

В. И. ДРУЖИНИНСКАЯ, В. В. МАРКАЧЕВ, А. В. СЕМЕНОВ,
Ю. А. СУРКОВ, И. И. ЧЕРКАСОВ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

(Представлено академиком А. Ю. Ишлинским 30 III 1971)

Для исследований была выделена проба реголита, доставленного автоматической станцией «Луна-16» 24 IX 1970 г. По гранулометрическому составу исследуемый образец относится к пылеватому песку. Хранение до начала испытаний проводилось в атмосфере гелия.

Исследования были начаты 11 XI 1970 г. в среде химически чистого гелия при нормальном атмосферном давлении и температуре $+20^{\circ}\text{C}$ с помощью прибора TOP-1^(*). Измерения проводились частично наблюдением сквозь иллюминаторы, а в основном с помощью электротензометров типа ФКП, наклеенных на стальные измерительные балки, с использованием усилителя 8АНЧ-7М и самописцев типа ПС1.

Вакуумная камера TOP-1 была оборудована люком с резиновой перчаткой, пользуясь которой оператор мог открывать и закрывать контейнер с грунтом, насыпать грунт в приборы, взвешивать его, уплотнять и производить другие манипуляции. Вследствие ограниченного объема грунта, полученного для исследования, были построены миниатюрные приборы, размеры которых в несколько раз меньше размеров стандартных приборов, применяемых для тех же целей в грунтовых лабораториях.

Для определения объемного веса в рыхлом насыпном состоянии, грунт пересыпали в прозрачный градуированный стаканчик внутренним диаметром около 1 см, с последующим разравниванием поверхности. По высоте слоя грунта и заранее известному весу пробы вычисляли объемный вес рыхлого грунта. Для определения объемного веса в уплотненном состоянии та же проба подвергалась 50-кратному постукиванию дна стаканчика о металлическую плиту, причем высота слоя уменьшалась и определялась заново. Каждый из этих опытов повторяли два раза.

Дополнительное определение объемного веса проводилось при определении сжимаемости в металлическом стаканчике таких же размеров после приложения вертикального сжимающего напряжения, равного $0,85\text{ кг/см}^2$. Было проведено два таких опыта. Измерение объема при этом осуществлялось по погружению уплотняющего поршня.

Схема измерительного узла для определения сжимаемости представлена на рис. 1. Заранее отвешенный грунт 11 насыпали без уплотнения в металлический стаканчик 10 глубиной 1,5 см и диаметром 1 см. Избыток грунта удаляли и учитывали дополнительным взвешиванием. Уплотняющим орудием служил цилиндрический штамп 5 с плоской подошвой, шарнирно укрепленный на жесткой тензометрической балке 4, установленной на рычаге 2 прибора. Вторая тензометрическая балка 7, значительно меньшей жесткости, соединена со щупом 9, предназначенным для измерения глубины погружения штампа в стакан. Рычаг 2 может подниматься и опускаться, вращаясь вокруг горизонтальной оси 1. Усилие, действующее на штамп, определялось показаниями тензометра 3, а глубина погружения — тензометром 8. По результатам опыта вычерчивалась кривая (рис. 2а) зависимости глубины S погружения штампа от среднего сжимающего напряжения p в грунте. Рассматривая слой грунта в стаканчике как равномерно нагруженный и пренебрегая трением о стенки, можно

вычислить коэффициент относительной сжимаемости для отдельных участков кривой ⁽³⁾:

$$a_0 = S / (hp), \quad (1)$$

где h — высота слоя грунта в начале участка, p — приращение среднего сжимающего напряжения на рассматриваемом участке кривой; S — приращение глубины погружения штампа на том же участке.

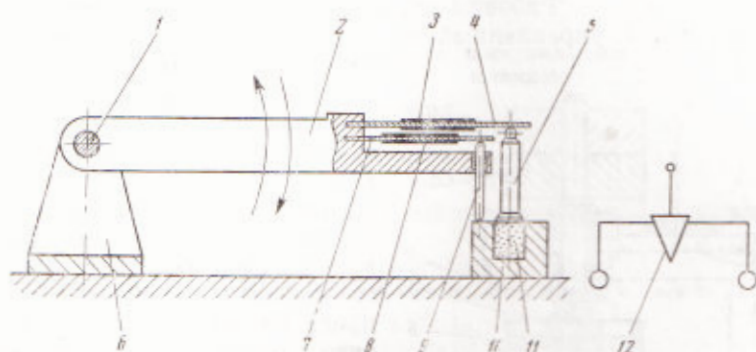


Рис. 1. Схема измерительных узлов для определения сжимаемости и удельного сопротивления пенетрации

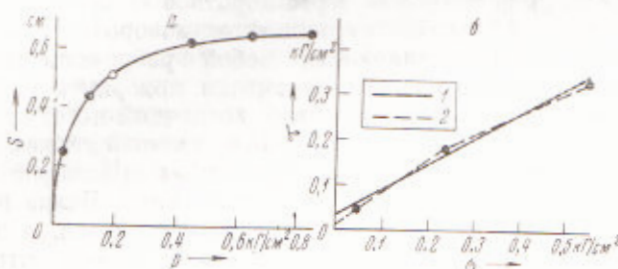


Рис. 2. *a* — зависимость между средним давлением в подшоше штампа p и глубиной погружения штампа S ; *b* — зависимость между нормальным напряжением σ и предельным сопротивлением вращательному срезу τ ; *Г* — осреднение для трех различных нормальных напряжений, 2 — то же для начального участка

Было замечено, что рыхлый грунт быстро уплотнялся до того момента, когда давление приблизится к $p = 0,2 \text{ кг/см}^2$. После этого сжимаемость резко уменьшается. Поэтому коэффициент относительной сжимаемости a_0 вычисляли для условий $0 < p < 0,2 \text{ кг/см}^2$ и $0,2 < p < 0,85 \text{ кг/см}^2$.

Схема узла определения удельного сопротивления пенетрации (рис. 1) аналогична схеме прибора для определения сжимаемости, но рабочим органом служил не цилиндрический штамп, а балансирный конус 12. Конус сделан из полированной стали, имеет угол при вершине $\alpha = 30^\circ$ и вес, вместе с балансирной подвеской, $g = 20,5$ г. Измерение глубины погружения конуса производится щупом 9 с помощью тензометра 8, определение момента прекращения внедрения конуса в грунт под действием его веса производилось по нулевому отсчету тензометра 3 на балке 4, к которой подвешен конус.

Опыты выполнялись с грунтом в рыхлом насыпном и уплотненном состояниях. Удельное сопротивление пенетрации определялось по формуле

$$R = kg / (\pi z^2 \text{tg}^2 \frac{1}{2} \alpha), \quad (2)$$

где z — глубина внедрения конуса, k — коэффициент, учитывающий влияние стенок предметного стаканчика прибора на сопротивление пенетрации.

При внутреннем диаметре стаканчика с грунтом $d = 1,13$ см и указанных выше размерах конуса для уплотненного вулканического песка $k = 0,33-0,45$.

Схема узла определения сопротивления вращательному срезу представлена на рис. 3. Рабочим органом прибора служил горизонтальный ребристый диск 4, укрепленный на вертикальном шпинделе. Грунт 5 помещали в металлический стаканчик 6 с ребристым дном. Стаканчик мог вращаться вокруг вертикальной оси с помощью внешнего привода. Внутренний диаметр стаканчика 1,3 см, наружный диаметр ребристого диска 1,1 см, высота слоя грунта между гребнями ребер диска и дна стаканчика не менее 6 мм. Грунт предварительно просеивали сквозь сито с отверстиями 0,2 мм. После насыпания грунт уплотняли постукиванием, а затем наложением двух грузов ($p_{\text{упл}} = 0,55 \text{ кг/см}^2$), которые через короткое время снимались. В результате поворота грунт увлекает за собой ребристый диск, который стремится повернуть шпиндель. Однако последний несет на себе муфту с горизонтальной гибкой тензобалкой 1, другой конец которой упирается в стопорный винт. Балка препятствует повороту шпинделя, а ее тензометр 2 позволяет определить крутящий момент M , возникающий на шпинделе вследствие трения и сцепления в грунте при повороте стаканчика 6.

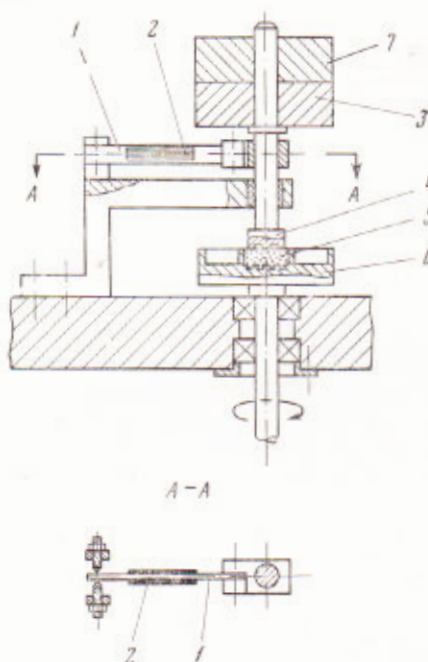


Рис. 3. Схема измерительного узла для определения сопротивления вращательному срезу

С увеличением угла поворота момент растет, и, наконец, происходит срез грунта. Изменяя вертикальную нагрузку на ребристый диск с помощью накладывания грузов 3 и 7, можно проводить опыты при трех различных значениях сжимающего напряжения σ и получать соответственно три значения τ . По результатам опытов вычисляли предельное сопротивление сдвигу для каждого из трех случаев и строили диаграмму зависимости между вертикальным сжимающим напряжением σ и предельным сопротивлением сдвигу τ (рис. 2б), по которой обычным методом определяли угол внутреннего трения и сцепление грунта.

Предельное сопротивление сдвигу вычисляли по формуле (1)

$$\tau = 2M / (\pi r^3), \quad (3)$$

где r — радиус ребристого диска.

На рис. 2б представлены результаты шести опытов. Осредненная зависимость предельного сопротивления сдвигу от вертикального сжимающего напряжения принята в форме Кулона

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ — угол внутреннего трения грунта; C — сцепление (параметр линейности).

Таблица 1

Исследуемый параметр	Состояние грунта	Значение измеряемого параметра
Объемный вес γ , г/см ³	Рыхлый Уплотненный постукиванием » штампом	1,26 1,90 2,21
Удельное сопротивление пенетрации R , кг/см ²	Рыхлый Уплотненный постукиванием » штампом	<0,020 0,25 0,28
Коэффициент относительной сжимаемости a_v , см ² /кг	На интервале $0 < p < 0,2$ кг/см ² На интервале $0,2 < p < 0,85$ кг/см ²	1,73 0,21
Угол внутреннего трения φ	Уплотненный постукиванием	29°30' (35°30')
Сцепление, кг/см ² C	» »	0,030 (0,010)

Примечание. Числа в скобках относятся к начальному участку кривой на рис. 2а, числа без скобок — к кривой в целом.

Результаты всех испытаний приведены в табл. 1. Учтенные погрешности измерений, составляющие в среднем около $\pm 5\%$ от измеряемых величин, обусловлены неточностями отсчета высоты слоя грунта в мерном стаканчике и колебаниями показаний электротензометров. Помимо этих погрешностей могли возникнуть систематические ошибки, которые должны были приводить к некоторому занижению значений коэффициента относительной сжимаемости грунта, величин сцепления и угла внутреннего трения за счет масштабных факторов. Влияние последних уточняется.

Авторы благодарят акад. А. Ю. Ишлинского за обсуждение работы и А. И. Еденина, В. М. Крылова и В. В. Дымова за ценную помощь в экспериментах.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт оптико-физических измерений
Институт геохимии и аналитической химии
им. В. А. Вернадского
Академии наук СССР

Поступило
10 III 1971

Московский институт инженеров транспорта
Московский инженерно-строительный институт

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ А. Н. Зеленин, Г. Н. Карасев, Л. В. Красильников, Лабораторный практикум по резанию грунтов, М., 1969, стр. 123. ² Н. А. Цытович, Механика грунтов, М., 1968, стр. 176. ³ М. П. Дрожжина, В. В. Дымов и др., ДАН, 199, № 5 (1971).