

УДК 539.37

© 1990 г.

А. П. БОБРЯКОВ, А. Ф. РЕВУЖЕНКО

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ИСПЫТАНИЯ НЕУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Предлагаются новые методика и прибор для исследования деформационных свойств неупругих материалов при сложном нагружении. Рассматриваются результаты по изучению напряжений и дилатансии сыпучих сред. Исследован вопрос о разнесности тензоров напряжений и скоростей деформаций.

1. Методика. Одна из основных проблем механики неупругих сред сводится к построению математических моделей деформирования и определению соответствующих параметров среды. В феноменологической теории эти задачи могут быть решены только на основе экспериментальных фактов. Чем проще картина деформирования в эксперименте, тем больше он подходит для построения математической модели. Идеальной является самая простая ситуация, когда в образце создается однородное распределение напряжений и деформаций. В этом случае по известным на границе перемещениям и усилиям деформации и напряжения внутри образца восстанавливаются непосредственно (без решения краевой задачи) и — главное — независимо от реологии материала [1].

Достичь в точности однородного состояния практически невозможно. Поэтому экспериментальная проблема сводится к реализации состояний, близких к однородным. Для металлов соответствующая методика хорошо разработана. Она состоит в деформировании тонкостенных трубчатых образцов [2, 3]. Однако для широкого класса материалов эта классическая методика неприменима. К таким можно отнести сыпучие и вязкие грунты, порошки, эластичные жидкости и др. Один из возможных способов и методика исследования подобных материалов изложены в [4]. Ниже рассматривается реализация этой методики для сыпучих сред, вязких жидкостей и их смесей.

В [4] предложены испытания путем однородного нагружения с непрерывным поворотом направлений сжатия и растяжения образца. При этом процесс деформирования осуществляется с постоянной скоростью и может продолжаться сколь угодно долго без изменения размеров образца. (Все инварианты тензора скоростей деформаций — постоянны, а главные оси — непрерывно поворачиваются).

Для осуществления такого процесса образцу материала необходимо придать эллиптическую форму (деформация плоская) и на его границе задать вектор скорости v , удовлетворяющий закону Кеплера:

$$(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) = 0, |\mathbf{v} \times \mathbf{r}| = \text{const} \quad (1)$$

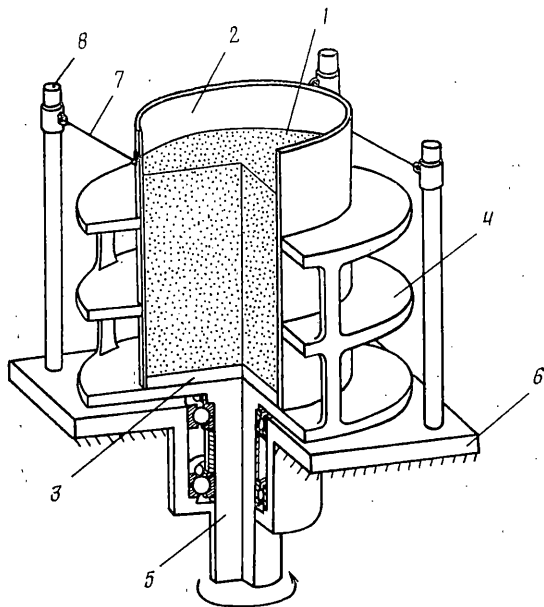
Здесь \mathbf{n} — нормаль к границе, \mathbf{r} — радиус-вектор из центра эллипса к материальной точке на границе. Первое равенство показывает, что точки должны двигаться вдоль границы, второе означает постоянство секторальной скорости.

Утверждение о том, что краевые условия (1) гарантируют однородное деформирование внутри области при любой реологии среды, можно пояснить на таком примере. Пусть u, v — компоненты перемещения в декартовых координатах Oxy . Для однородной несжимаемой деформации поле перемещений должно иметь следующий вид

$$u = kx, v = -ky \quad (k = \text{const}) \quad (2)$$

Причем равенство (2) должно выполняться в каждой точке деформируемой области, включая границу. Осуществим теперь смещения (2) на границе. Покажем, что при некоторых приемлемых ограничениях условия (2) будут реализованы и во внутренних точках области.

Во-первых, решение (2) всегда существует. Действительно, оно является гладким и удовлетворяет всем краевым условиям. Это решение дает однородное распределение деформаций (причем для любой их меры). Следовательно, если материал однороден, то и распределение напряжений будет однородным (для любых определяющих уравнений и мер напряжений). Поэтому и уравнения равновесия будут удовлетворяться тождественно. (Значит, нагружение должно быть медленным, чтобы динамические члены отсутствовали). Таким образом, если единственность



Фиг. 1

есть, то краевые условия (2) гарантируют однородность деформаций для любых материалов. Последнее требование исключает диапазон нагрузок, когда возможны бифуркации и проявления реологической неустойчивости [5, 6]. Для процесса (1) ситуация аналогична, так как он представляет собой всего лишь последовательность нагружений типа (2) [4].

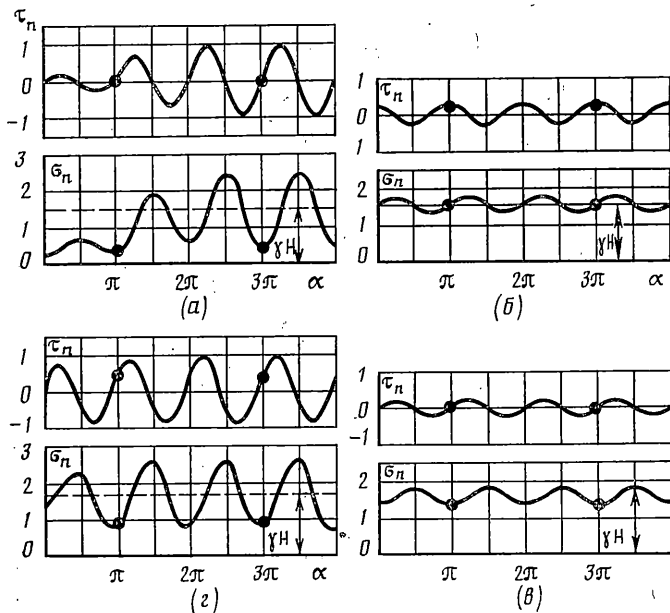
2. Эксперимент. Перейдем теперь к вопросу о технической реализации нагружения (1). Осуществить оба условия (1) довольно трудно. Проще сохранить только основные черты идеальной ситуации (выполнение первого условия на эллиптической границе), а линейную скорость задавать постоянной. Ясно, что такая замена приведет к определенной неоднородности. Ее роль можно уменьшить, делая измерения на небольшой базе, локально. Кроме того, все погрешности поддаются теоретическому анализу.

Соответствующее устройство показано на фиг. 1 [7]. Образец материала 1 помещается в камеру — цилиндрический стакан 2, выполненный из тонкого листового проката бериллиевой бронзы. Дно закрывается натянутой резиной 3. Нагружающее устройство представляет собой жесткие пластины-шаблоны 4 с соосными эллиптическими вырезами. В них вставляется цилиндрический стакан. Пластины-шаблоны охватывают оболочку в различных сечениях по высоте и закрепляются на оси 5, которая через подшипники установлена на основании 6. Привод на ось (на фигуре не показан) осуществляется от электродвигателя через редуктор со ступенчатым переключением скорости вращения вала. Вращающий момент на цилиндрическом стакане, возникающий за счет трения с шаблонами, компенсируется гибкими тягами 7. Тяги крепятся к верхней части оболочки стакана к неподвижным стойкам 8.

Эксперименты проводились таким образом. В центр камеры на определенной глубине помещался датчик напряжений. Затем камера заполнялась материалом. Нагружение проводилось путем вращения шаблонов. Скорость и направление вращения менялись по заданной программе. Нормальные и касательные напряжения фиксировались одним датчиком. Тензочувствительные элементы в нем устанавливались в общем корпусе и ориентировались на измерение напряжений в одной плоскости. Для интерпретации результатов важно знать ориентацию плоскости датчика относительно осей эллиптических шаблонов. Для контроля его положения к датчику жестко крепилась вертикальная спица. На ее свободном конце над поверхностью образца фиксировался флажок. Плоскость флажка совпадала с плоскостью датчика. В моменты, когда малая ось шаблона совпадала с плоскостью датчика, цепь размыкалась, и на осциллограмме напряжений делались отметки (на фиг. 2 отмечены точками). Графики напряжений как функции угла поворота выводились на самописцы. Техника измерений — та же, что и в [8].

Далее о кинематических измерениях. В качестве исходных данных известны длины осей эллиптических шаблонов $a > b$, скорость их вращения, а значит, и секторальная скорость граничных точек. В принятом способе нагружения она меняется в b/a раз. Можно ожидать, что при малых $(a-b)/b$ распределение скоростей деформаций будет близким к однородному. Тогда все кинематические характеристики легко определяются по исходным данным.

Представляют интерес и независимые локальные измерения. Они проводились по схеме [4]. В центре области закрашивалось круглое пятно диаметром 4 мм. В процессе деформирования пятно превращалось в эллипс. Ориентация и длины его осей



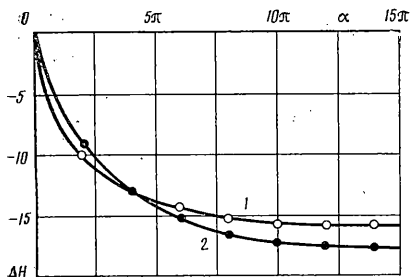
Фиг. 2

Фиксировались через микроскоп. По формулам [4] определялись локальные значения компонент тензора скоростей деформаций и вращения.

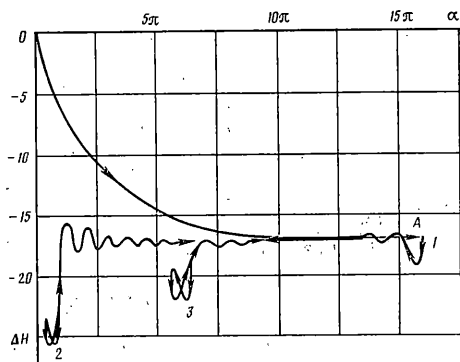
3. Результаты. Обозначим через OXY лабораторную систему координат, которую жестко свяжем с неподвижным основанием стенда b (см. фиг. 1). Начало поместим в центр камеры, оси ориентируем вдоль осей эллиптических шаблонов в исходном состоянии. Пусть α — угол между большой осью шаблона и направлением OX , κ — угол между большой осью закрасенной на образце эллиптической области и тем же направлением OX . Экспериментальные замеры хорошо ложатся на прямую $\kappa \approx 45^\circ + 0,5\alpha$. Наличие коэффициента 0,5 здесь неслучайно и означает, что в пределах точности измерений величину $(a-b)/b$ можно считать действительно малой [4]. (В опытах $b=55,32; 53,64; a=60,8; 62,38$ мм.) Свободный член показывает, что главное направление тензора скоростей деформаций составляет с большой осью эллиптического шаблона угол 45° .

На фиг. 2 изображены графики изменения нормальных σ_n (кПа) и касательных τ_n (кПа) напряжений для: a — сухого кварцевого песка (крупность частиц 0,3 мм); b — меда (кинематическая вязкость $860 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$); c — смеси песка с глицерином при полностью заполненном поровом объеме (кинематическая вязкость глицерина $12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$); g — смеси песка с медом (44% меда и 56% песка по весу). Датчик располагался в вертикальной плоскости на глубине 80 мм, скорость вращения шаблонов — $3,78 \text{ с}^{-1}$, коэффициент сжатия $K=0,91$ ($a=60,8$ мм, $c=55,32$ мм). В лабораторной системе координат нагружение носит периодический характер. Период равен времени поворота шаблонов на угол π . Для вязких жидкостей диаграммы напряжений выходят на периодический режим практически сразу, для сыпучих сред — через 12–14 циклов. Это означает, что в последнем случае материалы обладают некоторой памятью в следующем смысле. Представим эллиптическую область как набор материальных волокон, проходящих через ее центр. В начальный момент каждое волокно имеет определенную длину $2b \leq l^0 \leq 2a$ и вполне идентифицируется параметром l^0 . В процессе нагружения длина волокна l^0 периодически меняется от $2b$ до $2a$. Рассмотрим нормальные напряжения в его сечении. Ясно, что в общем случае они должны зависеть от текущей длины l и начального положения l^0 . Например, для упругого тела зависимость от обоих аргументов существенна. Поэтому по известным значениям напряжений и длине l всегда можно восстановить значение l^0 . В этом смысле волокно всегда помнит свою первоначальную длину [9]. Для сыпучих материалов, в том числе насыщенных вязкой жидкостью, это не так. Здесь при циклическом нагружении зависимость напряжений от аргумента l^0 быстро стирается — волокна «забывают» свою первоначальную длину и все напряжения определяются только фазой внутри цикла.

Интересно отметить, что средние значения нормальных напряжений на вертикальной площадке (см. фиг. 2) равны весу столба материала над датчиком γH . Как указывалось, отметки на диаграммах соответствуют моменту, когда плоскость датчика проходит через малую ось эллипса. Данные о их положении позволяют судить о степени разности тензоров напряжений и скоростей деформаций. Например, для меда отметка попадает на максимум касательных и среднее значение нормальных напряжений. Это означает, что главное направление тензора напряжений σ_1 отклоняется от оси эллиптического шаблона на угол 45° . Следовательно, тензоры напряжений и скоростей деформаций соосны. Конечно, для вязких жидкостей соосность тензоров сомнений не вызвала. Полученный здесь результат можно рассматривать как



Фиг. 3



Фиг. 4

прямое экспериментальное подтверждение соосности и — главное — как тест для методики в целом.

Из диаграмм на фиг. 2 видно, что поведение сухого песка в определенном смысле противоположно поведению вязкой жидкости. Здесь метки приходится на минимум нормальных и нулевое значение касательных напряжений, т. е. при периодическом деформировании любого волокна максимальному сжимающему напряжению соответствует наименьшая длина волокна (его направление совпадает с малой осью эллипса), а наименьшему сжимающему напряжению соответствует наибольшая длина волокна (ориентация — вдоль большой оси эллипса). При этом главные оси тензора напряжений отклоняются от осей тензора скоростей деформаций на угол $\sim 45^\circ$.

Приведенные данные от скорости нагружения не зависят. Не зависят от скорости нагружения и амплитуды напряжений. Это означает, что сухой песок вязких свойств не проявляет.

Перейдем теперь к случаю, когда поровое пространство заполнено вязкой жидкостью. Как и следовало ожидать, такая среда обнаруживает промежуточный тип поведения. Диаграммы напряжений фиг. 2 показывают, что для смеси песка с медом при скорости нагружения $3,78 \text{ с}^{-1}$ угол разности тензоров напряжений и скоростей деформаций составляет 31° . С увеличением скорости амплитуда напряжений возрастает, а разность уменьшается (вязкие свойства становятся преобладающими). Смесь песка с глицерином характеризуется той же разностью, что и сухой песок (вязкость — незначительна). Влияние глицерина сказывается только на уменьшении напряжений, то есть фактически при малых скоростях он играет роль смазки.

Для широкого класса материалов сдвиговые деформации влекут за собой изменение объема (например, вследствие переупаковки зерен в сыпучих средах). Как известно, это фундаментальное свойство было открыто Рейнольдсом и получило название дилатансии [10].

Рассмотренный выше способ испытаний удобен и для исследования дилатансии при сложном нагружении. Очевидно, что объем камеры при любых углах поворота остается неизменным. Это означает, что изменение высоты образца в точности повторяет изменение его объема. Измерения проводились по схеме [11]. Камера заполнялась материалом. Затем устанавливался датчик высоты и проводилось нагружение. На самописце выводилось изменение высоты образца как функции угла поворота шаблонов.

На фиг. 3 показаны дилатансионные кривые для сухого кварцевого песка (ΔH — мм, α — рад.). Видно, что с увеличением угла поворота материал монотонно и необратимо уплотняется. При достаточно больших углах дилатансия себя исчерпывает, упаковка переходит в стационарное состояние и изменение объема прекращается. Стационарное значение пористости зависит от коэффициента сжатия: большему коэффициенту отвечает более плотная упаковка (кривая 1 фиг. 3: $K=0,82$, пористость — $\Pi=37,2\%$, кривая 2 — $K=0,86$, пористость — $\Pi=36,4\%$; начальная пористость в обоих случаях, соответствующая началу координат на графике, — $\Pi=43,5\%$).

Любой точке на дилатансионной кривой отвечает своя упаковка. Ее можно рассматривать как некоторую исходную упаковку для последующих исследований. Тогда вся предыдущая история деформирования — это только способ создания этой упаковки. Стационарной упаковке отвечает асимптота на графике дилатансии. Посмотрим, как реагирует эта упаковка на изменение направления поворота осей тензора скоростей деформаций. Если в точке А (фиг. 4) изменить направление вращения шаблонов, то материал резко уплотнится, затем начнет разрыхляться и через несколько колебаний опять придет к стационарному состоянию (уровень 1, фиг. 4, $\Pi=36,4\%$, $K=0,86$).

Рассмотрим теперь знакопеременное нагружение с небольшой амплитудой. Пусть угол поворота шаблонов меняется по программе $\alpha = \alpha_0 \sin \omega t$, α_0 — амплитуда, t — время, ω — достаточно малая частота, так что нагружение не вибрационное, а квазистатическое. Через определенное число циклов N дилатансионные кривые становятся периодическими. Упаковка переходит в стационарное состояние, которое соответствует новой программе. При этом достигается гораздо большая плотность, чем при монотонном нагружении $\alpha \sim t$ (фиг. 4). Видно, что меньшей амплитуде отвечает боль-

шая плотность (уровень 2, фиг. 4, $\alpha_0=45^\circ$, $N=23$, $\Pi=32\%$; уровень 3, $\alpha_0=80^\circ$, $N=14$, $\Pi=33,5\%$).

Если теперь из этого состояния перейти к монотонному нагружению, то произойдет резкое разрыхление и плотность постепенно выйдет на прежнее стационарное значение. Здесь обнаруживается качественно новое поведение сыпучего материала — затухающая периодическая дилатационной кривой.

Итак, предложенные методика и прибор сложного нагружения могут быть использованы для измерения параметров и исследования реологических свойств широкого класса материалов, включая водонасыщенные грунты, суспензии, расплавы полимеров, гранулированные и порошковые материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревуженко А. Ф. О самых простых течениях сплошной среды // Докл. АН СССР. 1988. Т. 303. № 1. С. 54–58.
2. Жуков А. М., Работнов Ю. Н. Исследование пластических деформаций стали при сложном нагружении // Инж. сб. 1954. № 18. С. 105–112.
3. Ильюшин А. А., Ленский В. С. Сопротивление материалов. М.: Физматгиз, 1959. 371 с.
4. Ревуженко А. Ф. Один класс сложных нагружений неупругой среды // ПМТФ. 1986. № 5. С. 150–158.
5. Кондауров В. И., Мухамедиев Ш. А., Никитин Л. В., Рыжак Е. И. Механика разрушения горных пород. М.: Ин-т физики Земли АН СССР. 1987. 218 с.
6. Kolymbas D. Bifurcation analysis for sand samples with a non-linear constitutive equation // Ing.-Arch. 1981. V. 50. No. 2. P. 131–140.
7. Шемякин Е. И., Ревуженко А. Ф., Бобряков А. П., Захаревич Э. В. Устройство для испытания образцов сыпучих материалов. А. с. № 1132192 // Бюлл. изобр. 1984. № 48. С. 153.
8. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. Однородный сдвиг сыпучего материала: Локализация деформаций // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. 1983. № 5. С. 17–21.
9. Лурье А. И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
10. Николаевский В. Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Итоги науки и техники. Механика твердых деформируемых тел. Т. 6. М.: ВИНТИ, 1972. 85 с.
11. Бобряков А. П., Ревуженко А. Ф. Однородный сдвиг сыпучего материала: Дилатансия // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. 1982. № 5. С. 23–29.

Новосибирск

Поступила в редакцию
30.XII.1988

УДК 624.131

© 1990 г.

И. К. РОХАНЕНКО, С. Ф. МАКЛАКОВ, В. А. ПРИЦЕПА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ГРУНТА НА СДВИГ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Представлены результаты экспериментального определения предела прочности грунта на сдвиг при динамическом нагружении. Разработана экспериментальная установка, обеспечивающая непосредственное измерение касательных напряжений на поверхности тела при его внедрении в преграду. Показано, что интенсивное динамическое нагружение глинистой среды сопровождается уменьшением действующих в ней касательных напряжений до пренебрежимо малых значений.

Важным определяющим соотношением для грунтов является условие пластичности. Как показано в [1, 2], для мягких грунтов наиболее достоверным условием предельного равновесия, когда они переходят в область пластического деформирования, является условие пластичности в форме Мизеса — Шлейхера с константой τ_* (сопротивлением сдвигу).

Характерным свойством мягких грунтов (глин, суглинков, супесей, лессов) является существование сильно отличающихся предельных диаграмм деформирования: статической, когда скорость деформирования мала, и динамической, когда скорость деформирования стремится к бесконечности.

Влияние скорости нагружения на величину τ_* исследовано в [3, 4], где предложены и методы экспериментальной оценки значений указанных предельных напряжений. В [4] для определения предела прочности грунта на сдвиг осуществлялось внедрение с постоянной скоростью в пластилин осесимметричных цилиндров с коническими наконечниками. Диапазон исследованных скоростей движения со-