

УДК 624.131

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

С. Р. Месчян, Р. П. Малакян

### Реологические свойства набухающих грунтов

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР Г. И. Тер-Степаняном 11/V 1977)

Набухающие грунты обладают ярко выраженным свойством деформирования во времени (<sup>1,2</sup>), которое в одном случае проявляется без внешнего силового воздействия, а в другом — под действием внешних нагрузок.

В случае компрессии замачивание набухающего грунта при отсутствии внешних силовых воздействий приводит к длительному свободному набуханию. В этом же случае внешняя нормальная нагрузка (в зависимости от ее уровня по отношению к давлению набухания  $\sigma_{наб}$ ) ограничивает ( $\sigma < \sigma_{наб}$ ), полностью исключает ( $\sigma = \sigma_{наб}$ ) или же приводит к уплотнению грунта во времени ( $\sigma > \sigma_{наб}$ ). Свободное набухание грунта ( $\sigma = 0$ ) во времени всецело обусловлено внутренними физико-химическими процессами, протекающими в набухающем грунте в результате его взаимодействия с водой (<sup>3</sup>). При действии внешней нормальной нагрузки набухание грунта является физико-химическим и механическим процессом, который, как и свободное набухание, хорошо аппроксимируется реологическими уравнениями состояния. Поэтому длительное набухание грунтов при наличии внешней нормальной нагрузки и без нее можно, хотя бы формально, трактовать как реологическое явление — явление компрессионной ползучести.

Деформация набухающего грунта во времени при сдвиге подчиняется всем закономерностям ползучести обычных глинистых грунтов. При всех равных условиях эта деформация существенно зависит от состояния плотности — влажности грунта в момент испытания. Состояние набухающего грунта и его сопротивление сдвигу  $\tau_{сд}$  в свою очередь, зависят от степени набухания (или уплотнения), обусловленной внешней нормальной нагрузкой, давлением набухания и длительностью их действия.

Очевидно, что для определения начального сопротивления грунта сдвигу  $\tau_{сд}$  и сдвиговой ползучести набухающего грунта необходимо знать закономерности давления набухания — развитие давле-

ния набухания во времени и его зависимость от внешней нормальной нагрузки  $\sigma$ .

Несмотря на большое распространение набухающих грунтов и, в связи с этим, на необходимость расчета оснований по предельным деформациям с учетом фактора времени, их реологические свойства (ползучесть, релаксация напряжений, прочность) исследованы исключительно слабо. Имеются всего несколько работ, посвященных исследованию сопротивления набухающих грунтов сдвигу и компрессионной ползучести (1-4). Нет ни одной работы по исследованию сдвиговой ползучести набухающих грунтов с учетом влияния начальной влажности на этот процесс. Чтобы в какой-то степени восполнить этот пробел, нами исследованы начальное сопротивление сдвигу и сдвиговая ползучесть ряда набухающих грунтов в двух различных значениях их влажности: при начальной влажности  $w_0$  и их водонасыщении (замачивании)  $w$ , после приложения внешних нормальных нагрузок.

Исследовано сопротивление сдвигу бентонитовой глины № 11—76 ( $\gamma = 1,77 \text{ г/см}^3$ ,  $w_0 = 46,5\%$ ,  $w_L = 112,36\%$ ,  $w_p = 43,92\%$ ,  $J_p = 68,44\%$ ) нарушенного сложения и глины № 13—76 ( $\gamma = 1,98 \text{ г/см}^3$ ,  $\gamma_s = 2,68 \text{ г/см}^3$ ,  $w_0 = 26\%$ ,  $w_L = 60,16\%$ ,  $w_p = 30,31\%$ ,  $J_p = 29,95\%$ ) естественного сложения по стандартной методике на приборах М—5 кручения сплошных образцов без возможности бокового расширения при  $w = w_0$  и  $w = w_s$ .

С целью установления диапазона изменения нормального напряжения при определении сопротивления сдвигу бентонитовой глины предварительно исследована зависимость  $\sigma_{наб} - \sigma$  на компрессионных приборах М—4 (1) по методу компенсаций деформации набухания (2) при непрерывном водонасыщении в течение 19 дней. Установлено, что давление набухания в данном состоянии грунта, обусловленного  $\sigma$ , равно (3)

$$\sigma_{наб}(\sigma) = \sigma_{наб,0} - \sigma, \quad (1)$$

где  $\sigma_{наб,0}$  — давление набухания при  $\sigma = 0$ .

Диаграмма сдвига бентонитовой глины при  $w = w_0$  является прямой. Она аппроксимирована (сплошная линия на рис. 1,а) выражением закона Кулона

$$\tau_{ст, w_0} = \sigma \operatorname{tg} \varphi_0 + c_0, \quad (2)$$

при следующих данных:  $\varphi_0 = 10^\circ 43'$ ;  $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0,19$ ;  $c_0 = 0,0356 \text{ МПа}$ .

Диаграмма сдвига бентонитовой глины при  $w = w_s$  является ломанной (3), точка перелома которой соответствует нормальному напряжению, равному максимальному давлению набухания  $\sigma = \sigma_{наб,0} = \sigma_{наб, макс}$ . Выражение сопротивления сдвигу набухающей глины при замачивании  $w = w_s$ , с учетом  $\sigma_{наб}$ , представлено в следующем виде (4):

$$\tau_{ст, w_s} = [\sigma - \sigma_{наб}(\sigma)] \operatorname{tg} \varphi_0 + c_0, \quad (3)$$

где  $\sigma_{наб}(\sigma)$  — зависящая от нормального напряжения  $\sigma$  давление набухания;  $\varphi_0$  и  $c_0$  — параметры, определяемые из испытания образцов при естественной влажности  $w = w_0$ .

$$\sigma_{наб}(\sigma) = \begin{cases} 0 & \text{для } w = w_0; \\ 0 & \text{для } w > w_0, \sigma \geq \sigma_{наб,0}; \\ (\sigma_{наб,0} - \sigma) & \text{для } w > w_0, \sigma < \sigma_{наб,0}. \end{cases} \quad (4)$$

Выражение (3) справедливо в пределах  $-|\sigma - \sigma_{наб}(\sigma)| \operatorname{tg} \varphi_0 \geq c_0$ .

В случае  $w = w_0$ , диаграмма сдвига рассматриваемого грунта аппроксимирована как по выражению (3) с учетом условия (4) и определенных из опыта  $\varphi_0 = 10^\circ 43'$ ;  $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0,19$ ;  $c_0 = 0,0356$  МПа и  $\sigma_{наб,0} = 0,3$  МПа для  $t = 10$  дней (штриховая линия на рис. 1,а), так и выражением (2) (сплошная линия). В последнем случае при  $\sigma < \sigma_{наб,0}$  использованы следующие данные:  $\varphi = 16^\circ 4'$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = 0,288$ ;  $c = -0,00086$  МПа, а при  $\sigma > \sigma_{наб,0}$ :  $\varphi = 10^\circ 12'$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = 0,18$ ;  $c = 0,0320$  МПа.

Аппроксимация диаграммы сдвига при  $w = w_0$  по выражению (3) вполне удовлетворительная и мало отличается от аппроксимации по соотношению (2) (рис. 1,а).

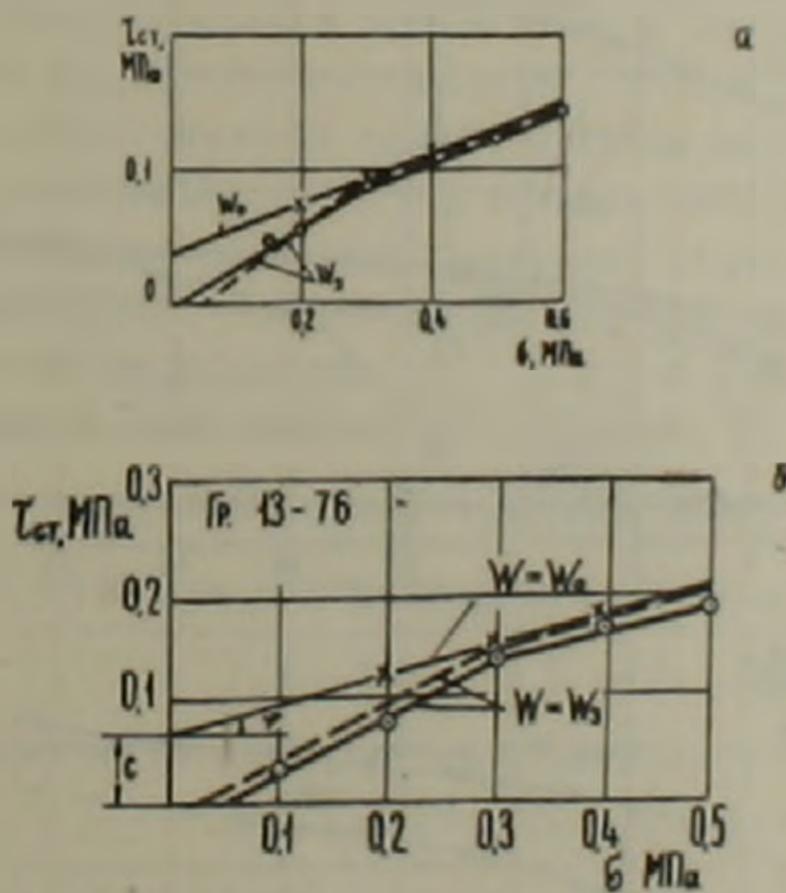


Рис. 1

Аналогичные результаты были получены при испытании глины № 13—76 (рис. 1,б). Диаграммы сдвига при  $w = w_0$  и  $w = w_2$  аппроксимированы выражением (3) с использованием условия (4), при следующих опытных данных:  $\varphi_0 = 14^\circ 36'$ ;  $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0,26$ ;  $c_0 = 0,067$  МПа;  $\sigma_{наб,0} = 0,3$  МПа.

Из изложенного выше следует, что для определения (3) набухающего грунта при его замачивании следует из опыта определить параметры  $\varphi_0$  и  $c_0$  выражения (2) при естественной влажности  $w_0$  и величину давления свободного набухания  $\sigma_{наб,0}$ .

II. Исследования сдвиговая ползучесть бентонитовой глины № 11—76 нарушенного сложения (см. выше) под действием  $\sigma = 0,2$  и  $0,5$

МПа и глины № 13—76 под действием  $\sigma = 0,3$  МПа при начальной (естественной) влажности  $w_0$  и в условиях замачивания  $w_s$  до полного водонасыщения после приложения нормального напряжения  $\sigma$ .

В каждом состоянии бентонитовой глины испытаны по четыре пары образцов-близнецов. Из них по паре использованы для определения стандартного сопротивления сдвигу  $\tau_{ст}$  и диаграмм сдвига (рис. 1,а), а остальные использованы для испытания на ползучесть при трех различных постоянных относительных касательных напряжениях  $\tau/\tau_{ст}$  (рис. 2).

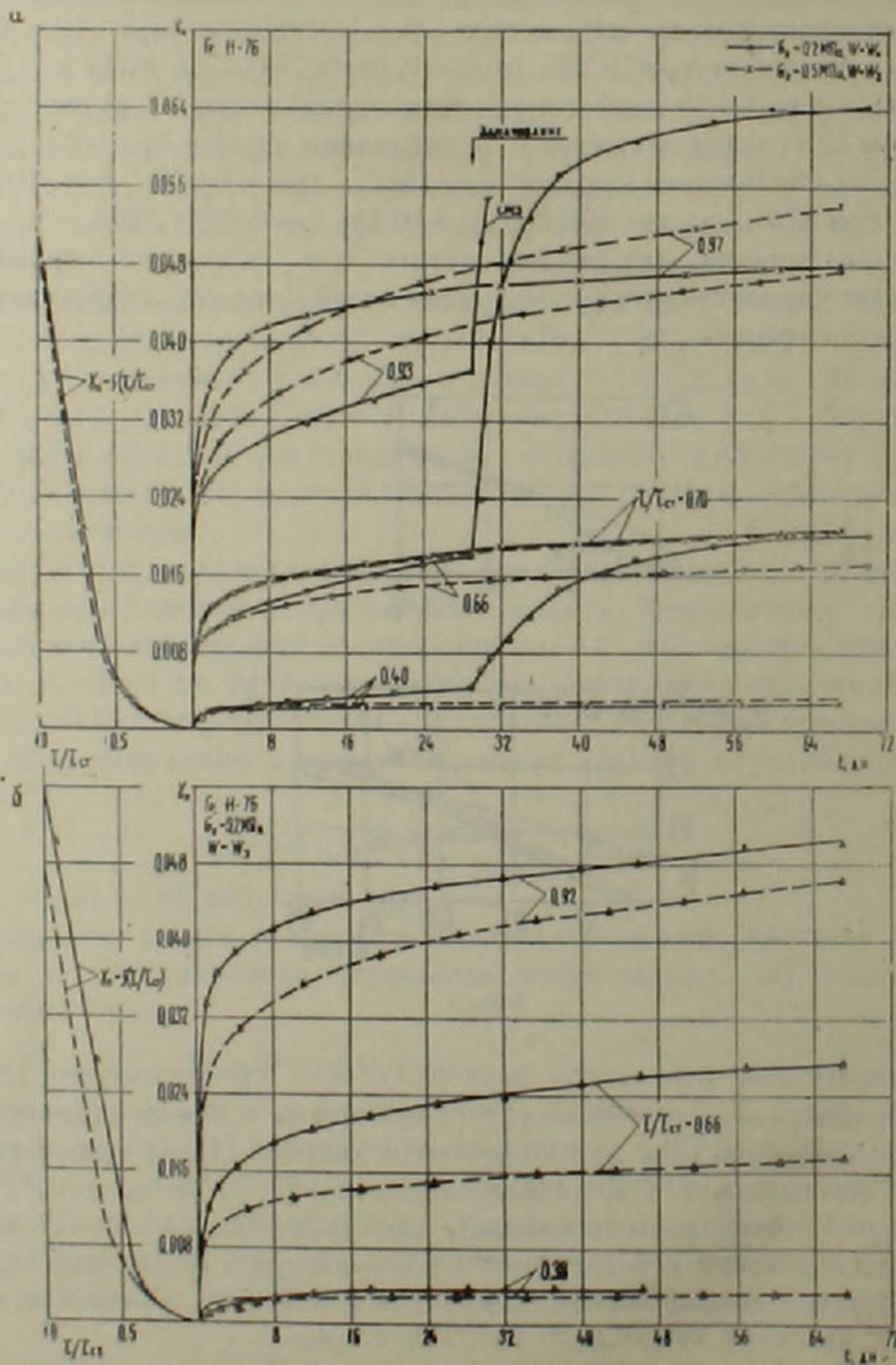


Рис. 2

В различных состояниях грунта образцы испытаны под действием практически равных относительных касательных напряжений  $\tau/\tau_{ст}$ .

Выражение ползучести деформации сдвига  $\gamma_n(t)$  представлено в следующем виде (7.9)

$$\gamma_n(t) = \omega(t) \cdot f(\tau/\tau_{ст}) = A \cdot t^m (\tau/\tau_{ст})^n, \quad (5)$$

где  $\omega(t)$  — мера ползучести при сдвиге;  $f(\tau/\tau_{ст})$  — функция относительного касательного напряжения, удовлетворяющая условию  $f(\tau/\tau_{ст} = 1) = 1$ .

Соотношение (5) с учетом (3) можно записать в следующем виде

$$\gamma_n(t) = A \cdot t^m \left( \frac{\tau}{[\sigma - \sigma_{наб}(\sigma)] \lg \varphi_0 + c_0} \right)^n. \quad (6)$$

Из (6) следует, что для определения  $\gamma_n(t)$  с учетом нелинейного закона деформации ползучести сдвига, влияния нормального напряжения  $\sigma$  (состояния грунта) и давления  $\sigma_{наб}$  достаточно иметь одно семейство экспериментальных кривых ползучести (рис. 2), определенное при некотором заданном постоянном нормальном напряжении  $\sigma$ , диаграмму сдвига при  $w = w_0$  и наибольшее давление набухания грунта  $\sigma_{наб,0}$ , соответствующее условию  $\sigma = 0$ .

Для аппроксимации семейств экспериментальных кривых ползучести бентонитовой глины (на правых частях графиков рис. 2 показаны сплошными линиями) описано семейство экспериментальных кривых (рис. 2,а), определенное при  $w = w_0$  и  $\sigma = 0,5 \text{ МПа} > \sigma_{наб,0} = 0,3 \text{ МПа}$  по выражению (6), с учетом условия  $\sigma_{наб}(\sigma) = 0$ . Для этого определены зависимость  $\gamma_n = f_1(\tau/\tau_{ст})$  (7):

$$\gamma_n = B \cdot (\tau/\tau_{ст})^n = 0,0524 (\tau/\tau_{ст})^{2,94}, \quad (7)$$

выражение функции относительного касательного напряжения

$$f(\tau/\tau_{ст}) = (\tau/\tau_{ст})^n = (\tau/\tau_{ст})^{2,94} \quad (8)$$

и меру ползучести деформации сдвига ( $\tau/\tau_{ст} = 1$ )

$$\omega(t) = At^m = 0,0314 \cdot t^{0,132}. \quad (9)$$

Кривые ползучести рассмотренного выше случая, построенные по выражению (6) с учетом (8), (9) и условия  $\sigma_{наб}(\sigma = 0,5 \text{ МПа}) = 0$  на рис. 2, а показаны штрихкрестиками.

Экспериментальные кривые ползучести, определенные при  $w = w_0$ ,  $\sigma = 0,2 \text{ МПа}$  и  $\sigma_{наб} = 0$ , аппроксимированы по выражению (6) с учетом (8), (9) и условия (4). Результаты аппроксимации на рис. 2, а показаны штрихкружочками.

Наконец, семейство экспериментальных кривых ползучести (рис. 2,б), определенное при водонасыщении образцов ( $w = w_0$ ) после приложения нормальных напряжений  $\sigma = 0,2 \text{ МПа}$  аппроксимировано выражением (6) с учетом (8), (9) и (4), то есть при  $[\sigma - \sigma_{наб}(\sigma)] =$

$= (2s - \sigma_{\text{наб.0}}) = 0,1$  МПа. Результаты аппроксимации этого семейства на рис. 2,б показаны штрихтреугольниками.

С целью проверки поведения сдвиговой ползучести набухающего грунта при нормальных нагрузках, равных давлению свободного набухания  $\sigma = \sigma_{\text{наб.0}}$ , испытаны образцы глины № 13-76. На рис. 3 показаны два семейства экспериментальных кривых сдвиговой ползучести этого грунта, определенные при  $w = w_0$  (штрихкружочки) и при замачивании  $w = w_2$  (штрихкрестики) после приложения нормального напряжения  $\sigma = 0,3$  МПа.

В обоих случаях образцы испытаны под действием трех различных относительных касательных напряжений  $\tau/\tau_{ct}$ . Причем, одно из них ( $\tau/\tau_{ct} = 0,41$ , при  $w = w_2$ ) было ступенями доведено до  $\tau/\tau_{ct} = 0,91$  (рис. 3). Как и в рассмотренном выше случае, в различных состояниях влажности образцы испытаны при практически равных  $\tau/\tau_{ct}$  (рис. 3).

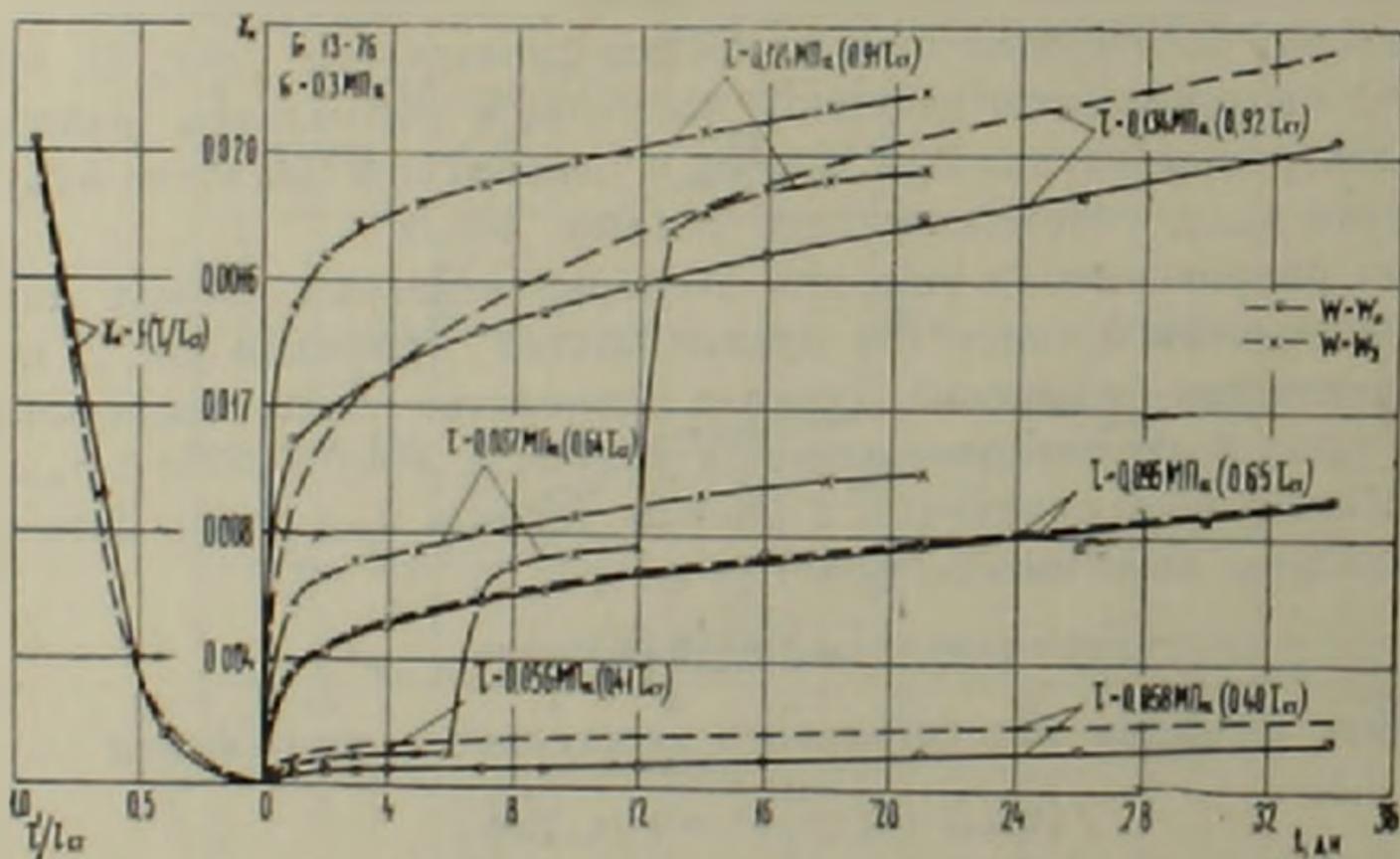


Рис. 3

Поскольку сопротивление сдвигу образцов, испытанных при  $w = w_0$  и  $w = w_2$  ( $\sigma = 0,3$  МПа), практически равны, то их экспериментальные кривые ползучести, определенные при равных  $\tau/\tau_{ct}$ , достаточно близки (рис. 3). Именно поэтому аппроксимация рассматриваемых семейства экспериментальных кривых ползучести осуществлено одним общим выражением (6) при следующих параметрах:  $A = 0,0116$ ;  $m = 0,226$ ;  $n = 2,71$ ;  $\varphi = 14^\circ 30'$ ;  $\text{tg} \varphi = 0,2586$ ;  $c = 0,067$  МПа;  $\sigma_{\text{наб.}(\sigma)} = \sigma_{\text{наб.0}} - \sigma = 0$ . Результаты аппроксимаций на рис. 3 показаны штриховыми линиями.

На рис. 2 и 3 видно, что аппроксимация семейства экспериментальных кривых ползучести деформации сдвига набухающих грунтов по выражению (6), с учетом условия (4), вполне удовлетворительная.

Следовательно, это выражение пригодно для рассматриваемой цели как при различных состояниях набухающих грунтов, характеризующихся величиной  $\sigma$ , так и при действии давления набухания и без него. Это в свою очередь значит, что проведенные эксперименты подтверждают полученные ранее (1) результаты о равенстве деформации ползучести, определенных в различных состояниях грунта при равных значениях относительного касательного напряжения  $\tau/\tau_{cr}$ .

Опыты показали, что деформации сдвиговой ползучести, полученные при ступенчато-возрастающем относительном касательном напряжении, достаточно близки к деформациям, определенным под действием постоянных относительных касательных напряжений (рис. 3). Следовательно, процесс сдвиговой ползучести набухающего грунта в данном его состоянии, как обычно (2), можно описать реологическими уравнениями состояния различных теорий ползучести (3).

Интересно также отметить, что замачивание образцов набухающего грунта, подвергнутых сдвиговой ползучести при  $\omega = \omega_0$  ( $\sigma = 0,2$  МПа) в течение 28 дней приводит к резкому возрастанию деформации сдвига, а при высоких относительных касательных напряжениях ( $\tau/\tau_{cr} = 0,93$ ) к разрушению материала (рис. 2).

Ереванский государственный университет

И. П. ИСХԱԶՅԱՆ, Բ. Գ. ՄԱՍԻՍՅԱՆ

### Ուռչող բնահողերի ռեոլոգիական հատկությունները

Հողվածում քննարկվում են ուռչող կավային բնահողերի սահքի դիմադրության և սահքի պայմաններում սողքի փորձառական հետազոտության արդյունքները դրանց խոնավության երկու տարրեր պայմաններում:

Բերված են երկու տարրեր ուռչող կավային բնահողների սահքի ստանդարտ դիմադրության դիագրամները, որոնք ստացված են կողային ընդարձակման բացակայության պայմաններում նմուշների ոլորման միջոցով սկզբնական (բնական) խոնավության և նորմալ լարումների կիրառումից հետո ջրահագեցնելու վիճակներում: Ստացված է ուռչող բնահողերի սահքի դիմադրության առնչությունը, որը հաշվի է առնում այդ բնահողերում (լրացուցիչ խոնավացման հետևանքով) ուռձեցման ճնշման առաջացման ազդեցությունը:

Սահքի պայմաններում բնահողերի խոնավության երկու վիճակներում ստացված սողքի փորձառական կորերի ընտանիքների պրանցման միջոցով ստացված է պարզ սահքի ձևափոխության ռեոլոգիական առնչությունը: Հիշյալ առնչությունը հնարավորություն է բնթելում որոշել պարզ սահքի ձևափոխությունները՝ կախված շոշափող լարումից, ժամանակից, նորմալ լարման մեծությունից և ուռձեցման ճնշումից: Բերված են ստացված առնչությունով կառուցված սողքի կորերի ընտանիքները, որոնք շատ չեն տարբերվում փորձառական կորերի ընտանիքներից:

## ЛИТЕРАТУРА — Ф Р Ц Ч Ц Ы П Р \* З П Р Ъ

- <sup>1</sup> А. А. Мустафеев, Г. Д. Чигиев, Г. Р. Назиров, Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 1974. <sup>2</sup> Е. А. Сорочан, Строительство сооружений на набухающих грунтах. Стройиздат, М., 1974. <sup>3</sup> М. Д. Аленина, В кн.: Грунтоведение и инженерная геология, вып. 1, Л., с. 81—84, 1976. <sup>4</sup> С. С. Бабицкая, В. Д. Полднякова, В кн.: Вопросы геотехники, № 15, Днепропетровск, «Будивельник», с. 96—100, 1969. <sup>5</sup> Л. Г. Балаев, Г. Н. Виноградова, В кн.: Труды второго всесоюзного симпозиума по реологии грунтов, с. 128—133, Ереван, 1976. <sup>6</sup> С. Р. Месчян, Р. П. Малакян, В кн.: Тезисы докладов третьего межведомственного совещания по вопросам прогнозирования гидрогеол., инж.-геологических и почвенно-мелиоративных условий, вып. IV, с. 108—117, М., 1976. <sup>7</sup> С. Р. Месчян, «Известие вузов», Строительство и архитектура, № 2, с. 172—176, 1976. <sup>8</sup> С. Р. Месчян, Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. «Недра», М., 1974. <sup>9</sup> Н. Х. Арутюнян, Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М—Л., 1952.