

ФИКСАЦИЯ МОМЕНТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЯМ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИХ ПОВЕРХНОСТИ

В. И. Шейнин, Б. В. Левин*, Э. А. Мотовилов, А. А. Морозов

Институт оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова
ГНЦ «Строительство» Минстроя РФ, 109428 Москва

*Институт океанологии РАН, 117218 Москва

Излагаются результаты исследований по применению измерений инфракрасного излучения с поверхности геоматериалов для получения информации об изменениях их механического состояния. Дано краткое изложение физических основ подхода. Разработана аппаратура и методика получения синхронизированных записей импульсных изменений во времени нагрузки на грунтовый образец, находящийся в условиях компрессионного сжатия, и соответствующих вариаций интенсивности потока с его поверхности. Построен алгоритм совместной обработки полученных записей. Показана эффективность фиксации моментов изменений напряженного состояния грунтов и оценки относительных величин этих изменений по данным терморadiационных измерений.

Изменение во времени напряжений, действующих в массивах грунтов и горных пород, — характерное проявление активности происходящих в них механических процессов. Фиксация и определение величин этих изменений могут использоваться для оценки влияния на состояние массива различных воздействий, а также выявления и прогноза развития опасных природных и техногенных процессов [1, 2]. Грунты, особенно слабые, — наиболее сложный тип геоматериалов с точки зрения экспериментального изучения их механического состояния [3–5]. В последние годы серьезное внимание уделяется использованию различных физических методов для геомониторинга [6, 7], однако в основном применительно к скальным породам и бетону. Выполняемые в настоящее время исследования [8, 9] имеют одной из целей разработку и совершенствование методики мониторинга изменений напряженного состояния геоматериалов, применимой также и в массивах, сложенных грунтами. Методика основана на использовании термодинамического эффекта изменения температуры тела при его деформировании [10] и зависимости интенсивности потока инфракрасного (ИК) излучения с поверхности от температуры тела [11, 12].

При упругом деформировании в адиабатическом режиме изменения температуры ΔT и первого инварианта тензора напряжений $\Delta \Pi$ в точке среды связаны зависимостью [10]

$$\Delta T/T_0 = A_m \Delta \Pi, \quad (1)$$

где T_0 — начальная температура тела [К], а величина A_m [1/Па], которую удобно называть коэффициентом термоупругой активности [8], зависит от плотности и теплофизических свойств материала.

Адиабатичность, т. е. отсутствие теплообмена между деформирующимся телом и окружающей средой, а также между различными участками самого тела, в реальных условиях, очевидно, может соблюдаться лишь приближенно. Однако такое приближение

вполне удовлетворительно, если скорость изменения температуры во времени за счет термоупругого эффекта будет значительно больше, чем за счет теплообмена. Такая квази-адиабатичность реализуется, например, при стандартных режимах испытаний образцов геоматериалов [8].

Линеаризуя по $(\Delta T/T_0) \ll 1$ зависимость интенсивности потока ИК-излучения W от температуры тела [11] и используя (1), получим

$$\Delta W = A_c(\Delta T/T_0) = A_c A_m \Delta \Pi, \quad (2)$$

где коэффициент термоизлучательной способности материала A_c [Вт/м²] [8], содержащий в качестве множителя постоянную Стефана — Больцмана, зависит от температуры и излучательной способности поверхности.

Используя (1), (2) и предполагая линейную зависимость результатов измерений U (в единицах шкалы прибора) от значений W , запишем простое соотношение

$$\Delta U = A \Delta \Pi, \quad (3)$$

связывающее «скачок» $\Delta \Pi$ при квазиадиабатическом деформировании с соответствующей величиной ΔU . Коэффициент A [1/Па] записывается в виде

$$A = A_r A_c A_m, \quad (4)$$

где A_r [1/(Вт·м⁻²)] — коэффициент пропорциональности между ΔU и ΔW , определяемый по параметрам приемно-усилительной аппаратуры.

Измерение температур с помощью ИК-радиометров применяется для определения упругих изменений напряжений в металлах и полимерных материалах [13]. Связь между изменением потока ИК-излучения и изменением напряженного состояния геоматериалов впервые выявлена и исследована в работах НИИОСП [8, 14].

Перепады температур в геоматериалах, вызываемые их упругим деформированием, весьма малы и могут иметь порядок $10^{-4} \dots 10^{-3}$ град. Вместе с тем, в упомянутых исследованиях показано, что определение значений таких перепадов по данным измерений плотности ИК-потока оказывается вполне возможным. Речь идет об измерениях с такой точностью малых вариаций, а не абсолютных значений температуры.

В отличие от традиционных методов измерений напряжений в геоматериалах, развиваемый подход позволяет выполнять бесконтактные измерения и сканировать их результаты во времени и в пространстве. В сравнении с методами геомониторинга, основанными на других физических принципах [6, 7], методика (при анализе допредельных изменений состояний материалов) отличается простотой исходной физической модели. С другой стороны, основное ограничение подхода, заключающееся в возможности определения изменений только суммы главных напряжений $\Delta \Pi$, часто оказывается несущественным.

Для вычисления $\Delta \Pi$ по измеренным величинам ΔU следует определить значение A . Чтобы найти A по формуле (4), необходимо провести специальные эксперименты и определить параметры, в частности теплофизические характеристики грунта или горной породы, от которых зависят коэффициенты A_r , A_c , A_m . Более простой способ состоит в том, чтобы провести испытание образца этого материала в модельных условиях, когда значение $\Delta \Pi_f$ можно определить независимо от ИК-измерений. Тогда, фиксируя с помощью данной измерительной системы величину ΔU_f , соответствующую $\Delta \Pi_f$, можно оценить значение $A \approx A_f = \Delta U_f / \Delta \Pi_f$, необходимое для расшифровки результатов основных измерений с помощью этой системы. Такая тарировка была выполнена при испытаниях некоторых горных пород в условиях одноосного сжатия [8].

Ниже описываются результаты компрессионных испытаний грунтовых образцов, проведенных с целью разработки ряда элементов методики (терморационных измерений и определения A_f для грунтов, получения и анализа данных, характеризующих изменения

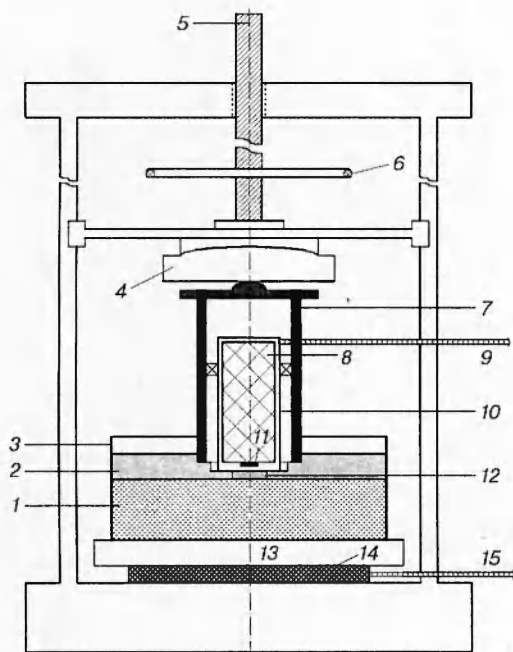


Рис. 1. Схема установки для испытаний образцов грунта и проведения измерений:

1 — образец, 2 — штамп, 3 — обойма, 4 — плита пресса, 5 — винт, 6 — штурвал, 7 — шток, 8 — усилитель, 9, 15 — кабели, 10 — ИК-радиометр, 11 — приемник, 12 — германиевая пластинка, 13 — жесткая пластина, 14 — тензометрический элемент

во времени нагрузки и соответствующие вариации интенсивности ИК-излучения, и др.). Впервые использована специально разработанная измерительная система, включающая, в частности, высокочувствительный радиометр, скомпонованный в общий блок с усилителем, имеющим повышенное отношение сигнал/шум. Этот блок связан с двухканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), предназначенным для измерений и автоматической синхронизированной передачи в компьютер аналоговых сигналов с ИК-радиометра и тензометрического элемента.

Схема простейшей установки для нагружения образцов и расположение измерительных датчиков показаны на рис. 1. Образец 1 высотой около 35 мм расположен в жесткой цилиндрической обойме 3 с внутренним диаметром 98 мм и длиной 60 мм. Образцы песчаного грунта изготавливались путем закладки последовательными слоями очищенного кварцевого песка в обойму, а глинистого — путем задавливания обоймы в подготовленный «монолит» глинистой пасты, последующего извлечения ее вместе с образцом и выравнивания его торцевых поверхностей. На образце установлен жесткий штамп 2 толщиной 15 мм. Диаметр штампа практически равен диаметру образца, и он входит в обойму без трения по боковой поверхности. Осевые перемещения верхней плиты пресса 4, происходящие при вращении винта 5 штурвалом 6, передаются на штамп через запрессованный в него шток 7 с внутренним диаметром 50 мм. В центре штампа выполнено сквозное отверстие диаметром 23 мм, закрытое снизу германиевой пластинкой 12 с фиксированным коэффициентом пропускания [12], через которую поток излучения с поверхности образца попадает на приемник 11 ИК-радиометра 10, установленного внутри штока. Пластинка толщиной 2 мм и диаметром 25 мм, вмонтированная в штамп «заподлицо» с его нижней поверхностью, предотвращает выдавливание грунта в отверстие и обеспечивает равномерность распределения давления под штампом. Через предварительный усилитель 8, смонтированный внутри радиометра, ИК-сигнал по кабелю 9, выведенному через отверстие в стенке штока, поступает на основной усилитель с частотным фильтром, а затем — на первый канал АЦП, где происходит его преобразование в цифровую форму. Результирующие значения напряжения $V_w(t_k)$ передаются в компьютер в моменты $t_k = k\Delta t$, где $k = 0..N - 1$; Δt —

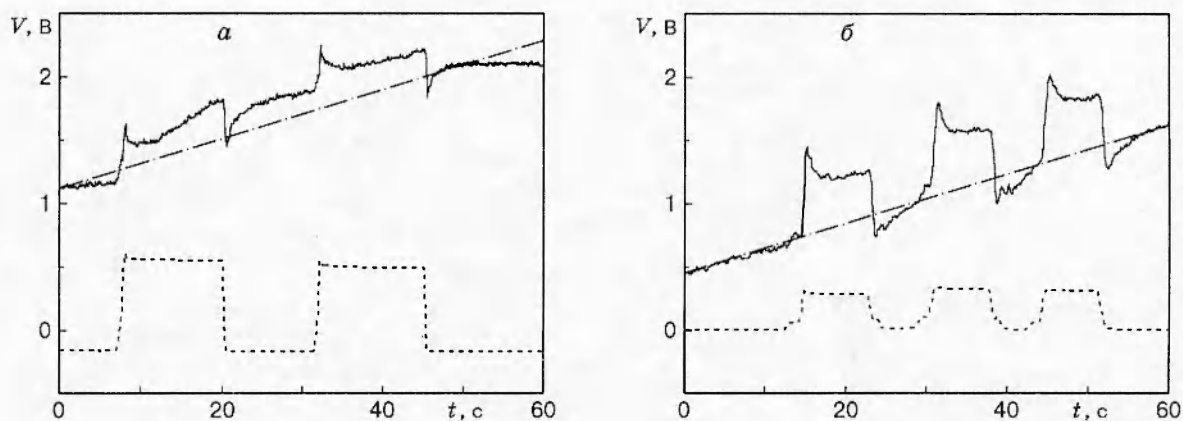


Рис. 2. Характерные результаты измерений во времени ($0 < t < 60$ с) преобразованных и усиленных сигналов для песчаных (а) и глинистых (б) образцов: сплошная линия — сигнал с ИК-радиометра $V_w(t)$; штриховая — сигнал с мессдозы $V_g(t)$; штрих-пунктирная — линейная аппроксимация $V_e(t)$ трендовой составляющей $V_w(t)$

заданный шаг по времени; $N = T/\Delta t$; T — продолжительность опыта.

Снизу образец и обойма опираются на жесткую пластинку 13. Между этой пластинкой и плитой пресса установлен тензометрический элемент 14 (мессдоза) для измерения изменений нагрузки на образец. По второму кабелю 15 сигнал с тензоэлемента, пропорциональный его деформации и, следовательно, нагрузке, поступает через тензоусилитель на второй канал АЦП. Преобразованные и усиленные значения напряжения $V_g(t_k)$ этого сигнала также передаются в компьютер синхронно со значениями $V_w(t_k)$. Значение Δt после нескольких пробных опытов было принято равным 0,1 с, как и интервал осреднения при фильтрации сигналов, поступающих на оба канала АЦП. Коэффициенты усиления (10^6 для сигнала с ИК-радиометра и 10^2 для сигнала с мессдозы), а также уровни V_w^0 и V_g^0 , соответствующие отсутствию нагрузки, подбирались так, чтобы сделать удобным графическое представление обеих записей в одном масштабе в пределах ± 3 В.

Во время опыта эволюция функций $V_w(t)$ и $V_g(t)$ прослеживается на экране монитора, а текстовый файл, куда записаны значения $V_w(t_k)$ и $V_g(t_k)$, сохраняется для последующей обработки. Такой файл для каждого опыта представляет собой последовательность чисел, в которой сначала записана информация об опыте, а затем на четных номерах ($i = 2k$) записаны значения $V_w(t_k)$, на нечетных ($i = 2k + 1$) — $V_g(t_k)$.

Чередующиеся циклы нагружения и разгрузки, соответствующие совершаемым оператором поворотам штурвала, начинаются через 8–10 с после начала записи и повторяются 1–5 раз в течение $T \approx 50 \div 100$ с. На рис. 2 показаны характерные записи $V_w(t_k)$ (сплошная линия) и $V_g(t_k)$ (штриховая) для одного из опытов с песчаным (а) и глинистым (б) грунтами.

Отметим особенности поведения функций $V_g(t)$ и $V_w(t)$. В короткие интервалы времени, когда происходит нагружение (или разгрузка), значения $V_g(t)$ и $V_w(t)$ скачкообразно возрастают (или убывают). Затем значения $V_g(t)$ остаются почти постоянными в пределах интервалов времени, когда нагрузка постоянна, и почти точно равными V_g^0 , когда нагрузка равна нулю. Такой импульсный характер функции $V_g(t)$ позволяет сначала визуально, а затем и количественно выделить интервалы нагружения, разгрузки и стационарности нагрузки.

На рис. 2 видно, что в интервалах, где существенно изменяются значения $V_g(t)$ и, следовательно, возрастает или убывает нагрузка, записи $V_w(t)$ и $V_g(t)$ почти подобны. После

стабилизации нагрузки значения $V_w(t)$, в отличие от $V_g(t)$, продолжают изменяться под влиянием изменений тепловых условий, стремясь вернуться к величинам, определяемым тепловым равновесием образца с окружающей средой. Скорость таких изменений остается в любом случае существенно меньше, чем скорость скачкообразных изменений $V_w(t)$ в моменты изменений нагрузки. Это позволяет считать деформирование образца в указанные моменты квазиadiaбатическим.

Сравнение записей $V_w(t)$ и $V_g(t)$ говорит том, что данные ИК-измерений могут быть использованы, по меньшей мере, в качестве «индикатора» изменений механического состояния геоматериалов. Количественная обработка данных испытаний имела целью определить зависимость величин скачков записей ИК-измерений от изменений напряжений в образце. Была составлена программа вычислений, учитывающая импульсный характер записи $V_g(t)$ и особенности записи $V_w(t)$. Сначала вычисляются и анализируются локальные приращения ΔV_g функции $V_g(t)$, затем определяются интервалы времени, где ΔV_g практически равны нулю (нагрузка не изменяется), существенно положительны (нагрузка возрастает) или отрицательны (происходит разгрузка). В памяти ЭВМ фиксируются начальные значения t_j^\pm и продолжительности $(\Delta t)_j^\pm$ каждого интервала, где происходило нагружение (знак +), разгрузка (знак -), а также соответствующие приращения $\Delta_j V_g^\pm$ функции $V_g(t)$.

При анализе данных ИК-измерений следует учитывать, что в них, кроме «полезной» составляющей, определяемой механическими процессами в образце, всегда присутствует «шумовая» компонента и может содержаться «тренд», вызываемый изменениями внешних условий. Трендовая составляющая $V_c(t)$ в каждой записи $V_w(t)$ оценивалась ее прямолинейной аппроксимацией через начальный (до первого нагружения) и конечный (через 10–20 с после снятия нагрузки) участки (см. рис. 2). Затем вместо $V_w(t)$ рассматривалась функция $U(t) = V_w(t) - V_c(t)$, практически не зависящая от тренда.

Для выделенных по записи $V_g(t_k)$ интервалов изменения нагрузки $(\Delta t)_j^\pm$ определялись соответствующие приращения $\Delta_j U^\pm$. В последующих вычислениях учитывались лишь интервалы $(\Delta t)_j^\pm$, на которых эти приращения составляли не менее 0,5 от максимального (по абсолютной величине) приращения $|\Delta_j U^\pm|_{\max}$ для данного опыта. Такое ограничение имеет целью «отсечь» короткие интервалы $(\Delta t)_j^\pm$ с малыми $\Delta_j U^\pm$, на оценки которых может сильно влиять случайный шум в записи $V_w(t)$. По совокупности интервалов $(\Delta t)_j^\pm$, которые удовлетворяют указанному ограничению, в каждом опыте вычислялись средневзвешенные значения $(\Delta V_g^\pm)_e$ и $(\Delta U^\pm)_e$. Отношение этих величин

$$A_g^\pm = (\Delta U^\pm)_e / (\Delta V_g^\pm)_e \quad (5)$$

есть оценка производной изменения результатов ИК-измерений по данным $V_g(t)$, дающим информацию об изменениях нагрузки. Вычисленные по соотношению (5) значения A_g^+ и A_g^- для данного опыта различаются между собой не более чем на 10 %, за исключением одного опыта, где относительное несовпадение составляет 35 %. Несущественным внутри серии для каждого данного опыта оказывается и разброс частных значений $\Delta_j U^\pm / \Delta_j V_g^\pm$, которые также вычислялись для более полного анализа полученных данных. Тем самым показано, что для одного и того же образца и одних и тех же условий испытаний изменение показаний ИК-радиометра пропорционально изменению нагрузки.

Вместе с тем, значения $A_g = 0,5(A_g^+ + A_g^-)$ для различных опытов существенно различаются между собой. Было проведено по девять опытов с образцами песчаных и глинистых грунтов. Среднее значение A_g для песчаных грунтов составило 0,63 (значения колебались от 0,33 до 0,97), для глинистых грунтов — 2,13 (значения колебались от 1,46 до 2,79). Представляет интерес полученный вывод о значительно большей термомеханической ак-

тивности глинистых грунтов по сравнению с песчаными. Проведенные для проверки этого вывода три опыта на образцах суглинистых грунтов дали значение $A_g \approx 1,35$, промежуточное между полученными для глин и песка.

По полученным значениям A_g определим величины A , полагая в соотношении (3) $\Delta U = \Delta(V_w(t) - V_c(t))$. Выразим $\Delta\Pi$ через изменения нагрузки ΔG

$$\Delta\Pi = (\Delta G/S)(1 + 2\xi), \quad (6)$$

где ξ — коэффициент бокового давления в грунте внутри обоймы; S — площадь штампа. Зависимость между ΔV_g и ΔG запишем в виде

$$\Delta G = k_{GV}\Delta V_g. \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в (3) и преобразовывая, получим

$$A = A_g S (k_{GV}(1 + 2\xi))^{-1}. \quad (8)$$

Значение переходного коэффициента $k_{GV} \approx 6,6 \cdot 10^3$ Н/В (при заданном в опытах уровне усиления тензометрического сигнала) определено предварительной тарировкой показаний мессдозы по показаниям эталонного динамометра, установленного с этой целью между мессдозой и плитой пресса. Принимая $\xi \approx 0,5$ для песчаных и $\xi \approx 0,6$ для глинистых грунтов, определяем по формуле (8) искомые значения соответственно $A \approx 1,4 \cdot 10^{-6}$ и $4,3 \cdot 10^{-6}$ В/Па. Эти значения могут быть использованы лишь при расшифровке данных ИК-измерений, проведенных с помощью той же измерительной системы, что и в описанных опытах. Однако факт получения на основе таких измерений качественных (выявление моментов изменений состояния геоматериалов), а также количественных результатов говорит о перспективности использования предлагаемой методики для геомеханических [8] и геофизических [9, 15] исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-05-14696).

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986.
2. Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф. М.: Недра, 1981.
3. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах / Под ред. Е. И. Шемякина. Новосибирск: Наука, 1975.
4. Гердюков Н. Н., Иоилев А. Г., Новиков С. А. Исследование воздействия взрывных нагрузок на мягкий грунт // ПМТФ. 1992. № 2. С. 149–152.
5. Лазебник Г. Е., Смирнов А. А., Иванов Д. Б. Комплекс приборов и устройств для измерения давления грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1973. № 2. С. 16–19.
6. Исследования горного давления геофизическими методами / Ю. В. Ризниченко, И. А. Ванек, В. И. Мячкин и др. М.: Наука, 1967.
7. Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. Прогноз разрушения горных пород на основе особенностей спектрально-временных характеристик электромагнитного излучения // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 6. С. 153–157.
8. Шейнин В. И., Мотовилов Э. А., Филиппова С. В. Оценка изменения напряженного состояния грунтов и горных пород по изменению интенсивности потока инфракрасного излучения с их поверхности // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 1994. № 3. С. 14–22.

9. Sheinin V. I., Levin B. W., Motovilov E. A. Infrared diagnostics of stress variations in rock: the possibilities for monitoring prelimit mechanical processes in the earth's crust // J. Earthquake Prediction Researches. 1997. V. 6, N 1. P. 138-147.
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 1965.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967.
12. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Совет. радио, 1978.
13. Stanley P., Chan W. K. Quantitative stress analysis by means of the thermoelastic effect // Strain Analysis. 1985. V. 20, N 3. P. 129-137.
14. Шейнин В. И., Мотовилов Э. А., Морозов А. А., Пригорнева С. В. Методика определения напряжений в фундаментных конструкциях терморadiационным способом // Тр. НИИОСП. 1987. Вып. 87. С. 60-65.
15. Levin B. W., Motovilov E. A., Sheinin V. I. The seismic process preliminary stages monitoring based on infra-red radiometry within rock massif // XXI General Assembly of Intern. Union of Geodesy and Geophysics, Boulder, Colorado, July 2-14, 1995.

Поступила в редакцию 19/1 1997 г.
