

технических наук, профессор кафедры
«Мелиорация и рекультивация земель»
Тел. 8-916-611-80-23
E-mail: vodoem@mail.ru
Сольский Станислав Викторович,

доктор технических наук, заведующий
отделом «Основания, грунтовые и под-
земные сооружения»
Тел. 8-921-964-36-05
E-mail: solskiysv@vniig.ru

УДК 502/504:626/627

В. Н. АВЕРЬЯНОВ

ЗАО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБУХАЮЩЕЙ ГЛИНЫ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ ГАЭС

Дана оценка возможности использования набухающих глин для возведения противοфильтрационных экранов ГАЭС. Выполненными исследованиями показано, что нарушение естественной структуры глины при строительстве экрана и устройство его пригрузки в виде защитного покрытия практически исключают набухание глины и увеличение ее водопроницаемости. Экран, возведенный из этих глин, характеризуется коэффициентом фильтрации $K_f = A \cdot 10^{-9}$ см/с, где $A = 1 \dots 10$.

Противοфильтрационный экран, возведение, набухающая глина, водопроницаемость, структура глины, коэффициент фильтрации, плотность грунта, влажность грунта.

The assessment of the possibility of using swelling clays for construction of watertight screens of PSP (pump storage plant) is given. The carried out researches have shown that breakage of the clay natural structure during construction of the screen and the way of its cantledging as a protective coating practically eliminate clay swelling and increase of its water tightness. The screen built of these clays is characterized by filtration coefficient $K_f = A \cdot 10^{-9}$ cm/s, where $A = 1 \dots 10$.

Watertight screen, construction, swelling clay, permeability, clay structure, filtration coefficient, soil density, soil humidity.

В состав основных сооружений гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) обязательно входит верхний аккумулирующий водоем, в котором накапливается вода для выработки электроэнергии. Чтобы минимизировать фильтрационные потери воды, закаченной в водоем снизу, и исключить возможность ухудшения гидрогеологической обстановки в районе расположения ГАЭС, верхний аккумулирующий водоем экранируют.

При проектировании и строительстве противοфильтрационных экранов из глинистых грунтов для водоемов ГАЭС большое внимание уделяется оценке возможности изменения их водопроницаемости во время строительства и

эксплуатации за счет набухания глины в процессе ее водонасыщения.

Влияние набухания глинистого грунта экрана на водопроницаемость изучали на примере Днестровской ГАЭС. Исследовали набухание образцов неогеновой глины ненарушенной структуры при естественной влажности и образцов нарушенной структуры, сформированных уплотнением валовых проб глины до состояния, характеризующегося полутвердой консистенцией и коэффициентом водонасыщения 0,89...0,94, соответствующим требованиям технических условий на возведение экрана.

В естественной залежи тонкодисперсные неогеновые глины характери-

зуются средней степенью литификации. Состав глинистой фракции полиминерален и представлен, по данным рентгеноструктурного анализа, монтмориллонитом, гидрослюдой, смешанно-слойнными образованиями типа хлорит-монтмориллонит и гидрослюдами с гидратированным хлоритом (в следах). В обломочной части глиен преобладают кварц (40...70 % от обломочной массы), полевые шпаты (до 20 %). Глинам присуща твердая и полутвердая консистенция. Число пластичности для основного объема залежи глины составляет 0,33 и может колебаться от 0,25 до 0,45.

Образцы глины ненарушенной структуры, характеризующиеся числом пластичности 0,33, были вырезаны из монолитов, отобранных при бурении скважины, а образцы глины нарушенной структуры вырезаны из монолитов, сформированных путем уплотнения грунта в приборе стандартного уплотнения по ГОСТ 22733–2002 «Грунты. Метод лабо-

раторного определения максимальной плотности». Образцы глины из монолитов вырезали кольцами компрессионного прибора.

На рисунке 1 показан процесс вырезания образца ненарушенной структуры из монолита.

На образцах глины были выполнены исследования набухания без нагрузки (свободное набухание) и набухания под нагрузкой 0,018 МПа, которая создается на поверхности противофильтрационного экрана его защитным покрытием, состоящим из 0,2 м песка, 0,2 м щебня крупностью 0...70 мм и пригрузкой 0,5 м горной массой крупностью 0...200 мм.

Для получения информации о поведении набухающей глины при ее высыхании образцы грунта в кольцах компрессионного прибора после испытания на набухание под нагрузкой помещали в термостат и высушивали до постоянной массы.

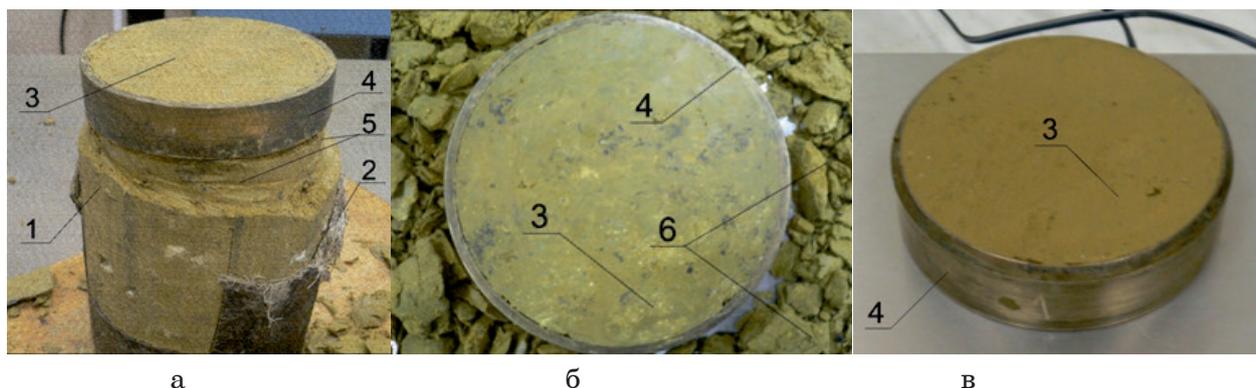


Рис. 1. Вырезание из монолита кольцом компрессионного прибора образца глины ненарушенной структуры (а), вид этого образца в кольце (б) и вид образца глины нарушенной структуры, вырезанного кольцом из монолита, сформированного уплотнением грунта валовой пробы в приборе стандартного уплотнения (в): 1 – монолит; 2 – упаковка; 3 – образец; 4 – кольцо компрессионного прибора; 5 – тонкие прослои и линзы алевритов; 6 – куски глины, срезанные с монолита в процессе вырезания образца

Исследования набухания и усадки образцов грунта ненарушенной структуры, характеризующей его естественное сложение, и образцов грунта нарушенной структуры, характеризующей его сложение в теле противофильтрационного экрана, выполнены в соответствии с ГОСТ 24143–80 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усадки».

Ведомость исследованных образцов грунта приведена в таблице 1.

В приборах свободного набухания и в компрессионных приборах деформации регистрировали после начала отсчета через 5, 10, 30, 60 мин, далее через 2 ч в течение рабочего дня, а затем в начале и конце последующих рабочих дней до достижения условной стабилизации деформаций.

За критерий условной стабилизации деформаций свободного набухания глинистых грунтов или деформаций набухания под нагрузкой принимали деформацию не более 0,01 мм за 16 ч.

После стабилизации деформаций образцы грунта в компрессионных приборах были залиты водой. Наблюдения за деформациями образцов в компрессионных приборах продолжали до стабилизации деформаций набухания.

Для каждого исследованного образца грунта определены: относительная деформация набухания без нагрузки ε_{sw} (терминология по ГОСТ 25100–2011 «Грунты. Классификация») или свободное набухание δ_0 (терминология по ГОСТ 24143–80 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усад-

ки»), деформация набухания грунта под нагрузкой δ_n , влажность набухания W_n и плотность скелета набухшего грунта $\rho_{d(n)}$.

После выявления основных характеристик физических свойств грунта (плотности скелета, пластичности и коэффициента пористости) до начала исследований на набухание и после испытания для всех образцов было установлено изменение их степени водопроницаемости в зависимости от изменения этих характеристик на основе анализа обобщенных результатов исследований коэффициента фильтрации глинистых грунтов [1].

Таблица 1

Ведомость исследованных образцов грунта

№№ монолита и валовой пробы	№№ лабораторного образца грунта	Вид исследования	Структура грунта в образце	Параметры начального состояния грунта в образцах		
				Влажность W , д. ед.	Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³	Коэффициент водонасыщения S_r , д. ед.
Монолит № 2	2-2	Свободное набухание в приборе ПНГ	Ненарушенная	0,20	1,60	0,78
	2-6			0,20	1,64	0,83
	2-1	Набухание под нагрузкой 0,018 МПа в компрессионном приборе		0,21	1,70	0,95
	2-2*			0,20	1,75	0,98
	2-3			0,20	1,72	0,94
Монолит № 3	3-2	Свободное набухание в приборе ПНГ	Нарушенная	0,21	1,71	0,97
	3-6			0,21	1,69	0,83
Валовая проба № 1	1-2	Набухание под нагрузкой 0,018 МПа в компрессионном приборе		0,25	1,55	0,90
	1-4			0,23	1,63	0,93
	1-5			0,25	1,56	0,91
	1-1		0,25	1,54	0,89	
	1-2*	0,25	1,58	0,94		
	1-3	0,25	1,57	0,93		

Перед испытанием на свободное набухание образцы глины ненарушенной структуры имели коэффициент водонасыщения $S_r = 0,78...0,98$ (меньшее значение относится к образцам с прослойками алевроитов, большее значение – к однородным образцам глины), образцы глины нарушенной структуры, как отмечалось ранее, имели $S_r = 0,89...0,94$. После набухания все образцы характеризовались коэффициентом водонасыщения $S_r = 0,95...1,00$.

Свободное набухание образцов глины ненарушенной структуры и образцов глины нарушенной структуры сопровождалось изменением их консистенции с твердой и полутвердой на тугопластичную и закончилось на вторые-третьи сутки после их замачивания дистиллированной водой. При этом основная часть деформаций набухания происходила в

первые сутки.

Согласно ГОСТ 25100–95 «Грунты. Классификация», по относительной деформации набухания без нагрузки ε_{sw} (свободное набухание δ_0) глины ненарушенной структуры относятся к разновидностям средненабухающих: для образца 2-2 $\varepsilon_{sw} = 0,078$, для образца 2-6 $\varepsilon_{sw} = 0,082$, для образца 3-2 $\varepsilon_{sw} = 0,12$ и для образца 3-6 $\varepsilon_{sw} = 0,10$.

После нарушения естественной структуры и последующего уплотнения в соответствии с требованиями технических условий на возведение экрана эти же глины по относительной деформации свободного набухания следует относить к разновидностям слабонабухающих: для образца 1-2 $\varepsilon_{sw} = 0,040$, для образца 1-4 $\varepsilon_{sw} = 0,067$, для образца 1-5 $\varepsilon_{sw} = 0,031$.

Влажность набухания для всех

образцов грунта составила $W_n = 0,29...0,31$, т. е. 60...70 % от величины влажности на границе текучести.

По результатам выполненных исследований свободного набухания неогеновой глины ненарушенной и нарушенной структуры можно сказать, что связь между степенью набухания и другими его физическими свойствами соответствует общим представлениям о закономерностях их изменения, установленным ранее для глин другими исследователями [2–5].

Кинетика относительных деформаций

глины ненарушенной и нарушенной структуры под нагрузкой 0,018 МПа и при набухании глины после замачивания дистиллированной водой показана на рисунке 2 в виде графиков зависимости относительной деформации δ от времени T . Из графиков видно, что в образцах ненарушенной структуры деформация набухания ($\delta_n = 0,029...0,041$) значительно превосходит деформацию сжатия под нагрузкой ($\delta_p = 0,006...0,008$), а в образцах нарушенной структуры – наоборот: $\delta_n = 0...0,003$, а $\delta_p = 0,004...0,011$.

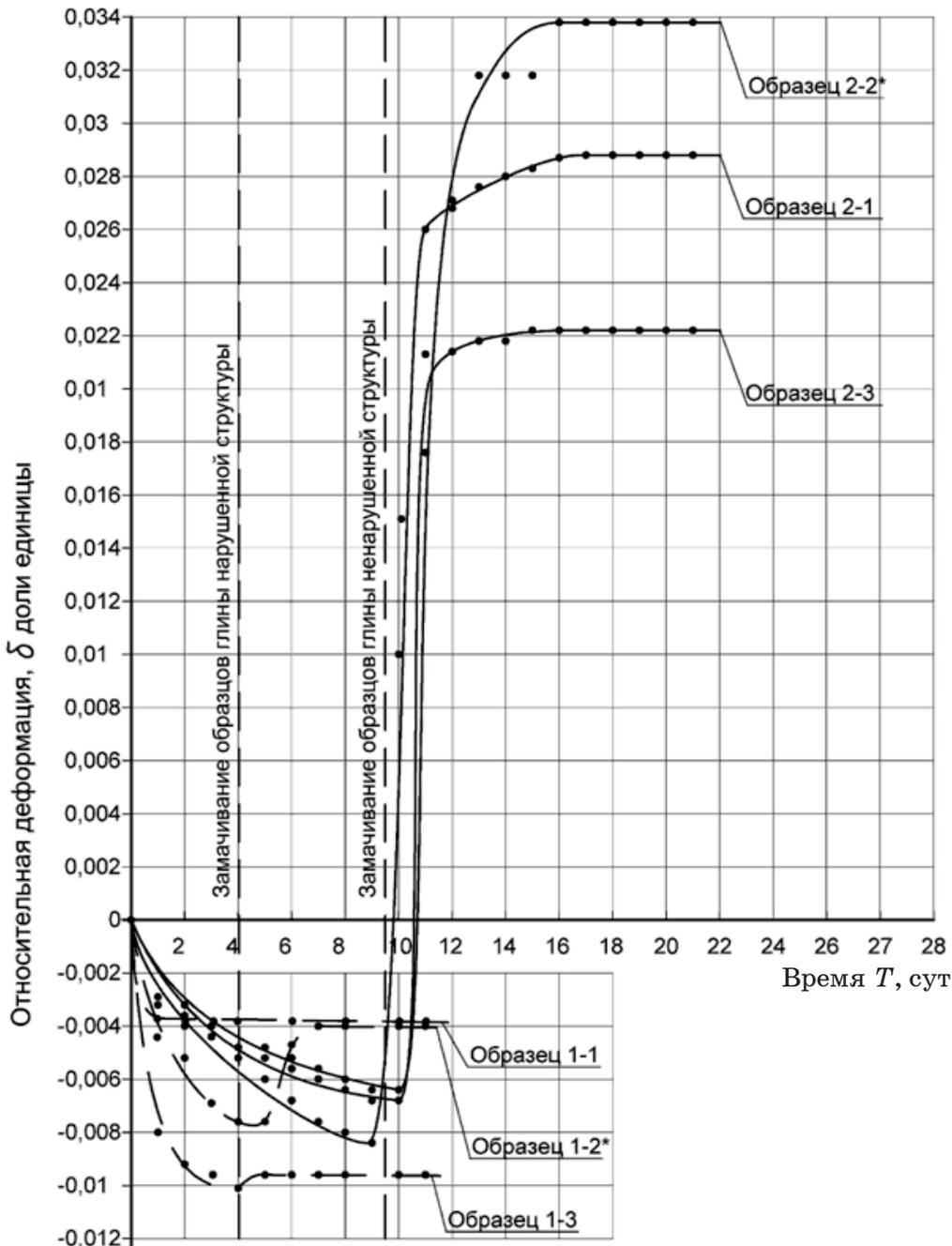
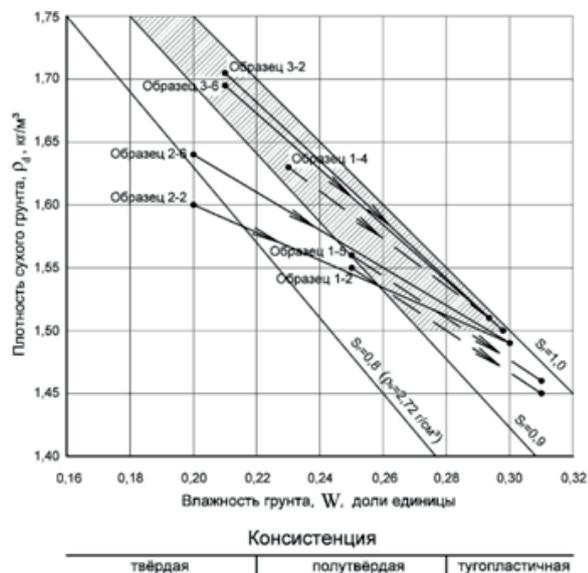
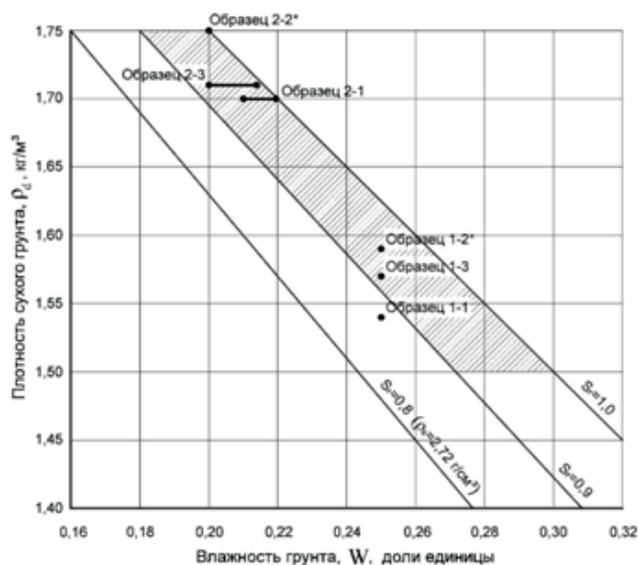


Рис. 2. График осадки и набухания образцов глины нарушенной и ненарушенной структуры под нагрузкой 0,018 МПа в компрессионном приборе: сплошные линии – образцы ненарушенной структуры; штриховые линии – образцы нарушенной структуры

Исследования показали, что под нагрузкой 0,018 МПа грунт ненарушенной структуры набухает очень мало, без изменения своей консистенции, а грунт нарушенной структуры не набухает, что подтверждает ранее установленную эффективность



а



б

Рис. 3. Изменение плотности и влажности глины при свободном набухании (а) и при набухании под нагрузкой 0,018 МПа (б): сплошные линии – образцы ненарушенной структуры; штриховые линии – образцы нарушенной структуры. Номера образцов показаны у точек, характеризующих их начальную плотность-влажность; заштрихована зона требуемых значений плотности-влажности грунта; начальные значения плотности-влажности образцов 1-1, 1-2*

Имея характеристики плотности скелета ρ_d (а значит, коэффициента пористости e) и пластичности J_p изучаемого глинистого грунта, по зависимости $K_\phi = f(e, J_p^*)$, рекомендованной ВНИИ ВОДГЕО, на основе обобщения фильтрационных исследований различных глинистых грунтов определены величины коэффициента фильтрации образцов грунта до испытания на набухание и после его окончания (табл. 2) [1]. При этом в запас фильтрационной прочности экрана принято $J_p = J_p^*$, где J_p – число пластичности грунта, %, определенное по ГОСТ 5180–84, J_p^* – число пластичности того же грунта, определенное по методу «чашечки». Для глин обычно $J_p^* = J_p + (6...10)$.

Результаты определения величин коэффициента фильтрации глин для исследованных образцов показали, что при свободном набухании водопроницаемость образцов глины ненарушенной структуры увеличилась на порядок, водо-

защитного слоя на поверхности экрана [6].

На рисунке 3 показано изменение плотности и влажности грунта при свободном набухании и при набухании под нагрузкой на фоне требуемых значений по техническим условиям.

проницаемость образцов глины нарушенной структуры – в 2-3 раза. Но во всех случаях после свободного набухания глины коэффициент фильтрации не превышал контрольного значения: $K_\phi \leq 1,5 \cdot 10^{-8}$ см/с.

Под нагрузкой 0,018 МПа происходит незначительное набухание, что практически не влияет на изменение фильтрационных свойств грунта как ненарушенного, так и нарушенного сложения. Образцы грунта, имеющие плотность и влажность, соответствующие требованиям технических условий на возведение экрана, характеризуются коэффициентом фильтрации $K_\phi \leq A \cdot 10^{-9}$ см/с, где A – любое число от 1 до 10.

Такие же величины коэффициента фильтрации для рассматриваемых глин, характеризующихся числом пластичности от 0,25 до 0,45, были получены в результате научных работ, выполненных ОАО «Научно-исследовательский

Результаты определения величин коэффициента фильтрации образцов глины до испытания на набухание и после его окончания

№№ монолитов ва- ловой пробы	№№ лабораторного образца грунта	Вид исследования	Структура грунта в образцах	Число пластичности $J_p, \%$	Характеристика грунта			
					До испытания на набухание		После окончания испытания на набухание	
					Коэффициент пористости e, д. ед.	Коэффициент фильтрации K_f , см/с	Коэффициент пористости e, д. ед.	Коэффициент фильтрации K_f , см/с
Монолит 2	2-2	Свободное набухание в приборе ПНГ	Ненарушен- ная	33	0,70	$4 \cdot 10^{-10}$	0,82	$2 \cdot 10^{-9}$
	2-6				0,66	$2 \cdot 10^{-10}$	0,83	$3 \cdot 10^{-9}$
	2-1				0,60	$6 \cdot 10^{-11}$	0,60	$6 \cdot 10^{-11}$
	2-2*				0,55	$2 \cdot 10^{-11}$	0,55	$2 \cdot 10^{-11}$
	2-3				0,58	$4 \cdot 10^{-11}$	0,58	$4 \cdot 10^{-11}$
Монолит 3	3-2	Свободное набу- хание в приборе ПНГ	Ненарушен- ная	33	0,59	$5 \cdot 10^{-11}$	0,81	$1 \cdot 10^{-9}$
	3-6				0,61	$7 \cdot 10^{-11}$	0,79	$9 \cdot 10^{-10}$
Валовая проба 1	1-2	Свободное под на- грузкой 0,018 МПа набухание в компрес- сионном приборе	Нарушенная	25	0,75	$7 \cdot 10^{-9}$	0,87	$1 \cdot 10^{-8}$
	1-4				0,67	$3 \cdot 10^{-9}$	0,79	$9 \cdot 10^{-9}$
	1-5				0,74	$6 \cdot 10^{-9}$	0,86	$1 \cdot 10^{-8}$
	1-1				0,77	$8 \cdot 10^{-9}$	0,77	$8 \cdot 10^{-9}$
	1-2*				0,72	$4 \cdot 10^{-9}$	0,72	$4 \cdot 10^{-9}$
	1-3				0,73	$5 \cdot 10^{-9}$	0,73	$5 \cdot 10^{-9}$

Примечание: При определении числа пластичности J_p для глин ненарушенной структуры грунт отбирали из той части монолитов, где отсутствуют прослойки и гнезда алевритов, а для глин нарушенной структуры грунт отбирали из перемешанной валовой пробы, включая алевриты. Этим объясняется различие в значениях числа пластичности для глин ненарушенной ($J_p = 33 \%$) и нарушенной ($J_p = 25 \%$) структуры.

институт энергетических сооружений» (ОАО «НИИЭС») в Москве и лабораторией крупномасштабных гидравлических и геотехнических исследований в городе Днепропетровске при обосновании конструкции противофильтрационного экрана верхнего аккумулирующего водоема Днестровской ГАЭС.

Для получения представления о поведении глины при высыхании образцы грунта в кольцах компрессионных приборов после испытания на набухание были помещены в термостат и высушены до постоянной массы. Вид образцов глины нарушенной и ненарушенной структуры после высушивания представлен на рис. 4.



Рис. 4. Образцы глины нарушенной (а) и ненарушенной (б) структуры после высушивания в термостате (на поверхности образца «а» остались следы фильтровальной бумаги в виде светлых пятен)

Большую усадку дал грунт нарушенной структуры при наименьшем

количестве трещин. В образцах грунта нарушенной структуры формировалась система вертикальных трещин одного порядка, а в образцах грунта ненарушенной структуры – системы вертикальных, горизонтальных и наклонных трещин разных порядков, что говорит о возможной потере фильтрационной прочности при высыхании грунта как ненарушенной, так и нарушенной структуры.

Различия по величине усадки, форме и расположению трещин объясняются особенностями подготовки образцов к испытаниям.

Из приведенных исследований видно, что набухание рассматриваемых глин не может отрицательно повлиять на качество противодиффузионного экрана. Опасным является процесс высыхания экрана, который может сопровождаться усадкой глины и образованием трещин. Для исключения возможности свободного набухания и усадки глин экран необходимо возводить на полную мощность, по участкам, и сразу устраивать защиту (пригрузку) на его поверхности.

Выводы

Набухающие глины вполне применимы для возведения противодиффузионных экранов ГАЭС. Водопроницаемость экрана, возводимого из этих глин, характеризуется коэффициентом фильтрации $K_{\phi} = A \cdot 10^{-9}$ см/с, где $A = 1 \dots 10$.

Нарушение естественной структуры глины при возведении экрана и устройство пригрузки на его поверхности практически исключают возможность набухания глины в теле экрана и увеличения водопроницаемости.

Образцы глины ненарушенной и нарушенной структур характеризуются единой влажностью набухания W_n , которая составляет 60...70 % от влажности на границе текучести W_L .

Свободное набухание глины уменьшается по мере приближения ее влажности в уплотненном состоянии к влажности набухания. Это свойство набухающей глины может быть использовано при назначении параметров укладки в противодиффузионный экран.

В процессе высыхания глины происходит усадка, которая сопровождается образованием трещин в грунтовом массиве и потерей его фильтрационной прочности.

Для исключения возможности свободного набухания и усадки глины в теле противодиффузионных экранов необходимо возводить экраны на полную мощность, по участкам, и сразу устраивать защитное покрытие их поверхности с пригрузкой.

Приведенные результаты исследований набухающей глины, обосновывающие возможность ее применения для возведения противодиффузионных экранов ГАЭС, могут быть распространены и на другие противодиффузионные устройства гидротехнических сооружений: понуры, ядра и зубья плотин из грунтовых материалов, накопителей загрязненных стоков, золоотвалов, иловых площадок и др.

1. Рекомендации по расчету обратных фильтров плотин из грунтовых материалов. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1981. – 62 с.

2. Сорочан Е. А. Строительство сооружений на набухающих грунтах. – М.: Стройиздат, 1989. – 312 с.

3. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1973. – 375 с.

4. Овчаренко Ф. Д., Ничипоренко С. П., Валицкая В. Н. Об определении величины набухания глин // Коллоидный журнал. – 1962. – Т. XXIV. – № 1.

5. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы; под ред. акад. Е. М. Сергеева. – М.: Недра, 1985. – 288 с.

6. Павиловский В. М. Экспериментальные исследования набухания на различной глубине от поверхности грунтового экрана: Научные исследования в области гидротехнических сооружений систем водного хозяйства промышленности: труды Института ВОДГЕО. – М.: ВОДГЕО, 1979. – С. 26–29.

Материал поступил в редакцию 28.08.14.

Аверьянов Виталий Николаевич, генеральный директор

Тел. 8-926-280-01-20

E-mail: info@gitest.ru