

## **О МЕХАНИЗМАХ ДИНАМИЧЕСКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ СВЯЗАННОМ ВЛАГОНАСЫЩЕНИИ**

*А. В. Михалюк, докт. техн. наук, В. В. Захаров, инж. (ННИИПБОТ),  
В. А. Богатыренко, канд. хим. наук (НПУ им. Н. М. Драгоманова)*

*Встановлено, що при динамічних навантаженнях глинистий ґрунт, вміст води у якому відповідає максимальній кількості зв'язаної вологи, деформується за двома визначальними механізмами ущільнення мінерального скелета: при відносно невеликих напруженнях ущільненню сприяє міграційний перерозподіл ліосорбованої вологи з усередненням її вмісту в поровому просторі; при інтенсивних навантаженнях ущільнення ґрунту залежить переважно від наявності адсорбованої вологи, яка відіграє роль своєрідного „мастила” на контактах мінеральних частинок.*

Известно [1–3], что влажность грунта оказывает большое влияние на его механическое поведение под нагрузкой. Особое значение это имеет для динамических методов воздействия на грунт, когда в силу краткосрочности деформационного процесса уплотнение грунта происходит с сохранением его фазового состава и грунтовая влага становится активным регулятором его деформационной податливости. Как свидетельствуют результаты экспериментов [4–6], в таких условиях увеличение влажности грунта до уровня его сорбционного насыщения, зависящего от дисперсности минеральной фазы, сопровождается снижением сопротивления грунта деформированию и возрастанием его способности к уплотнению, которая достигает максимума при влажности, соответствующей максимальному количеству связанной влаги. При дальнейшем увлажнении грунта, то есть с появлением свободной влаги, уплотняемость грунта постепенно уменьшается по мере того, как вода вступает в деформационный процесс, воспринимая часть динамической нагрузки.

Однако в упомянутых работах не было обращено внимание на то, что связанная влага по своим свойствам и взаимодействию с сорбирующей поверхностью не является однородной средой. В ней выделяют прочно связанную (адсорбированную) и рыхлосвязанную (лиосорбированную) разновидности. Если адсорбированная влага, непосредственно контактирующая с поверхностью минеральных частиц, прочно связана с ней и не может быть отделена ни внешним давлением, ни напором воды, так как ее взаимодействие с поверхностью зерен может достигать тысяч мегапаскалей, то лиосорбированная вода связана с минеральной фазой грунта значительно слабее, сохраняя подвижность при давлениях в несколько мегапаскалей. Учитывая эти особенности разновидностей сорбированной влаги, можно предположить, что на различных этапах динамического нагружения их вклад в развитие деформационного процесса будет зависеть от интенсивности напряженного

состояния грунта, однако ни в одной из известных работ по динамике грунтов разной влажности такая проблема не обсуждалась. Ниже она рассматривается на основе экспериментальных исследований динамической сжимаемости пылеватых глин Херсонской области Украины.

Опыты проводились с искусственно увлажненными образцами грунта диаметром 150 мм и высотой 30 мм, в которых плотность скелета поддерживалась равной 1630 кг/м<sup>3</sup>. Гранулометрический состав глин характеризовался следующим содержанием фракций:

Размер минеральных частиц, мм	0,25...0,10	0,10...0,05	0,05...0,01	0,01...0,005	< 0,005
Содержание, %	4,0	10,7	35,1	16,8	33,4

Массовая влажность грунта варьировалась от 3,1 до 24,4%. Используя методы, описанные в [7, 8], определяли уровень увлажнения грунта, соответствовавший его насыщению прочно связанной и рыхлосвязанной водой. Было установлено, что максимальное содержание адсорбированной влаги для глин, использованных в экспериментах, соответствует их влажности 11,0...12,5%; общее количество связанной влаги соответствует влажности 16,2...17,4%. Таким образом, при полном сорбционном насыщении фазовый состав грунта характеризовался следующими показателями (по объему):

минеральная фаза	–	60,4%;
связанная вода	–	26,4...28,4%;
адсорбированная влага	–	17,9...20,4%;
лиосорбированная влага	–	8...8,5%;
газообразная фаза	–	11,2...13,2%.

Все опыты проводились в условиях простого деформированного состояния, когда  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$  и  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{v_{II}}{1-v_{II}} \sigma_1 \neq 0$ , где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , и  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  –

главные нормальные компоненты тензоров напряжений и деформаций соответственно,  $v_{II}$  – коэффициент Пуассона. Методика проведения исследований, приборно-измерительный комплекс, оценка погрешностей измерений, порядок обработки результатов экспериментов подробно описаны в [9].

Всего было проведено 9 экспериментов, в которых скорость нагружения варьировалась в достаточно узких пределах – от 1,0 до 1,37 ГПа/с при среднем значении 1,22 ГПа/с. Это позволило исключить из рассмотрения эффекты, связанные с влиянием временных параметров и вязкости грунта на особенности протекания деформационного процесса.

Амплитудно-временные характеристики напряженно-деформированного состояния грунта в каждом из опытов приведены в табл. 1, где, кроме уже известных, приняты такие обозначения:  $W$  – массовая влажность грунта;  $\varepsilon_1^m$  – максимальная полная осевая деформация грунта, численно равная его объемной деформации;  $\varepsilon_1^H$  – необратимая составляющая осевой деформации;  $t_H^\sigma$  – время

нарастания напряжений;  $t_H^{\varepsilon_1}$  – время увеличения осевой деформации до максимального значения;  $t_+$  – продолжительность действия избыточного давления;  $\tau_+$  – полный период развития деформационного процесса;  $\Delta t$  – сдвиг по фазе между сигналами напряжений и деформаций;  $t_{II}$  – время последействия.

Таблица 1. Амплитудно-временные характеристики напряженно-деформированного состояния грунта

№ опыта	$W$ , %	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа	$\varepsilon_1^m$	$\varepsilon_1^H$	$t_i^\sigma$ , мс	$t_i^{\varepsilon_1}$ , мс	$t_+$ , мс	$\tau_+$ , мс	$\Delta t$ , мс	$t_{II}$ , мс
19	3,1	7,55	3,75	0,091	0,056	3,49	3,73	8,85	18,28	0,24	9,43
18	5,8	5,40	–	0,080	0,064	3,80	4,00	9,80	17,00	0,20	7,20
17	7,8	5,35	2,40	0,181	0,132	5,36	5,49	10,21	18,29	0,13	8,08
20	11,1	4,00	3,80	0,256	0,181	3,98	5,40	10,80	22,20	1,42	11,40
16	13,7	4,53	4,25	0,239	0,162	5,78	5,91	10,89	20,59	0,13	9,70
21	16,9	5,10	–	0,228	0,081	4,79	5,34	9,01	22,75	0,55	13,74
23	19,1	5,50	3,86	0,153	0,061	4,01	4,78	8,92	24,00	0,77	15,08
22	21,7	3,65	2,75	0,144	0,103	3,31	5,23	9,27	28,47	1,92	19,20
24	24,4	4,05	3,98	0,153	0,078	3,77	4,96	8,85	21,19	1,19	12,34

Типичная осциллограмма развития деформационного процесса во времени показана на рис. 1, где отмечены его характерные временные показатели.

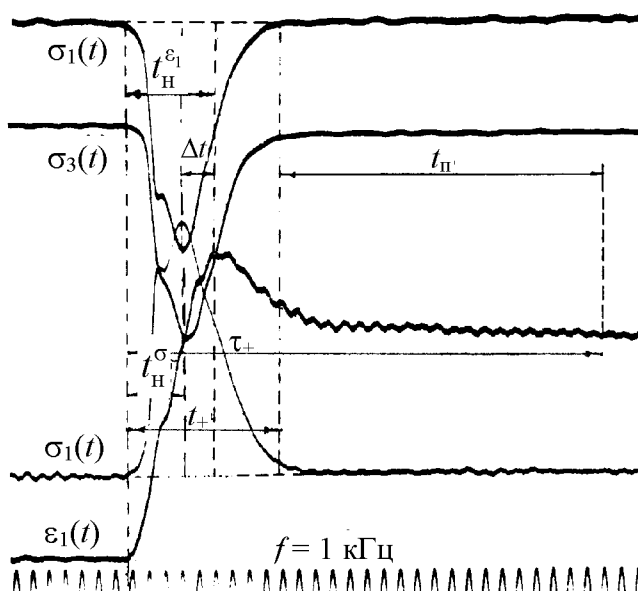


Рис. 1. Типичная осциллограмма развития динамического деформационного процесса в глинистом грунте (опыт № 22)

На рис. 2 представлены диаграммы одноосного сжатия глин для каждого из проведенных экспериментов. Обращает на себя внимание качественная сторона влияния влажности на механическое поведение грунта при

динамическом нагружении. Если при возрастании влажности до величины сорбционного насыщения ветвь  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  на этапе нагружения сохраняет свой вид, близкий к линейному, то дальнейшее увлажнение грунта, сопровождающееся появлением свободной влаги, приводит к появлению заметной и увеличивающейся с ростом влажности нелинейности деформационного процесса, причем ветвь нагружения распадается на два принципиально отличающихся участка: в области малых напряжений, где уплотнение грунта осуществляется за счет уменьшения его свободной пористости, сохраняется близкое к линейному соотношение между  $\sigma_1$  и  $\varepsilon_1$  с минимальным сопротивлением грунта деформированию; при больших нагрузках, когда в деформационный процесс вступает жидкая фаза грунта, сопротивление грунта деформированию резко возрастает в связи с тем, что модуль объемного сжатия воды значительно выше аналогичной характеристики грунта. Так как нелинейность механического поведения жидкости ощутима лишь в широком диапазоне изменения давления, второй участок диаграммы  $\sigma_1(\varepsilon_1)$  в пределах исследованного диапазона вариации  $\sigma_1$  также имеет вид, близкий к линейному (см. кривые 6–9).

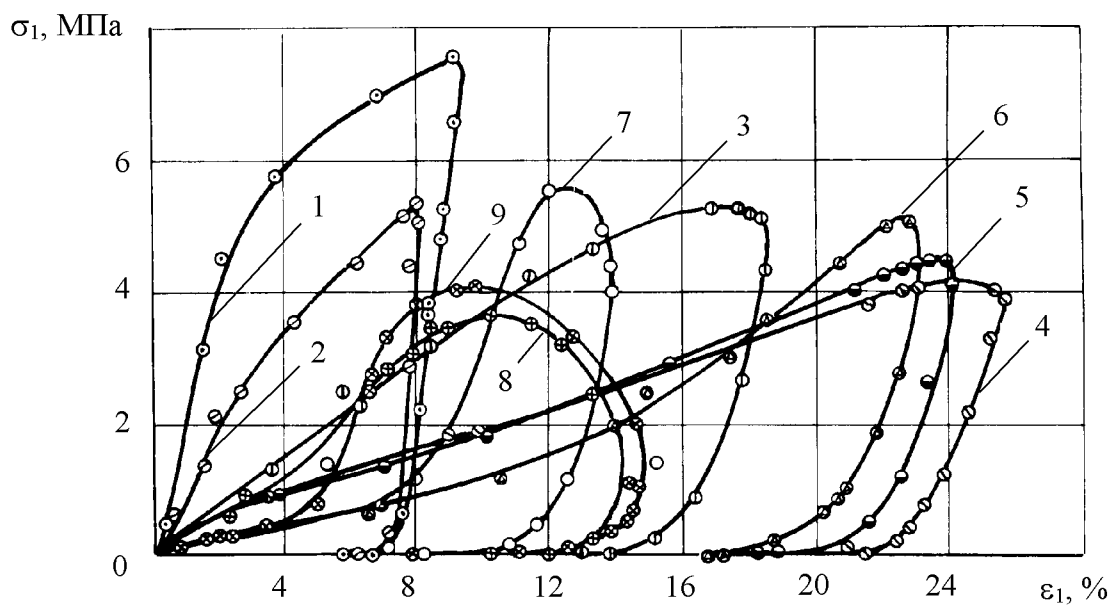


Рис. 2. Диаграммы динамического деформирования пылеватых глин влажностью  $W = 3,1\%$  (1),  $5,8\%$  (2),  $7,8\%$  (3),  $11,1\%$  (4),  $13,7\%$  (5),  $16,9\%$  (6),  $19,1\%$  (7),  $21,1\%$  (8),  $24,8\%$  (9)

Рис. 2 позволяет выделить диапазон влажности, при которой способность грунта к уплотнению максимальна. Для испытанных глин он составляет 11...17%, то есть включает насыщение адсорбированной и лиосорбированной влагой. И хотя максимум деформативности характеризуется одним всплеском зависимости  $\varepsilon_1(W)$ , его структура, как это видно из рис. 3, отражающего влияние влажности грунта на величину его осевой деформации при равных амплитудах динамического нагружения, имеет ряд особенностей, на которые следует обратить внимание.

Прежде всего отметим, что диапазон изменения влажности, который отвечает максимальной склонности грунта к уплотнению, остается неизменным при любых уровнях нагружения. Однако распределение деформаций в пределах этого диапазона не является монотонным, как это отмечалось в [5], а характеризуется наличием двух всплесков величины  $\varepsilon_1$ . Первый из них наблюдается при влажности  $\sim 11,5\%$ , второй – при  $W = 16,9\%$ .

При небольших уровнях динамического воздействия уплотнение грунта развивается преимущественно за счет второго всплеска  $\varepsilon_1(W)$ . Однако с увеличением осевой нагрузки роль первого всплеска постепенно возрастает, и при  $\sigma_1 \geq 3 \dots 3,5$  МПа он становится опережающим, определяя величину  $\varepsilon_1$  (рис. 3). Сопоставляя этот факт с упомянутой выше структурой связанной влаги, можно сделать вывод, что в области оптимального увлажнения при относительно небольших уровнях динамического воздействия деформационный процесс, развивающийся за счет сокращения свободной пористости грунта, сопровождается перераспределением лиосорбированной влаги в его поровом пространстве, способствующим выравниванию порового влагонасыщения и соответствующему увеличению деформационной податливости грунта. При более высокой интенсивности динамического нагружения развитие миграционных процессов тормозится из-за инертности массопереноса, и их влияние на деформирование грунта уменьшается. Грунт, как и раньше, деформируется за счет сжатия скелета как сплошной среды, причем адсорбированная влага способствует снижению межзернового трения в процессе переупаковки минеральных частиц и росту деформационной податливости грунта, а ее влияние на деформационный процесс становится опережающим. Такой вывод наглядно иллюстрируется графиками на рис. 4, которые отражают эволюцию деформации грунта при  $W = 11,5\%$  (адсорбированная влажность) и  $W = 16,9\%$  (общее содержание адсорбированной и лиосорбированной влаги). Любопытно, что при отсутствии лиосорбции грунт по крайней мере до  $\sigma_1 = 5$  МПа деформируется как линейное тело, что характерно для большинства твердых сплошных сред. Если в грунте присутствует лиосорбированная влага, зависимость  $\varepsilon_1(\sigma_1)$  становится существенно нелинейной, что характерно для ненасыщенных трехфазных сред [9], допускающих возможность межфазовых перетоков. Кривые на рис. 4 удовлетворительно аппроксимируются выражениями:

$$\text{кривая 1} \quad \sigma_1(\varepsilon_1) = 18,35\varepsilon_1; \quad (1)$$

$$\text{кривая 2} \quad \sigma_1(\varepsilon_1) = 8,81\varepsilon_1^{1,636}. \quad (2)$$

Проведем аналогичный анализ особенностей деформационных процессов в области сорбционного влагонасыщения, используя экспериментальные результаты, описанные в [4] для кудиновской глины, влажность которой варьировалась от  $17,6\%$  до  $32,5\%$ , и люберецкого песка влажностью от  $0,3$  до  $23,7\%$ . Другие свойства этих грунтов и их гранулометрический состав вместе с диаграммами динамического деформирования приведены в работе [4]. К сожалению, в ней отсутствует информация о возможном количестве адсорбированной и лиосорбированной влаги в таких грунтах. Однако, принимая во внимание мнение ряда исследователей о том, что количество

прочно связанной влаги хорошо коррелирует с максимальной гигроскопичностью грунта, а общее количество связанной воды соответствует нижнему пределу Аттерберга [8], можно предположить, что при отклонении отдельных измерений от средней величины не более, чем на 10%, в люберецких песках адсорбционное насыщение соответствует влажности 10...12%, а общее содержание связанной влаги в кудиновской глине составляет 20,9...25,3%.

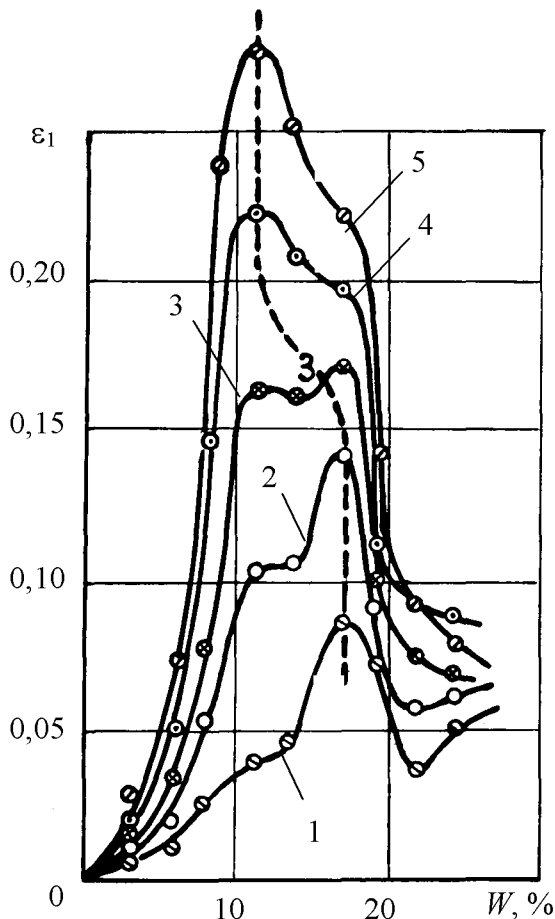


Рис. 3. Зависимости осевой деформации грунта от его массовой влажности при  $\sigma_1 = 1$  (1), 2 (2), 3 (3), 4 (4), 5 (5) МПа

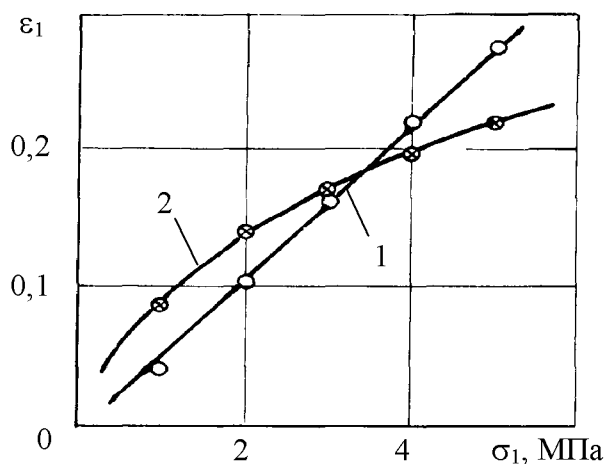


Рис. 4. Эволюция деформирования грунта при  $W = 11,5\%$  (1) и  $W = 16,9\%$  (2) в зависимости от интенсивности осевой нагрузки

На рис. 5 показаны зависимости осевой деформации кудиновской глины (а) и люберецкого песка (б) от влажности и интенсивности нагружения.

Обращает на себя внимание качественная идентичность кривых на рис. 3 и 5. Как и в опытах с херсонской глиной, здесь тоже отчетливо видно, что максимальная уплотняемость грунта наблюдается при его насыщении связанной водой, причем каждый вид связанной влаги играет свою роль в развитии деформационного процесса. Для кудиновской глины характерны все его особенности, описанные выше для херсонских глин, однако из-за более низкого содержания глинистых частиц в ней преимущественное влияние рыхлосвязанной воды отмечается лишь при относительно невысоких амплитудах нагружения – до 1 МПа. В люберецких песках роль лиосорбированной влаги второстепенна во всем диапазоне динамических нагрузок. Это, как отмечено в [3], объясняется относительным содержанием связанной воды в тонкозернистых грунтах типа глин, где толщина пленки сорбированной влаги сравнима с размером минеральных частиц, и в крупнозернистых грунтах типа песков, где толщина сорбированной пленки ничтожно мала по сравнению с характерным размером зерна и максимальная деформационная податливость определяется только содержанием адсорбированной влаги.

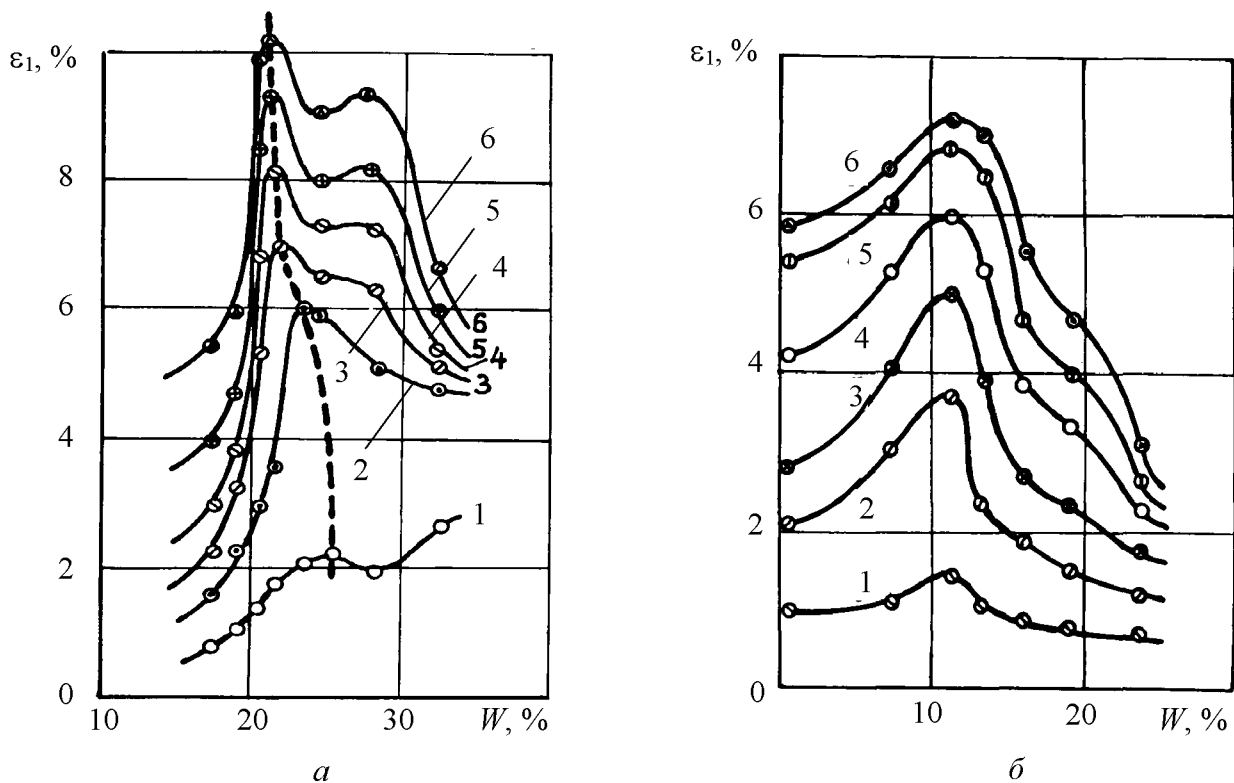


Рис. 5. Зависимость  $\varepsilon_1(W)$  в кудиновской глине (а) и люберецком песке (б) при осевом давлении  $\sigma_1 = 0,4$  (1), 0,8 (2), 1,2 (3), 1,6 (4), 2,4 (5) и 3,6 (6) МПа

Перераспределение ролей адсорбированной и лиосорбированной влаги в развитии динамического деформационного процесса в зависимости от интенсивности напряженного состояния грунта наглядно проявляется в смещении максимума осевой деформации из области рыхлосвязанного в область прочно связанного влагонасыщения (на рис. 3 и 5 – вдоль штриховых линий).

Таким образом, основываясь на результатах экспериментальных наблюдений, можно сделать вывод о существовании двух механизмов уплотнения глинистого грунта при динамических нагрузках в зависимости от их интенсивности, если его влагонасыщение отвечает максимуму связанной влаги: при относительно небольших уровнях нагружения ( $\sigma_1 \leq 3$  МПа) деформирование грунта происходит за счет сжатия минерального скелета с выравниванием порового насыщения путем межпоровой миграции рыхлосвязанной воды. При более высоких напряжениях ( $\sigma_1 > 1...3$  МПа) роль миграционных процессов ослабевает из-за увеличения скорости деформирования, и уплотнение (также за счет скелета минеральной фазы) осуществляется в условиях, когда благоприятствующим фактором становится адсорбированная влага. Заметим, что и при интенсивных нагрузках, несмотря на опережающее развитие деформационного процесса при влажности, отвечающей максимальному содержанию адсорбированной влаги, роль миграции лиосорбированной влаги остается существенной (см. кривые на рис. 3 и 5). Этот вывод характерен для дисперсных грунтов, содержащих значительное количество глинистых фракций. В песчаных грунтах влияние лиосорбированной влаги на процесс динамического деформирования грунта практически незаметно.

Фильтрационный массоперенос в глинистых грунтах является достаточно медленным процессом, поэтому миграция поровой влаги должна оказывать влияние на временные характеристики напряженно-деформированного состояния грунта. Этот факт подтверждается экспериментально. В табл. 2 приведены сведения о продолжительности возрастания давления до заданного уровня в херсонских глинах разной влажности, которые свидетельствуют о том, что каждому уровню нагружения соответствует своя величина влажности, отвечающая наиболее замедленному росту нагрузки.

Таблица 2. Продолжительность возрастания давления до заданного уровня в херсонских глинах разной влажности

№ опыта	W, %	Время (мс) нарастания давления до				
		1 МПа	2 МПа	3 МПа	4 МПа	5 МПа
19	3,1	0,94	1,08	1,25	1,60	1,96
18	5,8	0,76	1,24	2,16	2,76	3,20
17	7,8	1,45	2,13	2,68	3,19	4,04
20	11,1	1,36	2,56	3,24	4,26	4,55
16	13,7	1,27	2,53	3,25	4,01	4,68
21	16,4	2,25	2,82	3,05	3,09	–
23	19,1	2,16	2,67	3,10	3,53	3,88
22	21,7	1,38	1,69	1,92	2,19	2,44
24	24,4	1,65	1,86	2,06	2,27	2,45

Для  $\sigma_1 = 1...2$  МПа эта влажность равна 16...17%; для  $\sigma_1 = 3$  МПа  $W = 13...14\%$ ; для  $\sigma_1 = 4...5$  МПа – 11...13%, то есть в диапазоне изменения влажности грунта,



оптимальной с точки зрения его деформационной податливости, имеет место сдвиг величины  $W$ , отвечающей максимуму времени нарастания давления до некоторого уровня, в сторону ее уменьшения при увеличении интенсивности динамической нагрузки. Наглядно это иллюстрируется кривыми на рис. 6, где номер кривой совпадает с уровнем осевого давления в МПа.

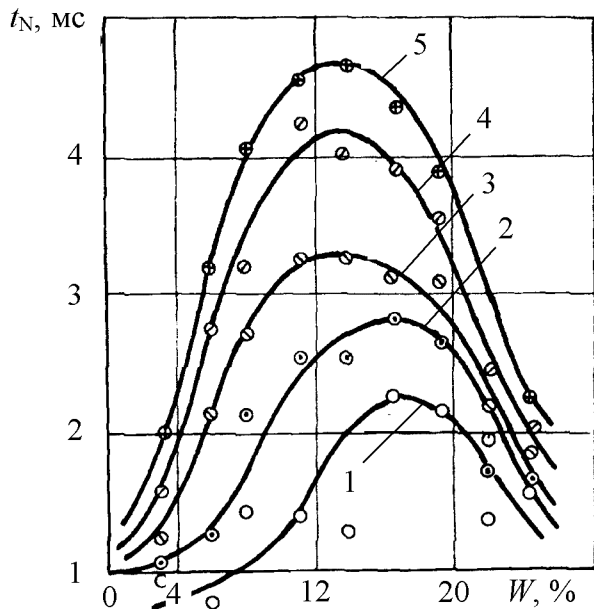


Рис. 6. Влияние влажности грунта на время нарастания давления

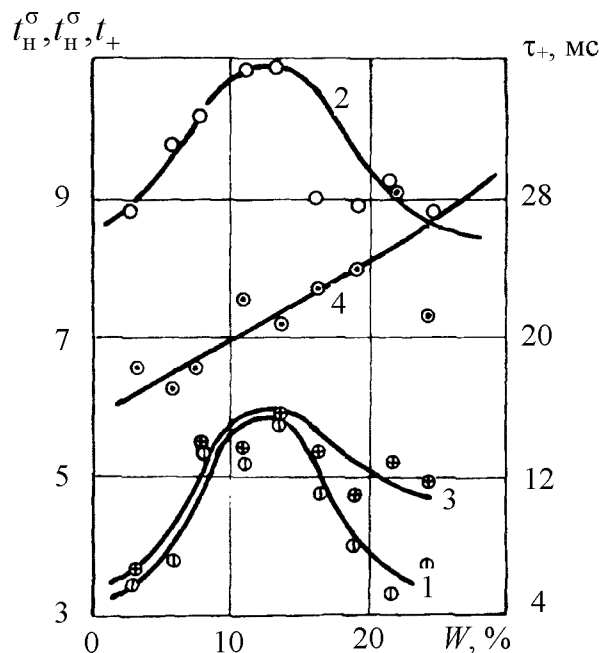


Рис. 7. Влияние влажности на временные характеристики напряженно-деформированного состояния херсонских глин при динамическом нагружении

Если влагосодержание грунта недостаточно для завершения адсорбционных процессов, его сопротивление деформированию хотя и определяется уплотнением минерального скелета, однако существенно возрастает за счет межзернового трения, а поведение грунта приобретает черты, характерные для твердых тел. При наличии свободной влаги сопротивление грунта также возрастает, но в этом случае за счет объемного сжатия воды, сжимаемость которой на несколько порядков меньше, чем у грунта. При полном насыщении порового пространства поведение грунта приобретает черты, характерные для жидкости в соответствии с моделью “грунтовой массы” Н. М. Герсеванова. Понятно, что в обоих случаях время нарастания давления уменьшается (см. рис. 6).

Любопытно, что увлажнение грунта влияет на общие временные характеристики его импульсного напряженно-деформированного состояния, вызванного динамической нагрузкой (см. табл. 1). Это влияние таково, что при влажности, соответствующей максимальному количеству связанной воды, период нарастания избыточного давления до максимума, продолжительность его действия и время увеличения деформации достигают максимальных величин, и лишь общая продолжительность деформационного процесса с увеличе-

нием влажности монотонно (почти линейно) возрастает благодаря явлениям, сопровождающим разгрузку, включая последствие [6]. Наглядно эти зависимости иллюстрируются кривыми на рис. 7: 1 –  $t_{\Pi}^{\sigma}(W)$ ; 2 –  $t_{+}(W)$ ; 3 –  $t_{\Pi}^{\varepsilon_1}(W)$ ; 4 –  $\tau_{+}(W)$ .

Коль скоро отмеченные выше особенности влияния вида связанной влаги на деформирование глинистого грунта связаны с перемещением рыхлосвязанной воды, попытаемся оценить кинематические характеристики этого явления – скорость перетока влаги и расстояние, на которое он распространяется. К сожалению, современная техника эксперимента не дает возможности провести их непосредственное измерение, поэтому для выяснения порядка их величины воспользуемся теоретическими представлениями, изложенными в работах [10–13].

Будем рассматривать херсонские глины как пористую среду, сложенную шарообразными минеральными частичками, размер которых равен средне-взвешенному диаметру зерен реального грунта. Согласно изложенному выше он равен 0,02765 мм. Каждая из частичек окружена пленкой связанной влаги толщиной приблизительно  $1 \cdot 10^{-4}$  мм [3]. Упаковку частичек примем согласно основной модели грунта по Ч. С. Сликтеру [10] такой, чтобы пористость этой фиктивной среды количественно совпадала с пористостью реального грунта, равной 39,6 %. Полагая, что поровые каналы под влиянием сил поверхностного натяжения связанной влаги приобретают форму, близкую к круглоцилиндрической, найдем эффективный радиус такого канала в соответствии с принятой моделью грунта:  $r_{\Pi} = 0,99 \cdot 10^{-5}$  м. Движение поровой влаги по поровому каналу может происходить в двух основных режимах – ламинарном и турбулентном, разграниченных некой критической скоростью потока, зависящей от числа Рейнольдса, между которыми существует переходная зона, где скорость движения влаги и градиент давления связаны законом Прони.

Если движение влаги происходит в режиме ламинарного течения, объем жидкости, перетекающей через поровый канал радиусом  $r_{\Pi}$  за одну секунду, равен [11]:

$$v = \frac{\pi \Delta p r_{\Pi}}{8 \nu \rho l}, \quad (3)$$

где  $\Delta p$  – разность давлений на входе и выходе из канала;  $\nu$  –  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость жидкости плотностью  $\rho$ ;  $l$  – длина канала.

Расчеты по формуле (3) в качестве примера выполним для кривой 2 (см. рис. 3), где зарегистрировано наиболее резкое отличие вкладов лиосорбированной и адсорбированной влаги в развитие деформационного процесса. Приняв длину канала равной характерному размеру (радиусу) образца, по формуле (3) найдем, что при  $\Delta p = 2$  МПа,  $V = 0,96 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/с. При этом средняя скорость потока оказывается равной 0,312 м/с, а средняя длина пути миграции  $7,1 \cdot 10^{-3}$  м. Таким образом, при ламинарной миграции рыхлосвязанной влаги ее скорость может достигать 30 см/с, а перемещение ограничивается миллиметровым диапазоном в силу краткосрочности ( $\tau_{+} = 22,75 \cdot 10^{-3}$  с) деформационного процесса.

Если поток грунтовой влаги имеет турбулентный характер, то согласно [11] его скорость определяется по формуле

$$V = \sqrt{\frac{r_{II} \Delta p}{2 \zeta^2 \rho}} \ln \frac{r_{II}}{\Delta}, \quad (4)$$

где помимо уже известных обозначений  $\zeta = 0,4$  – постоянная Кармана;  $\Delta$  – высота выступов шероховатости стенок канала.

Согласно [13] для поровых каналов, покрытых слоем сорбированной влаги,  $\Delta$  приблизительно равно  $0,65 \cdot 10^{-3}$  мм и соответственно  $V = 0,38$  м/с, длина пути миграции –  $8,65 \cdot 10^{-3}$  м.

Как видим, и при турбулентном режиме миграции рыхлосвязанной влаги ее кинематические характеристики варьируются в том же масштабном диапазоне. Из этого можно сделать вывод, что при принятом в расчетах градиенте давлений движение грунтовой влаги скорее всего удовлетворяет режиму фильтрации, переходящему в ламинарный при уменьшении величины  $\frac{\Delta p}{l}$  и в

турбулентный при ее увеличении. Это подтверждается и расчетом критических скоростей потока по В. Н. Щелкачеву и В. Д. Миллионщикову [10]. Заметим, что формула (4) по виду аналогична формуле Шези, используемой в курсах гидравлики [13] для описания турбулентных течений.

### Выводы

Таким образом, на основании экспериментальных данных и теоретических расчетов можно сделать вывод о существовании двух механизмов уплотнения глинистого грунта при динамических нагрузках, если его влагонасыщение отвечает максимальному содержанию связанной влаги: при относительно небольших уровнях нагружения ( $\sigma_1 \leq 3$  МПа) в роли основного благоприятствующего фактора при уплотнении минерального скелета грунта выступает миграция поровой влаги, выравнивающая степень насыщения порового пространства; при более интенсивных нагрузках ( $\sigma_1 \geq 3$  МПа) ее влияние на развитие деформационного процесса ослабевает из-за увеличения скорости деформирования, а роль главного благоприятствующего фактора переходит к адсорбированной влаге, способствующей процессу уплотнения грунта благодаря снижению межзернового трения.

1. *Лебедев А. Ф.* Уплотнение грунтов при различной их влажности. – М.: Стройвоенмориздат, 1949. – 56 с.
2. *Цытович Н. А.* Механика грунтов. – М.: Высш. школа, 1973. – 280 с.
3. *Орнатский Н. В.* Механика грунтов. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 448 с.
4. *Ставицер Л. Р.* Деформации оснований сооружений от ударных нагрузок. – М.: Стройиздат, 1969. – 126 с.
5. *Вовк А. А., Черный Г. И., Михалюк А. В.* Влияние влажности на динамическую деформируемость суглинков // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1972. – № 3. – С. 6–8.

6. *Михалюк А. В., Захаров В. В.* Последствие при динамическом деформировании грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – № 6. – С. 6–11.

7. *Ломтадзе В. Д.* Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. – Л.: Недра, 1972. – 312 с.

8. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. – М.: Изд-во МГУ. – 1968. – Т. II. – 371 с.

9. *Вовк А. А. и др.* Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. – К.: Наук. думка, 1984. – 288 с.

10. *Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б.* Подземная гидравлика. – М.–Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 524 с.

11. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

12. *Полубаринова-Кочина П. Я.* Теория движения грунтовых вод. – М.: Физматгиз, 1977. – 664 с.

13. *Чугаев Р. Р.* Гидравлика. – Л.: Энергия, 1971. – 552 с.