

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
НАБУХАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

МЕСЧЯН С. Р., АИРОЯН С. Г.

Ս. Բ. ՄԵՍՉՅԱՆ, Ս. Հ. ԱԻՐՈՅԱՆ

ԿԱՎԱՅԻՆ ԳԵՏՆԱՀՈՂՆԵՐԻ ՈՒՌՉԵԼՈՒ ԲՆՈՒԹԱԳՐԻՉՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ  
ՊԱՐՉԵՑՎԱԾ ԵՂԱՆԱԿ

Հողվածում շարադրված է մեկ նմուշի փորձարկումով կավային գեանահողերի ուռելու բնութագրիչների որոշման պարզեցված եղանակ, որը հիմնված է դրանց ձևախախտումների երկու առանձնահատկություններով՝ խրտացման լրիվ վերականգնումով և միևնույն արդյունավետ ճնշումների տակ բնական խոնավության ու զազարիչի տակ նախապես թրջված փորձանմուշների խտացումների հավասարությունը:

S. R. MESCHYAN, S. H. HAIROYAN

SIMPLIFIED METHOD OF DETERMINATION OF CHARACTERISTICS  
OF SWELLING OF CLAY SOILS

В статье изложен упрощенный метод определения характеристик набухания глинистых грунтов испытанием одного образца, основанного на их двух деформационных особенностях—на полной обратимости деформации уплотнения и равенства деформации уплотнения образцов природной влажности и предварительно замоченного под арретир при равных значениях эффективного давления.

Набухание (увеличение объема) при дополнительном увлажнении—замачивании является одним из особенностей нормально уплотненных и переуплотненных маловлажных глинистых грунтов. Учет указанного свойства является обязательным при возведении на набухающих грунтах зданий или строительства из них грунтовых сооружений. Неучет этого явления может привести к большим деформациям и авариям сооружений, требующих больших затрат и средств для их ликвидации. Известно [1], например, что в США стоимость поврежденных дорог, фундаментов, каналов и водохранилищ за счет набухания глинистых грунтов достигает ежегодно 2,3 млрд долларов.

Основными характеристиками набухания глинистых грунтов, определяемых без приложения внешнего уплотняющего давления  $p$ , являются [2, 3]:

1. Наибольшая величина относительной компрессионной дефор-

мации *свободного* набухания ( $\varepsilon_{sw,0}$ ), равной наибольшей относительной деформации объема грунта ( $\theta_{sw,0}$ );

2. Наибольшая влажность *свободного* набухания  $w_{sw,0}$ ;

3. Наименьшая плотность *свободно* набухшего грунта  $\rho_{sw,0}$ ; и

4. Давление *свободного* набухания  $\sigma_{sw,0}$ .

Основными характеристиками набухания глинистых грунтов, определяемых под действием уплотняющих давлений (нормальных напряжений)  $p$  по ГОСТу 24143—80 являются: давление набухания под нагрузкой  $\sigma_{sw,p}$ , относительная деформация набухания  $\varepsilon_{sw,p}$  и ее зависимость от  $p$ .

Отметим, что все указанные выше характеристики набухания грунтов определяются в компрессионных приборах—в условиях отсутствия бокового расширения образца.

Суть метода ГОСТа 24143—80 (в основу которого положен метод одной кривой [2, 3]) является то, что образцы-близнецы грунта в количестве до пяти-семи штук, вырезанные из одного монолита (керна), обладающие практически одинаковыми физико-механическими свойствами, параллельно обжимаются в компрессионных приборах под действием различных по величине нормальных напряжений:  $p=0, p_1, p_2, \dots, p_n$ , замачивают после условной стабилизации деформации уплотнения с фиксацией их деформации набухания. По данным испытания образцов строят кривую зависимости деформации уплотнения напряжения  $\varepsilon_c=f(p)$  грунта природной влажности (1) и аналогичную кривую (2) зависимости  $\varepsilon_{sw}=\hat{f}_1(p)$ , замоченных и набухших образцов. По разности координат определяют деформацию набухания под нагрузками  $\varepsilon_{sw,p}$  а по пересечению кривой (2) с осью напряжений  $p$ —стандартное давление набухания под нагрузкой  $\sigma_{sw,p}$ .

Основным недостатком метода ГОСТа является большая трудоемкость и недостаточная точность определения характеристик набухания, обусловленные практической невозможностью вырезки из одного монолита (керна) пяти-семи образцов-близнецов, вообще, из монолита неоднородного грунта в особенности, невозможность определения весьма важного показателя—давления *свободного* набухания  $\sigma_{sw,0}$ , возможность высыхания образцов природной влажности в процессе уплотнения перед замачиванием.

Чтобы исключить указанные недостатки ГОСТа возникла необходимость разработки нового упрощенного метода определения характеристик набухаемости испытанием одного образца)\* на основании двух деформационных особенностей набухающих грунтов—обратимостью деформации уплотнения образцов природной влажности и практически равенство, при равных эффективных напряжениях, деформаций уплотнения образцов природной влажности и образцов, замоченных под арретир [2].

\* Метод разработан С. Р. Месчяном (Патент Республики Армения от 27.12.1993г. за № 00043), опыты под его руководством выполнены С. Г. Айрояном.

Для подтверждения второй особенности деформирования набухающих грунтов, установленной одним из авторов этой статьи [4], осуществлено испытание бентонитового грунта №2 ( $\rho=1,75 \text{ г/см}^3$ ;  $w_0=0,291$ ;  $\rho_d=1,36 \text{ г/см}^3$ ;  $e_0=0,78$ ;  $w_L=0,622$ ;  $w_p=0,302$ ;  $J_p=0,32$ ). Испытаны шесть пар образцов-близнецов нарушенного сложения при двух режимах уплотнения: без замачивания и после замачивания под арретир и определения  $\sigma_{sw,0}=0,225 \text{ МПа}$ . Образцы уплотнены под действием трех различных значений эффективного давления  $\sigma=p-\sigma_{sw,0}$ . Данные испытания образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Деформации образцов грунта №2, уплотненных без замачивания и после замачивания под арретир

Эффективное давление $\sigma$ , МПа	Уплотнение без замачивания $w=w_0$ , $\sigma_{sw,0}=0$		Уплотнение после замачивания под арретир $w=w_{at}$ , $\sigma_{sw,0}=0,225 \text{ МПа}$	
	$+\Delta h$ , мм	$+e$	$+\Delta h$ , мм	$+e$
0,15	0,150	0,0075	0,128	0,0064
0,30	0,250	0,0125	0,220	0,0110
0,45	0,412	0,0206	0,362	0,0181

Полученные из опыта данные свидетельствуют о том, что при равных значениях эффективного давления деформации уплотнения, полученные испытанием образцов без замачивания и после замачивания под арретир, практически равны.

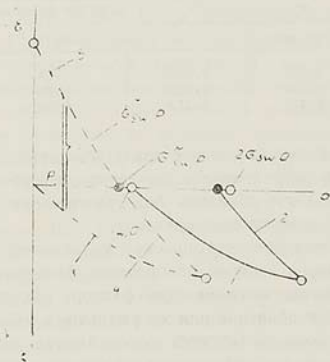
Совершенно очевидно, что процесс уплотнения водонасыщенного под арретир образцов зависит от процесса фильтрационной консолидации. Для устранения влияния этого фактора следует увеличить длительность испытания образцов или же уменьшить толщину их до 10 мм. Неучет влияния скорости отжатия поровой воды может привести к некоторому уменьшению деформации образцов, водонасыщенных под арретир.

Следует также отметить, что сказанное выше относится к набухающим грунтам, начальная влажность которых примерно равна и больше их влажности на пределе раскатывания  $w_0 \geq w_p$ . Когда влажность грунта значительно меньше  $w_p$ , при замачивании он разупрочняется в силу адсорбционного понижения прочности (эффект Ребиндера). В этом случае деформации уплотнения замоченного под арретир образцов могут быть до 30% выше их значений, полученных при уплотнении без замачивания.

Для решения поставленной задачи с учетом изложенных выше особенностей деформирования набухающих грунтов предложен упрощенный метод определения характеристик набухания, основанный на испытании *одного образца*. Этот метод, как будет показан ниже, не только в несколько раз уменьшает объем экспериментальных работ по сравнению с методом ГОСТ-24143 практически без снижения точности определения характеристик набухания, но и установить величину давления свободного набухания грунта.

Предложенный метод определения деформации набухания под нагрузкой  $\varepsilon_{sw,p}^M$ , стандартного давления набухания под нагрузкой  $\sigma_{sw,p}^M$  и давления свободного набухания грунта осуществляется следующей последовательностью.

1. Вырезанный из монолита (керн) рабочим кольцом образец грунта закладывают в компрессионный прибор, последний помещают под рычажный пресс или винтовой привод рамного загрузочного приспособления [5], снабженного динамометром, замачивают восходящим потоком воды под арретир, методом компенсации деформаций набухания определяют давление свободного набухания  $\sigma_{sw,0}$  (фиг. 1) по массе гирь на подвеске рычажного пресса или по показанию динамометра загрузочного приспособления.



Фиг. 1. Схема определения давления свободного набухания  $\sigma_{sw,0}$  образца грунта методом свободного набухания, его уплотнение 1, разуплотнение (разгрузка) до  $\sigma = \sigma_{sw,0}$  ( $p = 2\sigma_{sw,0}$ ) 2, их сдвиг влево до совпадения  $\sigma_{sw,0}$  с началом координат 3,4, кривая разгрузки при  $p < \sigma_{sw,0}$  5, определение давления набухания под нагрузкой  $\sigma_{sw,p}^M$  и деформации набухания  $\varepsilon_{sw,p}^M$  под нагрузкой по предложенному методу.

2. Учитывая некоторое отличие  $\sigma_{sw,0}$  от  $\sigma_{sw,p}$ , определяемого по методу ГОСТ 24143—80, обусловленного различными исходными значениями плотности образцов, при непрерывном замачивании осуществляют уплотнение водонасыщенного под арретир образца под действием возрастающего ступенями эффективного нормального напряжения  $\sigma$ , например,  $\sigma = p - \sigma_{sw,0} = 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4$  МПа, а также  $\sigma = \sigma_{sw,0}$  до заданной по проекту величины напряжения под фундаментом сооружения, но не меньше  $p = 2,5 \sigma_{sw,0}$  ( $\sigma \geq 1,5 \sigma_{sw,0}$ ).

На фиг. 1 кривая уплотнения образца водонасыщенного под арретир с определением  $\sigma_{sw,0}$  отмечена цифрой (1).

3. После стабилизации деформации уплотнения замоченного под арретир образца выполняют, при непрерывном замачивании, его разгрузку. Деформации набухания определяют под нагрузками, примененные при уплотнении образца в интервалах  $\sigma = (p - \tau_{sw,0}) \geq \tau_{sw,0}$  и  $p \geq 2\tau_{sw,0}$  и  $\sigma = p < \tau_{sw,0}$  (при  $\tau_{sw,0} = 0$ ).

Строят кривую разгрузки образца 2 (фиг. 1) для интервала  $\sigma \geq \tau_{sw,0}$  ( $p = 2\tau_{sw,0}$ ).

4. Кривые уплотнения 1 и разгрузки 2 (до  $\sigma = \tau_{sw,0}$ ) водонасыщенного под арретир образца сдвигают влево на величину  $\tau_{sw,0}$  (кривые 3 и 4 на фиг. 1) — до совпадения  $p = \tau_{sw,0}$  ( $\sigma = 0$ ) с началом координат, а  $\sigma = \tau_{sw,0}$  ( $p = 2\tau_{sw,0}$ ) с  $p = \tau_{sw,0}$  ( $\sigma = 0$ ).

Строят кривую разгрузки образца 5 для интервала  $\sigma = p < \tau_{sw,0}$ .

5. По точке пересечения кривой разгрузки образца с осью напряжений  $p$  определяют давление набухания грунта под нагрузкой  $\tau_{sw,p}^M$  по предложенному методу.

6. Вычисляют деформации набухания грунта под различными напряжениями по выражению:

$$\varepsilon_{sw,p}^M = \pm \bar{\varepsilon}_{sw,p}^M - (+ \varepsilon_{sw,p}^M) \quad (1)$$

где  $\pm \bar{\varepsilon}_{sw,p}^M$  — деформация образца при разгрузке до давления  $p$ ;  $\varepsilon_{sw,p}^M$  — деформация уплотнения замоченного под арретир образца под действием  $\sigma = p$ .

В (1) знак (+) означает уплотнение, а знак (—) — набухание образца по отношению к начальному состоянию нулевой деформации.

Отметим, что согласно второй особенности деформирования набухающих грунтов кривая 3 (фиг. 1) является кривой уплотнения грунта природной (начальной) влажности, а согласно первой особенности кривая 4—5 — кривой его набухания под нагрузками  $p$ .

Применимость предлагаемого метода определения характеристик набухания глинистых грунтов, взамен метода ГОСТ 24143—80, подтверждается следующими исследованиями.

1. Осуществлено испытание пяти пар образцов-близнецов грунта №2 (см. выше) нарушенного сложения. Установлено, что наибольшее расхождение между значениями их плотности не превышает 1%. Следовательно, они действительно являются образцами-близнецами, а полученные от их испытания данные могут быть рассмотрены как достоверные.

В целях проверки применимости предложенного метода для определения характеристик набухания грунта выполнено сопоставительное испытание образцов-близнецов при двукратной повторности опытов как то этому, так и по методу ГОСТ 24143—80.

По методу ГОСТ испытаны четыре пары образцов-близнецов под действием  $\sigma = p = 0; 0,15; 0,30$  и  $0,45$  МПа, а после условной стабилизации деформаций уплотнения замочены восходящим потоком воды. Результаты испытания образцов-близнецов приведены в табл. 2, кривые уплотнения и набухания на фиг. 2 обозначены цифрами, соответ-

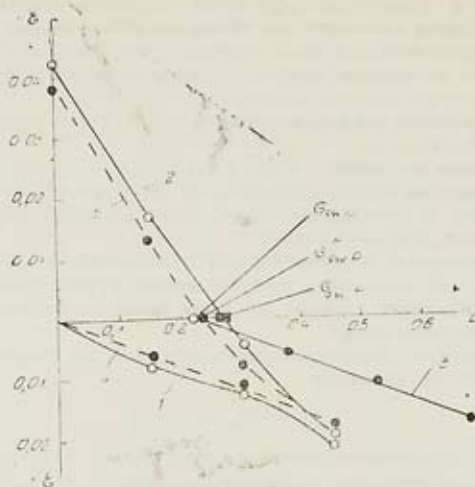


Рис. 2. Кривые уплотнения 1 и набухания 2 грунта №2, определенное  $\varepsilon_{sw,p}$  по ГОСТ 24143-80, кривые уплотнения 3,4 грунта после замачивания под арретир и разгрузки 5, определенное давление набухания под нагрузкой  $\varepsilon_{sw,p}^M$  по предложенному методу.

ственно, (1) и (2). Определено стандартное давление набухания  $\sigma_{sw,p} = 0,265$  МПа и деформации набухания  $\varepsilon_{sw,p}$  для различных значений уплотняющего давления  $p = \sigma$  (табл. 2), вычисленные по выражению (1). Например, для  $p = \sigma = 0,15$  МПа установлено:

$$\varepsilon_{sw,p} = -\varepsilon_{sw,p} - \varepsilon_{sw,p} = -0,0169 - (+0,0075) = -0,0244,$$

а для  $p = \sigma = 0,45$  МПа:

$$\varepsilon_{sw,p} = 0,0194 - 0,0206 = -0,0012.$$

По предложенному методу испытана пара образцов-близнецов. Без предварительного нагружения они замочены под арретир восходящим потоком воды, по методу компенсации деформации набухания определено давление свободного набухания  $\sigma_{sw,0} = 0,225$  МПа (фиг. 2), затем уплотнены под действием возрастающих ступенями напряжения  $\sigma = p - \sigma_{sw,0} = 0,15; 0,30$  и  $0,45$  МПа. После условной стабилизации деформации осуществлена разгрузка образцов ступенями до  $\sigma = 0,3; \sigma_{sw,p} = 0,225; 0,15$  и  $0$  МПа.

Результаты определения деформации образца при нагружении и разгрузке приведены в табл. 2. В этой таблице приведены также значения деформации набухания образца под различными давлениями  $\varepsilon_{sw,p}^M$ , вычисленные по выражению (1).

Данные по определению набухания грунтов под нагрузками по ГОСТу 24143—80 и в по новому методу

$\sigma = p$ , МПа		По методу ГОСТ 24143—80		По новому методу испытания одного образца				$\varepsilon_{sw,p}^M$	
		Уплотнение ( $w = w_0$ ) $\pm \varepsilon_p$	Набухание ( $w = w_{sat}$ ) $\varepsilon_{sw,p}$	Уплотнение после замачивания под арретир		Разгрузка			
				$\varepsilon = p - \varepsilon_{sw,0}$ МПа	$+\varepsilon_{sat,p}^M$	$\varepsilon > \varepsilon_{sw,p}$ МПа	$p < \varepsilon_{sw,0}$ МПа	$\varepsilon_{sw,p}^M$	
Грунт № 2									
0,00	0,00	—	—	0,00	0,00	—	0,00	—	0,0387
0,15	0,0075	-0,0425	0,0425	0,15	0,0064	—	0,15	-0,0131	0,0195
0,225	—	-0,0169	0,0224	0,225	—	0,2,5	—	-0,0015	0,0015
0,30	0,0125	+0,0041	0,0081	0,30	0,0110	0,30	—	+0,0075	0,0035
0,45	0,0206	+0,0194	0,001	0,45	0,0181	0,45	—	+0,0181	—
Грунт № 4 (глина), I серия испытаний									
0,05	0,0054	-0,024	0,03	0,05	0,045	—	0,05	-0,0288	0,0333
0,10	0,0118	-0,0082	0,02	0,10	0,0114	—	0,10	-0,013	0,0244
0,176	—	—	—	0,176	0,0151	0,176	—	+0,019	0,0039
0,20	0,0209	+0,019	0,0019	0,20	0,0177	0,20	—	+0,0213	0,0036
0,30	0,0248	+0,0233	0,0015	0,30	0,0237	0,30	—	+0,0237	—
Грунт № 4 (глина), II серия испытаний									
0,05	0,00925	-0,0213	0,031	0,05	0,0067	—	0,05	-0,0183	0,025
0,10	0,0167	-0,0013	0,018	0,10	0,0125	—	0,10	-0,0040	0,0165
0,139	—	—	—	0,139	0,0142	0,139	—	+0,0152	0,0010
0,20	0,0277	+0,0263	0,0014	0,20	0,0229	0,20	—	+0,0246	0,0017
0,30	0,0315	+0,0304	0,0011	0,30	0,0272	0,30	—	+0,0272	—

На фиг. 2 цифрой 3 отмечена кривая уплотнения, определенная после замачивания образцов под арретир. Она сдвинута влево на величину  $\varepsilon_{sw,0}$  и отмечена цифрой 4. Как видно на фиг. 2 кривая 4 практически совпадает с кривой 1 уплотнения образцов без замачивания, что еще раз подтверждает справедливость полученных ранее результатов [4].

Построена кривая разгрузки 5 по данным, приведенным в табл. 2. По точке пересечения этой кривой с осью напряжения  $p$  определено давление набухания под нагрузкой  $\varepsilon_{sw,p}^M = 0,235$  МПа. Его расхождение с  $\varepsilon_{sw,p}$ , определенного по методу ГОСТ ( $\varepsilon_{sw,p} = 0,265$  МПа) значительно меньше разброса опытных данных, получаемых при испытании образцов-близнецов.

2. Осуществлено испытание двух серий образцов-близнецов глины № 4 (табл. 3) нарушенного сложения, при соблюдении условия  $w_0 \geq w_p$  как по методу ГОСТ 24143—80, так и по методу испытания одного образца в целях определения деформации набухания под нагрузками  $\varepsilon_{sw,p}$ , стандартного давления набухания  $\varepsilon_{sw,p}$  и давления набухания  $\varepsilon_{sw,p}^M$ .

В каждой из указанной серии испытаны по десять образцов-близнецов. Как и в вышерассмотренном примере, в каждой серии по четыре пары образцов-близнецов испытаны по методу ГОСТ, а одна пара—по предложенному методу. Результаты определения характеристик набухания грунта приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 3

Показатели физических свойств и давлений набухания двух серий образцов близнецов

№ серии	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_w$ , г/см <sup>3</sup>	$w_0$	$w_L$	$w_p$	$J_p$	$\varepsilon_{sw,0}$ МПа	$\varepsilon_{sw,p}$ МПа	$\varepsilon_{sw,p}^M$ МПа
1	2,72	1,82	0,249	0,675	0,273	0,402	1,76	1,30	1,30
II	2,72	1,80	0,289	0,675	0,273	0,402	1,39	1,05	0,95

Сопоставление данных о деформациях набухания грунта (табл. 2), полученных по обоим методам, показывает, что их наибольшее расхождение (до 18%) не выходит за пределы обычного разброса деформаций образцов. Из сопоставления данных стандартного давления набухания  $\varepsilon_{sw,p}$  с данными набухания  $\varepsilon_{sw,p}^M$  под нагрузкой, определенного по предложенному методу, следует их практически полное совпадение.

Аналогичные результаты получены также при испытании других разновидностей глинистых набухающих грунтов.

Изложенное выше позволяет заключить, что предложенный метод испытания одного образца вполне применим для определения характеристик набухания глинистых грунтов, предусмотренных ГОСТом 24143—80 и определения весьма важного показателя—давления свободного набухания  $\varepsilon_{sw,0}$ .



## ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов В. И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов.—М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 235 с.
2. Месчян С. Р. Реологические процессы в глинистых грунтах.—Ереван: Айастан.—1992. 395 с.
3. Сорочан Е. А. Строительство сооружений на набухающих грунтах.—М.: Стройиздат, 1989. 312 с.
4. Месчян С. Р. Методика определения ползучести одномерного уплотнения набухающих глинистых грунтов при начальной природной влажности // Докл. АН Арм ССР, 1983, т. 76, № 2, с. 65—70.
5. Месчян С. Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов.—М.: Недра, 1985. 342 с.

Институт механики  
НАН Армении

Поступила в редакцию  
2.08.1993