Записки Санкт-Петербургского горного института им.Г.В.Плеханова
Т. 133. СПб, 1992

УДК 624.131.537

Т.Ю.СКВОРЦОВА

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПИОНЕРНОЙ И НАМЫВНОЙ ДАМБ НА СЛАБОМ ОСНОВАНИИ (ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ АНОФ-2 ПО "АПАТИТ")

Характерная особенность любого хвостохранилища, в отличие от других типов инженерных сооружений, состоит в том, что все элементы конструкции накопителя: пионерные дамбы (упорные призмы) и намывные откосы - составляют единую гибкую систему, надежность эксплуатации которой мало зависит от неравномерности развития деформаций ее элементов, поскольку технология возведения накопителя является управляемым процессом. Наиболее скрытые и неуправляемые изменения при эксплуатации хвостохранилища происходят с генетически слабыми породами основания: малолитифицированными глинистыми породами, илами, торфом и неконсолидированными техногенными отложениями. Поскольку в откосной части основания накопителя нагрузка от пионерной дамбы и намывных отложений распределена по закону треугольника, то в этой части возможно и выдавливание слабых отложений из-под оградительной дамбы и их уплотнение. Так как процессы уплотнения, упрочнения (фильтрационная консолидация) и выдавливания (ползучесть) в этих отложениях протекают одновременно, то их раздельное рассмотрение может привести к неправильным выводам относительно прочности пород и соответственно неточному параметрическому обеспечению расчетов устойчивости. Поэтому основное внимание в прогнозной оценке устойчивости намывного объекта должно обращаться на исследование прочности слабых отложений и ее изменений в процессе эксплуатации (из-за динамики намыва в одной точке), а также под влиянием физико-химических и микробиологических процессов.

Хвостохранилище обогатительной фабрики апатит-нефелинового производства ПО "Апатит" АНОФ-2 относится к накопителям озерного типа, где складирование отходов с 1973 г. ведется гидравлическим способом на территории губы Белой озера Имандра. Летом 1990 г. намыв пульпы велся на абсолютной отметке +163 м (для формирования яруса +170 м), при этом уровень в прудковой части накопителя составлял +159 м, что на 32 м выше отметки зеркала воды озера Имандра.

Наибольшее опасение с точки зрения развития различных деформаций и нарушения устойчивости на хвостохранилище АНОФ-2 вызывает дамба № I протяженностью 1200 м, возведенная на диатомовых илах различной мощности, под-

стилаемых озерными песками. Изначально предполагалось, что подводными взрывами в процессе строительства пионерной дамбы № I будет обеспечено полное удаление слабых отложений и быстрое погружение каменной наброски до прочного основания. Однако эти прогнозы не оправдались. Выполненные в 1968 г. Всесоюзным НИИ гидротехники имени Б.В.Веденеева обследования состояния нижней части дамбы и ее основания с помощью ультразвукового грунтографа показали, что за год существования дамба № I и ее откосы существенно деформировались, причем остаточная мощность илов составила 50–70 % от первоначальной. Поскольку пионерная дамба № I служит подпорным сооружением, поддерживающим намывные массы, то она испытывает одновременное воздействие вертикальных и горизонтальных нагрузок, а наличие слабых отложений в ее основании создает условия для развития деформаций ползучести и связанных с ними изменений конфигурации дамбы в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Очевидно, что скорость и длительность процесса деформации илов в основании дамбы зависит от их мощности, изменения прочности и характера прилагаемых нагрузок. Затухание деформации в таком случае возможно или при полном выдавливании слабых отложений из-под дамбы, или при повышении их несущей способности вследствие уплотнения в процессе фильтрационной консолидации.

Известно, что с момента отсыпки дамба постоянно испытывает вертикальные деформации, которые обусловлены отдавливанием илов $S_{полз}$ и их фильтрационной консолидацией $S_{ф.к}$. Таким образом, общая вертикальная деформация $S_B = S_{полз} + S_{ф.к}$.

Поскольку величина S_B по длине оси дамбы не является постоянной, то это предопределяет необходимость периодического наращивания и выравнивания гребня дамбы до проектных отметок +(I3I-I33) м подсыпкой местными песчаными материалами. В результате мощность дополнительного насыпного слоя на участке максимальной вертикальной деформации в настоящее время достигает 2,5 м. Если допустить, что максимально возможная вертикальная осадка пионерной дамбы может быть равна мощности слабых отложений, то дополнительная осадка составит еще как минимум 2,5 м. Однако на вопрос о преобладании какой-либо составляющей общей осадки S_B можно ответить лишь после изучения остаточной мощности слабых отложений и их состояния.

Для оценки возможности фильтрационной консолидации диатомовых илов в лабораторных условиях были определены значения коэффициентов фильтрации $K_ф$, сжимаемости a и пористости e и по ним рассчитаны коэффициенты консолидации $C_u = K_ф(1+e)/a$ (см. таблицу). Определив значения фактора времени $T_u = \pi^2 C_u t/h^2$ для условий одномерной фильтрации при $C_u = 10^3$ см^2/год, $h = 5$ м, $t = 22$ года, получим, что степень уплотнения диатомовых илов на 1991 г. составляет около 0,5. Вероятную оценку осадки слоя диатомовых илов за счет одномерной фильтрационной консолидации можно провести по экспериментальным зависимостям для биогенных грунтов*

$$S = h\,\frac{C(p_0)+M(p_0)x_f - C(p_i) - M(p_i)x_f}{1+C(p_0)+M(p_0)x_f},$$

* Anderland O.B. Organic material and soil compressibility // J. of geotech. eng. div. 1980. Vol. 106. № GT 7.

где p_0 – начальное природное давление; h – начальная мощность слоя; p_1 – нарастающая по ступеням Δp нагрузка, $p_1 = p_0 + \Delta p$; x_f – содержание органики, %; $C(p)$ и $M(p)$ – коэффициенты, получаемые по результатам экспериментального опробования органосодержащих пород.

Коэффициенты консолидации илов в различных диапазонах давления

Давление, МПа	a, $МПа^{-1}$	e	$K_ф$, 10^{-4} м/сутки	C_u, 10^3 $см^2$/год
0–0,01	89,2	6,10	4,6	1,35
0,01–0,02	47,7	5,57	1,8	2,7
0,02–0,03	58,6	5,01	0,93	3,5
0,03–0,04	53,3	4,43	1,1	4,0
0,04–0,05	27,2	3,50	0,3	1,9
0,05–0,06	8,17	3,20	0,056	1
0,06–0,07	0,67	3,08	-	-

При $h = 5$ м, $p_0 = 10^{-1}$ МПа, $p_1 = 0,46$ МПа, $x_f = 20$ % конечная осадка за счет фильтрационной консолидации органосодержащих пород, рассчитанная по этой формуле, составит 0,8 м. Таким образом, учитывая данные о величине вертикальных осадок, можно сказать, что фильтрационная консолидация носит подчиненное значение по сравнению с процессом отдавливания и ползучестью пород, а основным обобщенным параметром, отражающим структурные и деформационные особенности диатомовых илов, служит вязкость как функция влажности и плотности. Общей закономерностью, выявленной после испытаний диатомовых илов в вискозиметре Воларовича РВ-8, явилось подобие полученных реологических кривых кривым типа вязкопластического течения, подчиняющихся закону Бингама – Шведова. Для данных отложений также характерно увеличение способности илов к существенному упрочнению при приближении естественной влажности к значениям влажности на пределе текучести.

Первые инструментальные наблюдения Союзмаркштреста (ПО "Апатит") за смещением контрольных реперов на дамбе № I, начатые в 1984 г., позволили наметить направления смещения дамбы в горизонтальной плоскости, вызванное ползучестью подстилающих илов. Анализ результатов измерений горизонтальных скоростей смещения реперов за шесть лет наблюдений показывает, что "подвижки" оградительной дамбы носят периодический характер с затухающей во времени амплитудой (рис.I). Наибольшие скорости смещения $v = 3,5$ мм/месяц были отмечены на участке с максимальной мощностью (на период изысканий) подстилающих илов. Наличие даже незначительного горизонтального смещения пионерной дамбы обеспечивает намывному откосу возможность развития боковых деформаций и снижения активного давления.

Исследования Горного института в 1989 г. по оценке рельефа дна в 70-метровой зоне, примыкающей к дамбе № I со стороны озера Имандра, позволили установить, что процесс выдавливания илов из-под оградительной дамбы продолжается. Профильная съемка глубин, выполненная в плане через 2,5 и 5 м,

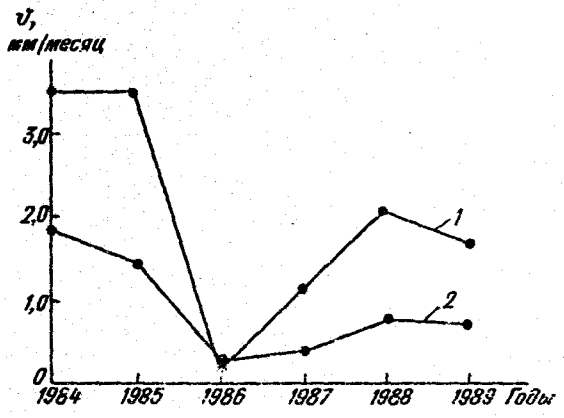


Рис.1. Изменение во времени средних скоростей смещения реперов при начальной мощности илов, равной 7,5 м (кривая 1) и 0,3 м (кривая 2)

позволила определить участок наиболее активного отдавливания илов, выразившегося в виде вала выдавливания, местоположение которого хорошо увязывается с данными маркшейдерских наблюдений за смещением реперов. Горизонтальные смещения за счет отдавливания слабых отложений в плане прослеживаются в виде первого фронта откоса пионерной дамбы у уреза воды озера. На протяжении оси дамбы от острова Избяной до острова Лампа-Солнце-I хорошо прослеживаются четыре таких крупных самостоятельных участка, имеющих в плане контур в виде фестонов. Границами фестонов служат максимальные понижения гребня пионерной дамбы, которые отражаются на развитии деформаций вышерасположенных намывных ярусов. Протяженность таких участков (фестонов) от 80 до 300 м. В пределах крупных фестонов различаются более мелкие, размерами 20-40 м, которые также имеют границы, выраженные в понижениях гребня, но без захвата (прослеживания понижения) намывного откоса. Формирование крупных и локальных фестонов подтверждает вывод о неравномерном характере смещения пионерной дамбы.

Из-за отсутствия современных данных об изменении мощности илов и их состояния в лаборатории было проведено вещественное моделирование процесса деформирования дамбы под вертикальной нагрузкой. В прозрачном лотке размером 48 х 32 х 10 см была смоделирована из гравия дамба, залегающая на сапропелях, и находящаяся под ступенчато-возрастающей нагрузкой, имитирующей рост высотной отметки гребня хвостохранилища. Выбор мощности слабых отложений h и размера гравия d в модели соответствовал соотношениям мощности ила H в озере Имандра и размерам набросного камня дамбы № I D, т.е. $D/H = d/h = 0{,}2$. В процессе опыта и после его завершения фиксировались характер изменения профиля поперечного сечения дамбы, глубина погружения каменно-набросного материала в ил, формирование вала выдавливания, его протяженность и высота, изменения плотности и влажности илов в различных зонах модели.

Под действием ступенчато-возрастающей нагрузки горизонтальная подошва дамбы трансформировалась через параболическую к квазитрапециевидной форме. Деформация насыпного объема происходила без "разрыва сплошности", т.е. погружение гравия в озерные отложения шло одновременно по всей площади нагружения, так как угол внутреннего трения гравия намного превышает угол внутреннего трения сапропеля, а сама дамба не является жестко" конструк-

цией и легко деформируется. Опыт считался завершенным, когда дамба оказалась полностью погруженной в сапропель, при этом "вдавленный" объем гравия принял зеркально отраженный контур дамбы до опыта (квазитрапециевидный). Наблюдения за деформациями поверхности сапропеля (в пяти точках) фиксировали процесс его самоуплотнения на протяжении всего опыта (3,5 месяцев), что внесло определенные затруднения в интерпретацию данных опыта. Подобное несовершенство модели учли, приняв за норму осадки сапропеля в процессе его самоуплотнения, осадку точки 24 (рис.2). Таким образом, объем

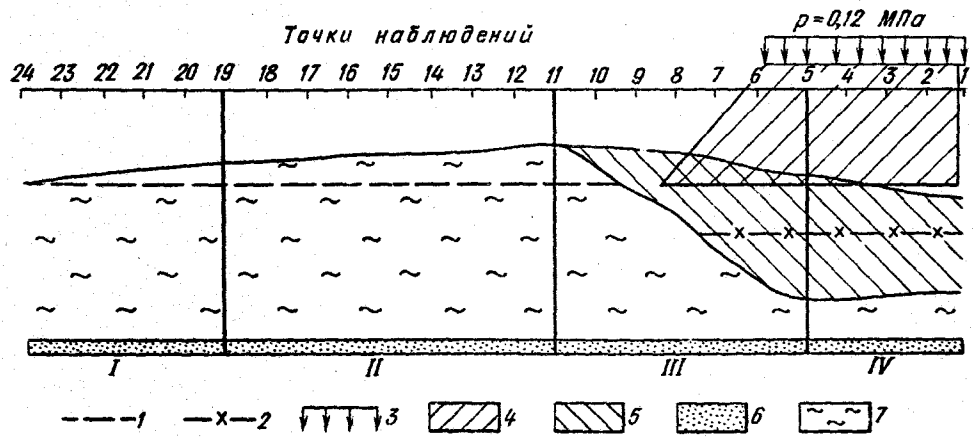


Рис.2. Схема модели и распределение зональности по результатам опыта
1 – нижняя граница вала выдавливания; 2 – теоретическое положение границы основания дамбы при фильтрационном уплотнении; 3 – площадь приложения нагрузки; 4 – начальный профиль дамбы; 5 – конечный профиль дамбы; 6 – песок; 7 – сапропель

сапропеля, находившийся выше горизонтальной плоскости, проходящей через точку 24, обусловлен отдавливанием сапропеля и составляет около 45 % объема "вдавленного гравия". По изменениям влажности W и плотности ρ сапропеля в модели были выделены четыре основные зоны: зона сохранившихся значений W и ρ I; переходная зона II, где расположен основной объем вала выдавливания и зафиксировано относительное снижение влажности отложений на 5–7 %; откосная зона III, где снижение W составляет уже 10–15 % по сравнению с зоной I; зона уплотнения и максимальных потерь влажности за счет фильтрационной консолидации IУ. Физические свойства сапропеля по зонам меняются следующим образом (здесь $\rho_{ск}$ – плотность скелета):

Зона	I	II	III	IУ
ρ, г/см³	1,31	1,314	1,329	1,349
$\rho_{ск}$, г/см³	0,50	0,517	0,538	0,589
W, %	168	160	145	123

При одномерном компрессионном уплотнении идентичных пород значения W и ρ, аналогичные зоне IУ, были получены под давлением p = 0,082 МПа, а относительная деформация образца при этом составила 29 %. Таким образом, для точек модели I–6 (рис.2) при развитии только фильтрационного уплотне-

ния граница подошва дамбы – ил должна была бы находиться выше фактической. Следовательно, можно говорить о существенно преобладающей роли пластических деформаций, формирующих вал выдавливания, по сравнению с деформациями, протекающими за счет фильтрационной консолидации. Можно заметить, что интенсивность пластических деформаций мало меняется по мере уплотнения илов в зоне действия максимальных напряжений, во всяком случае это оказывается справедливо для диапазона влажностей выше предела текучести. Вместе с тем постепенное уменьшение влажности в процессе фильтрационной консолидации определяет закономерность изменения этого параметра в основании откосной части дамбы и вне ее (см. рис.2), обусловливая зональность распределения влажности и плотности илов в объеме модели.

Полученная качественная характеристика дает возможность оценить тенденции изменения параметров физических свойств в реальных условиях – на пионерной дамбе № I хвостохранилища АНОФ-2, поскольку возникают достаточно серьезные трудности при проходке бурением каменно-набросной дамбы с последующим отбором илов ненарушенного сложения в ее основании. Опробование илов по глубине в зоне выдавливания позволит оценить при условии однородности гранулометрического и вещественного состава существующую зональность распределения влажности и плотности и определить активность протекания процесса уплотнения под дамбой (за счет фильтрационной консолидации), не проводя буровых работ.