлована почва роется на глубину несколько меньшую, чем глубина проник-

новения стенки из плоских глыб. Конструкция стенки должна удовлетворить трем пунктам: выбору поперечного сечения плоских глыб так, чтобы они не были перегружены давлением почвы за ними; определению глубины, на которую стенка будет продвинута, для предотвращения того, чтобы глыбы были сдвинуты в котлован; уверенному обеспечению размеров крепежных стержней и якорных блоков или глыб. В этом случае взаимодействие по существу линейно упругой глыбы и крепежного стрежня с нелинейным поведением почвы, в которой напряжения могут дойти до уровня разрушения, является особенно трудной задачей для математического анализа. Один из методов конструирования заключается в расчете напряжений в системе на основании принятия условий разрушения в почве за стенкой и того обстоятельства, что стенка является жесткой. Необходимо иметь в виду, что для того, чтобы была принята во внимание способность самой стенки к изгибу, используются данные, которые уточняются в зависимости от результатов лабораторных испытаний ряда различных почв и стенок. Применялись также и другие методы конструирования. Хотя факторы безопасности обычно включаются в конструкцию для обеспечения стабильности стенки, поведение сооружения при построении не всегда следует предположениям, принятым при конструировании.

Хотя во многих задачах почвенной инженерии почва в ее естественном состоянии находится под нагрузкой от сооружения и ее свойства должны быть исследованы и известны заранее, имеется ряд ситуаций, при которых рассматриваемая почва переносится с некоторой площади, перерабатывается и укладывается при условии проверки под сооружение или сама по себе становится сооружением. Такой случай, например, бывает при строительстве аэродромов или шоссе: иногда, если под важным строением (таким, как, например, атомная станция) находится очень плохая почва, то последняя может быть заменена лучшим материалом. Самое большое использование уплотненных почвенных конструкций имеет место в земляных дамбах, некоторые из них достигают высоты от 700 до 800 *м*. Перемещение огромных масс почвы (вплоть до 100 млн. $м^3$), требующееся для этих дамб, и экономическая выполнимость этого типа конструкций стали возможными благодаря развитию за последние 40 лет (и в особенности после второй мировой войны) переносящего землю оборудования.

Земляная конструкция такого рода должна быть рассчитана так, чтобы была обеспечена устойчивость под действием собственного веса, гидростатической нагрузки и с учетом возможных в некоторых местах колебаний, которые могут быть сообщены этой конструкции землетрясениями. Кроме того, при наличии утечки воды через дамбу и ее естественный почвенный фундамент воду следует поддерживать на допустимом уровне. Проблема просачивания воды и влияние водяного давления в почвах тщательно изучались в механике почв, но здесь нет возможности для более расширенного рассмотрения этой темы.

Основным требованием при конструировании земляных дамб является плотность упаковки выбранной почвы для образования насыпи необходимой плотности и водосодержания, а следовательно, и прочности. Это осуществляется с помощью разнообразного уплотняющего оборудования, среди которого имеется устройство, известное под названием «овечьего утаптывателя». Это устройство показано на рис. 15.

Овцы издавна использовались в технике уплотнения почв, например для получения твердых полов в домах. С этой же целью на больших просторах были предприняты попытки использования слонов. Однако это по большей части оказывалось безуспешным. Слоны оказались чрезвычайно чувствительными к плотности почвы, по которой они идут, и поэтому после того, как они один раз прошли через подготовленный для них

почвенный слой, они при последующей прогулке тщательно ставили свои ноги в прежние следы. Это, конечно, не способствовало равномерному уплотнению всего слоя.

Обсудим из множественного разнообразия еще один пример для иллюстрации характера почвенных исследований. Американская программа освоения космоса включает посадку человека на Луну. Предварительной работой для этой цели явилось определение природы и механических свойств материала лунной поверхности. Хотя информация этого рода была обязательной при конструировании прилуняющихся приборов космического экипажа и для обеспечения безопасности космонавтов при передвижении по лунной поверхности, она имеет также научное значение. Так

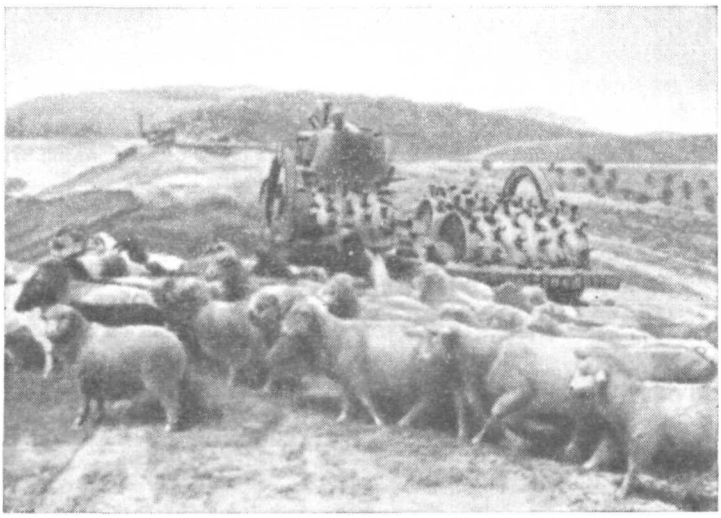

Рис. 15. Давнее изображение «овечьего утаптывателя», применявшегося при конструировании земляных дамб в Калифорнии.

как различные производимые на Земле визуальные тепловые и радарные наблюдения приводят к различным представлениям по поводу лунной поверхности, было интересно сравнить их с реальной природой этой поверхности. Кроме того, изучение свойств материала лунной поверхности при «лунных» условиях открывает различные возможности для понимания процессов, которые образуют и видоизменяют эту поверхность. Так как я был привлечен к расчетам, связанным с вдавливающими силами и глубиной проникновения в лунный грунт в предыдущих лунных экипажах, то я предложил НАСА в 1963 г., чтобы на Луне был произведен опыт по изучению механических свойств почвы с помощью спутника с мягкой посадкой. Это предложение в конечном счете привело к внедрению прибора по изучению механических свойств почвы и образцов поверхности почвы на успешно прилунившихся спутниках III и VII, где они работали с апреля 1967 г. до января 1968 г. В течение всего времени работы оборудования во время полета в Калифорнийском технологическом институте в аэродинамической лаборатории я и мой коллега наблюдали за образцами поверхности на этих экипажах для того, чтобы получить ряд опытных данных на лунном материале. Сюда относились опыты по способности почвы к переносу, копке траншей, взвешиванию скалистых минералов и взаимодействию нашего прибора с прибором по химическому

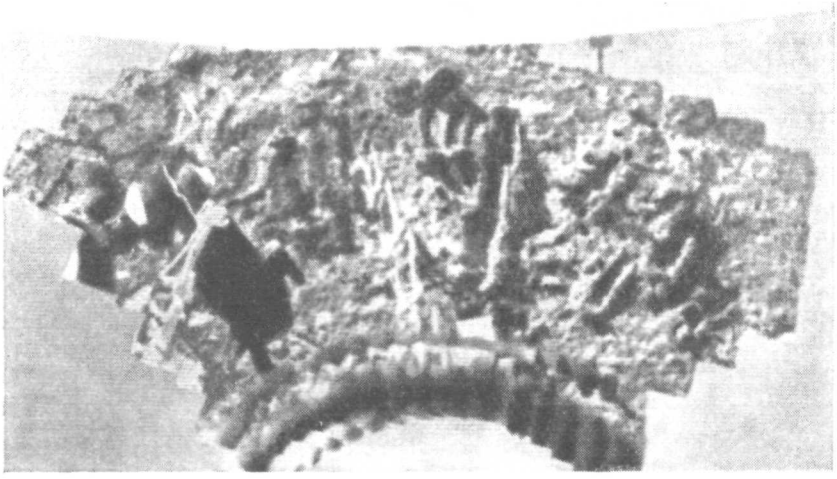

Рис. 16. Панорама лунной поверхности после испытания с помощью прибора, установленного на «Surveyor VII».

Мозаичная телескопическая картина сделана с помощью космической телевизионной камеры. Прибор, расположенный на поверхности, прокапывает подповерхностный слой лунной почвы, на которой затем будет помещен α-рассеивающий аппарат (ящик слева сверху).

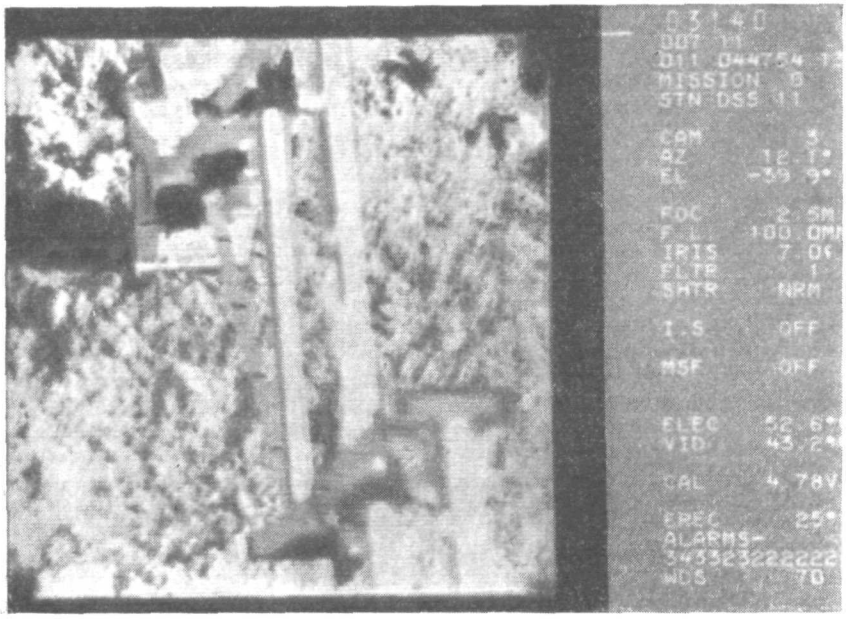

Рис. 17. Картина, полученная «Surveyor VIII» при опыте с переносом прибора, расположенного на поверхности.

В этом опыте прибор вводится в лунную почву повторяющимися командами с Земли. Сила, требуемая для передвижения прибора при каждой команде, записывается, и увеличение достигнутого проникновения измеряется из последовательности съемок. Таким образом, для каждого опыта может быть построен график силы проникновения; это используется для расчета свойств лунной поверхности. Числа справа дают масштаб координат и информацию с камеры.

анализу (на спутнике VII), а также для установления возможности изучения как минералов на поверхности, так и подповерхностного материала (рис. 16 и 17). Результаты по изучению образцов поверхности подтверждают наблюдения, сделанные на спутнике I (на котором имелась телевизионная камера, но не было точной экспериментальной аппаратуры) о том, что лунная поверхность состоит из зернистого материала, образованного главным образом от ударов метеоритов, а возможно, и вулканическими процессами; кроме того, появилась добавочная подробная информация по механическим свойствам поверхности почвы. В конечном счете материал лунной поверхности до глубины нескольких десятков миллиметров имеет свойства, подобные сухой, умеренно плотной тонкой илистой или песчаной земной почве, содержащей небольшое количество связки. Плотность изученного лунного минерала оказалась близкой к плотности обычной твердой скалы и, таким образом, не была сильно пористой или пемзообразной. Природа почвы такова, что она не представит сложных механических проблем ни для прилунения лунного корабля конструкции, разработанной в США, ни для мобильности астронавтов на поверхности Луны. Возможно, однако, что произойдет нарушение поверхности от обратного реактивного выхлопа в течение последней стадии спуска, и это может на некоторое время ослабить видимость.

С тех пор как была написана эта статья, на Луне впервые прилунились люди — астронавты США Н. Армстронг и Э. Олдрин. Малая глубина проникновения подставок из лунного отсека в лунную почву, мобильность обоих астронавтов по поверхности и легкость, с которой они могли брать пробы почв, указывает на правильность предсказаний, полученных от полетов спутников. Предварительное исследование почвы с лунной поверхности, которую привезли астронавты, указывает на то, что ее свойства близки к свойствам земных почв от ила до тонкого песка, хотя имеются части и более крупных минералов.

ЛИТЕРАТУРА

Механика почвы и инженерное почвоведение

1. R. F. Scott, Princeples of Soil Mechanics, Reading, Mass. Addison-Wesley, 1963.
2. R. F. Scott, I. I. Schoustra, Soil: Mechanics and Engineering, New York, McGraw-Hill, 1968.
3. K. Terzachi, Theoretical Soil Mechanics, New York, Willey, 1943.
4. K. Terzachi, R. B. Reck, Soil Mechanics and Engineering Practice, 2nd Ed., New York, Wiley, 1967.
5. O. C. Zienkiewicz, Y. K. Cheung, The Finite Element Method, New York. McGraw-Hill, 1967.

Поверхность Луны

1. R. F. Scott, Scient. Amer. **217** (5), 34 (1967).
2. R. F. Scott, F. I. Roberson, J. Geophys. Res. **73**, 4045 (1968). («Surveyor III»).
3. R. F. Scott, F. I. Roberson, Surveyor VII Mission Report, part 2, Science Results, NASA JPL TR 32-1264 (March), p. 135 («Surveyor VII»).

ОТ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Обзорная статья Рональда Скотта, современного американского исследователя, активно работающего в области изучения почв, носит в оригинале более широкое название, а именно: «Физика и механика почвы». В действительности речь идет лишь о некоторых весьма ограниченных физико-механических свойствах и при этом по большей части с уклоном в сторону их механических особенностей. Таким образом, остается вне рассмотрения очень широкий круг поистине физических проблем, таких, как физико-химическая структура почвенных частиц, гидрофизика, теплофизика, электрофизика почв, термодинамический и молекулярный аспект исследования почвенных систем, а также все задачи естественной и искусственной радиоактивности в почвенном

массиве и, кроме того, обширный раздел методики исследования этого объекта, в том числе основанной на атомных и ядерных принципах.

Для читателя УФН, по-видимому, интерес к содержанию статьи Р. Скотта сужи вается еще и потому, что в соответствии со своими личными вкусами автор много внимания уделяет вопросам инженерного почвоведения. Вместе с тем автор, непосредственный участник изучения образцов лунных почв, был привлечен администрацией НАСА для исследования структуры, прочности, дисперсности этих образцов. Более того, он разработал прибор, который был принят на вооружение при оценке механических свойств лунного материала. Это позволяет ему высказать ряд соображений, правда в беглом виде и качественного порядка, о характере почвоообразования на нашем спутнике и других планетах. Любопытен также и иллюстративный материал, относящийся к панораме лунной поверхности, представленный автором в результате обработки данных, полученных его прибором во время действия американских спутников I, III, VII. Совершенно естественно, что теперь, после доставки лунного грунта советским спутником «Луна-16», посадки «Луна-17» и работы управляемого с Земли «Лунохода-1» удастся получить новые и важные сведения о лунном грунте и его естественном сложении, о характере микрорельефа и о степени и характере изменения грунта на пути перемещения лунного автомата.

Отмеченный здесь аспект обусловил решение редакции УФН поместить перевод этой статьи. Недостаток же в анализе других многообразных вопросов физики почв частично может быть скомпенсирован дополнительным списком литературных ссылок, приведенным здесь и в примечаниях к тексту, а также стремлением в недалеком будущем поместить в УФН более физическое и более обширное изложение основных проблем физики почвы.

А. Ф. Чудновский

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Кин, Физические свойства почвы, под ред. А. Ф. Иоффе, ГТТИ, 1933.
2. П. В. Вершинин, Б. П. Константинова, Физико-химические основы структуры почвы, под ред. А. Ф. Иоффе, 1935.
3. L. D. Baver, Soil Physics, New York, 1948.
4. Э. Д. Рэссел, Почвенные условия и рост растений, М., ИЛ, 1955.
5. В. Г. Шоу, Физические условия почвы и растения, М., ИЛ, 1955.
6. П. В. Вершинин, М. К. Мельникова, Б. Н. Мичурин, Б. С. Мошков, Н. П. Поясов, А. Ф. Чудновский, Основы агрофизики, под ред А. Ф. Иоффе, М., Физматгиз, 1960.
7. А. Ф. Чудновский, Что такое агрофизика, М., Физматгиз, 1963.
8. А. Ф. Иоффе, Физика и сельское хозяйство, М.— Л., Изд-во АН СССР, 1955
9. И. Б. Ревут, Физика почвы, Л., «Колос», 1964.
10. С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский, Физика почвы, М., «Наука», 1967