

УДК 622.793.2-17:504

**ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ПРИ  
ОРГАНИЗАЦИИ НА НИХ КАРЬЕРОВ**

Канд. техн. наук      Г.Т. Трунков  
Канд. техн. наук      М.А. Шинтемиров

*Приведены результаты экспериментальных исследований уплотнения-разуплотнения отложений хвостохранилищ при их намыве и при разработке карьеров для утилизации отходов*

Одним из путей снижения отрицательного влияния деятельности горно-обогатительных предприятий на геологическую среду является утилизация отходов технологических процессов. Отходы переработки горной массы имеют ряд полезных компонентов, использование которых в народном хозяйстве позволяет существенно сократить перерабатываемые объемы, уменьшить площадь отвода полезных земель и повысить рентабельность производства. Вторичная утилизация может позволить организовать производство материалов для промышленного и дорожного строительства (цемента, извести и др.). В ходе вторичного использования техногенных материалов из них могут извлекаться ценные попутные компоненты (металлы, редкоземельные элементы и др.). На базе утилизации может быть налажено производство минеральных удобрений.

К особенностям техногенного грунтового массива, каковым является хвостохранилище, следует отнести его гранулометрическую и плотностную неоднородность, являющейся результатом фракционирования – раскладкой частиц по крупности. В зонах, близких к месту выпуска пульпы, крупность намывтых хвостов является максимальной, а по мере приближения к пруду-отстойнику отложения характеризуются все меньшей крупностью. Зона отложения крупных песчаных фракций, называемых обычно пляжем, характеризуется сравнительно высокими плотностями укладки. Прудковые отложения отличаются обычно очень рыхлым сложением. Уплотнение пляжных грунтов под действием напряжений от собственного веса, протекает очень быстро во времени, ввиду больших коэффициентов фильтрации песчаных отложений, и следовательно, быстрого рассасывания избыточных поровых давлений. Процесс уплотнения рых-

лых водонасыщенных прудковых отложений (их консолидация) затягивается, обычно на очень долгий срок (иногда на несколько лет), так как характерной особенностью этих отложений являются малые коэффициенты фильтрации даже при больших коэффициентах пористости. Расчет напряженно-деформированного состояния техногенного грунтового массива, для проведения прочностных расчетов, необходимо производить с учетом нестабилизированного порового давления.

Снятие, с целью вторичной утилизации, некоторых объемов грунта с поверхности прудковой или пляжной зон хвостохранилища приводит к изменению напряженно-деформированного состояния. Процессы разуплотнения, сопутствующие уменьшением напряжений в скелете грунта, сопровождаются уменьшением избыточных поровых давлений. В том случае, когда мощность снимаемого слоя значительна, а коэффициент фильтрации грунта мал, избыточные поровые давления могут опуститься ниже атмосферных значений. Явление разуплотнения водонасыщенных грунтов или реконсолидация (по аналогии с консолидацией), характеризующееся отрицательным (ниже атмосферного) давлением в поровой воде, должно быть учтено при расчете напряженно-деформированного состояния массива на котором организуется карьер. Негативным фактором, влияющим на устойчивость борта такого карьера, являются фильтрационные напряжения которые, ввиду образующегося градиента напоров, воздействуют на скелет грунта. Наиболее актуальным, учет реконсолидации при расчете устойчивости, представляется для рыхло-сложенных массивов, грунты которых, к тому же, обладают малыми коэффициентами фильтрации. Необходимость учета процесса реконсолидации при расчете напряженно-деформированного состояния песчаных пляжных массивов, грунты которых обладают, обычно, большими коэффициентами фильтрации, должна выясняться в ходе экспериментальных исследований.

В лаборатории механики грунтов и устойчивости хвостохранилищ Санкт-Петербургского политехнического университета проведено исследование физико-механических свойств отложений хвостохранилищ в процессе нагружения и разгрузки. Экспериментальные исследования процессов уплотнения и разуплотнения проводились в условиях компрессионного сжатия и разгрузки для тонкодисперсных отложений прудковых зон хвостохранилищ Уральского алюминиевого завода (УАЗа), Верхнеднепровского горно-металлургического комбината (ВДГМК) и медного обогатительного комбината «Асарел» в Болгарии. Характеристики исследуемых грунтов приведены в табл..

Испытания проводились на стандартных приборах одноосного сжатия, дополнительно оборудованных датчиками для замера порового давления. Грунт в приборы загружался в виде пасты с заданной плотностью-влажностью. Уплотнение грунта производилась ступенями до полной стабилизации деформаций, разгрузка производилось аналогичными ступенями. Разгрузка грунта осуществляется по двум схемам – с подтоком воды и без него. При разгрузке грунта с возможностью подтока воды величина деформаций значительно больше, чем без него. Отмечено, что время стабилизации деформаций при разгрузке значительно больше, чем при нагрузке.

Таблица

Основные физические свойства грунтов

Исследуемый грунт	Плотность г/см <sup>3</sup>		Влажность			Число пластичности	Коэффициент	
	частиц грунта	начальная влажного грунта	естественная	на границе			пористости начальный	фильтрации начальный см/с
				текучести	раскалывания			
«Асарел», переходная зона	2,70	2,41	0,70	0,60	0,36	0,24	0,90	A 10 <sup>-5</sup>
«Асарел», прудковая зона	2,70	1,78	0,75	0,68	0,35	0,33	1,65	A 10 <sup>-7</sup>
ВДГМК, прудковая зона	2,70	1,20	2,80	0,62	0,32	0,30	7,54	A 10 <sup>-8</sup>
УАЗ, прудковая зона	3,49	1,53	0,78	0,57	0,34	0,23	3,06	A 10 <sup>-6</sup>

На рис. 1 приведены зависимости изменения модуля деформации грунта при нагрузке и разгрузке для прудковых отложений хвостохранилищ ВДГМК и УАЗа. Из графика видно, что величина модуля деформаций при разгрузке в 20...50 раз больше, чем при нагрузке в том же диапазоне изменения напряжений. Зависимость модуля деформаций от напряжений приобретает нелинейный характер на последних ступенях разгрузки.

При испытании отложений ВДГМК и «Асарел» опыты сопровождались замером поровых давлений в процессе нагружения и разгрузки. Приложение нагрузки приводило и появлению избыточного давления в поровой воде, которое постепенно, по мере стабилизации деформаций, уменьшилось до атмосферного. Снятие нагрузки с полностью консолидированного грунта вызывало снижение порового давления ниже атмосферного, а затем, по мере развития деформаций разуплотнения, повышение

его до атмосферного. На рис. 2 приведены графики изменения порового давления в образцах грунта переходной зоны хвостохранилища «Асарел» при ступенчатом (0,2 МПа) приложении и снятии нагрузки, иллюстрирующие влияние степени уплотнения грунта на экстремальное значение порового давления. Существенным различием процессов уплотнения и разуплотнения является более поздние сроки появления экстремального порового давления при разгрузке.

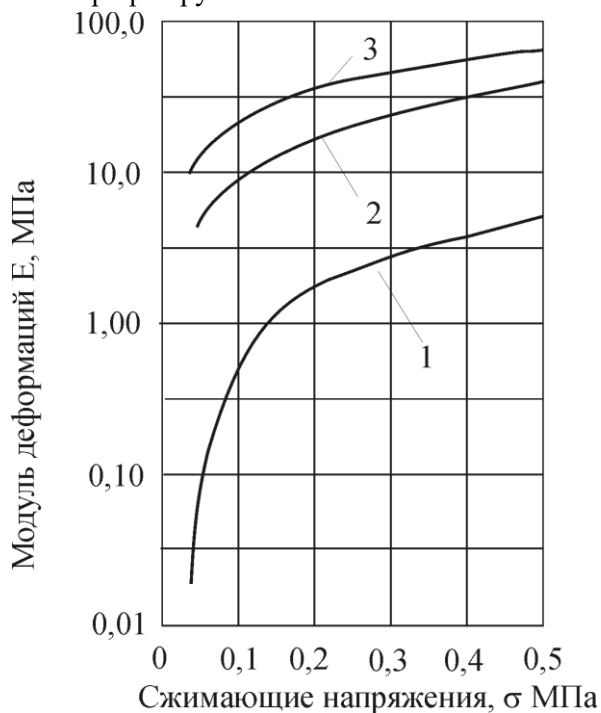
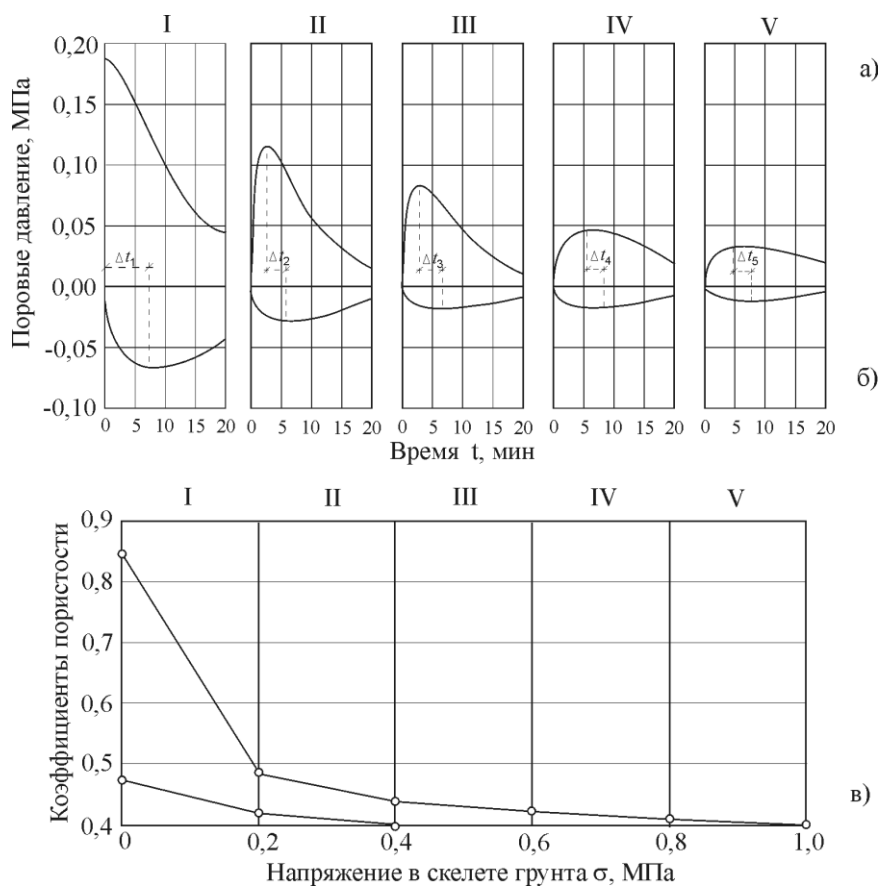


Рис. 1. Изменение модуля деформаций грунтов прудковых отложений УАЗа при нагрузке (1) и при разгрузке с подтоком воды (2) и без него (3).

На рис. 3 представлены результаты замеров порового давления в образцах грунтов различных по своим свойствам (хвостохранилище «Асарел», прудковая и переходная зоны). К образцам грунта прикладывалась уплотняющая нагрузка интенсивностью 0,2 МПа и в процессе стабилизации деформаций замерялось поровое давление. После затухания деформаций указанная нагрузка снималась и проводились замеры порового давления во времени до его стабилизации. Как видно на рисунке, время нахождения в нестабилизированном состоянии более глинистого грунта прудковой зоны в процессе уплотнения и разуплотнения значительно больше.



*Рис. 2. Изменение избыточного порового давления во времени при приложении (а) и снятии (б) уплотняющей нагрузки и компрессионная кривая (в), характеризующая степень уплотнения. I...V – номер ступени прикладываемой к образцу или снимаемой с него нагрузки,  $\Delta t$  – разница во времени развития максимального порового давления при приложении и снятии одинаковых ступеней нагрузки.*

Условия протекания опыта оказывает значительное влияние на развитие порового давления и деформаций разуплотнения. На рис. 4 показано изменение порового давления и деформаций грунта прудковой зоны хвостохранилища ВДГМК при разгрузке образцов, предварительно уплотненных сжимающей нагрузкой интенсивности 0,05 МПа. Как видно на графике, величина и время относительной деформации разуплотнения в условиях подтока к образцу воды значительно выше, чем без подтока. Экстремальное значение порового давления при подтоке воды и без него существенно не отличаются друг от друга, но выравнивание давлений быстрее происходит в первом случае.

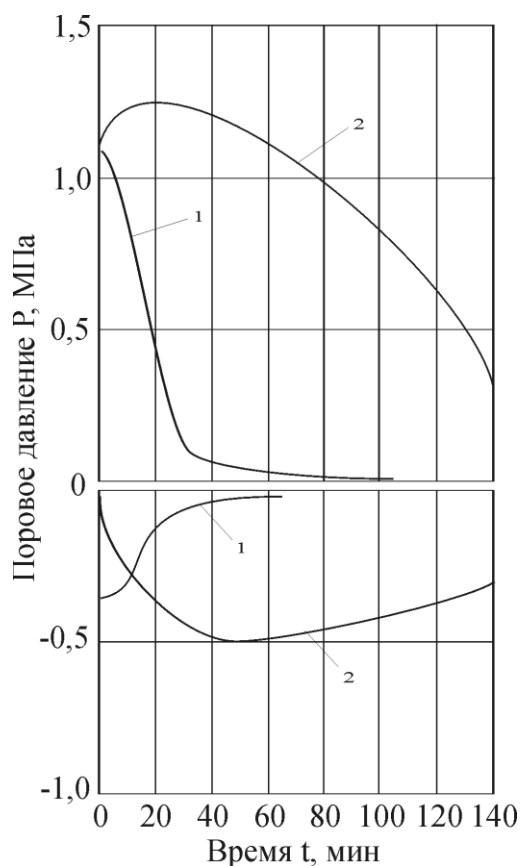


Рис. 3. Изменение во времени порового давления при приложении (а) и снятии (б) уплотняющей нагрузки для грунтов различных свойств. 1 – грунт переходной зоны хвостохранилища «Асарал»; 2 – грунт прудковой зоны.

В результате экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Снятие нагрузки, как и её приложение вызывает появление в грунте нестабилизированного состояния, характеризующегося избыточным (ниже атмосферного) поровым давлением. Процесс реконсолидации (разуплотнение сопровождающееся дефицитом давления в поровой воде) необходимо учитывать при определении напряженно-деформированного состояния разуплотняющегося грунтового массива.
2. Компрессионный модуль деформаций грунта при разгрузке значительно превышает модуль при нагрузке. Очевидно нелинейный характер разгрузочный модуль приобретает при малых приложенных нагрузках.

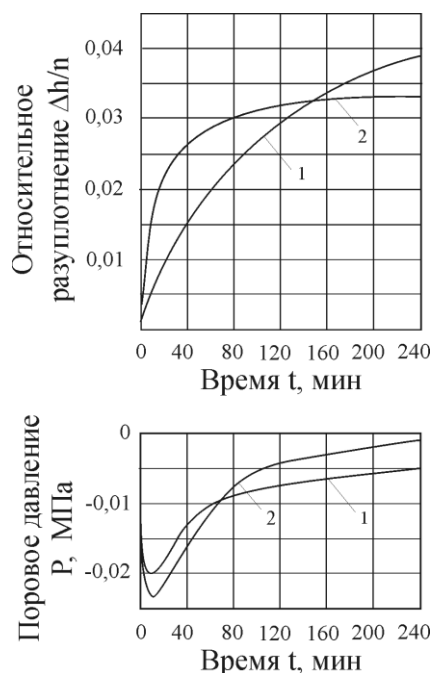


Рис. 4. Деформации (а) и поровое давление (б) при реконсолидации с подтоком воды (1) и без него (2).

3. Время стабилизации поровых давлений и деформаций при разгрузке значительно больше, чем при нагрузке. Это явление объясняется более ползучим характером процесса разуплотнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений – М.: Высшая школа, 1991 – 447 с.
2. Флорин В.А. Теория уплотнения земляных масс. – М.: Стройиздат, 1948 – 284 с.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

#### КАРЬЕРЛЕРДІ ҰЙЫМДАСТЫРУ КЕЗІНДЕГІ ҚОЙМА МАССИВТЕРІНІҢ КЕРНЕУ – ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНЫҢ ЕРЕКШЕЛІГІ

Техн. ғылым. канд. Г.Т. Трунков  
Техн. ғылым. канд. М.А. Шинтеміров

*Қоймадағы шөгінділерді шайыу кезіндегі нығыздау, сонымен бірге қалдықтарды пайдалану үшін карьерлерді босаңсытуды ұйымдастырудың эксперименттік зерттеулерінің нәтижесі қарастырылған.*