

## Гидротехническое строительство

УДК 502/504:627.82.034.93

**В. Я. ЖАРНИЦКИЙ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

### ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБОНАТНО-ГЛИНИСТОГО ГРУНТА – ПРОДУКТА РАЗРУШЕНИЯ МЕРГЕЛЯ

*Приводятся результаты лабораторных и полевых исследований по использованию продуктов разрушения мергеля как материала для устройства противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений. Присутствие в мергелях глинистого материала придает им некоторые глинистые свойства, карбонатный материал либо выполняет функцию цемента, образуя кристаллизационные связи между глинистыми частицами, либо нет. В первом случае глинистые свойства породы проявляются более резко.*

*Карбонатно-глинистый грунт, мергель, грунтовые плотины, противофильтрационные элементы, гидротехнические сооружения.*

*There are given results of laboratory and field researches on the usage of marl destruction products as a material for installation of anti-filtering elements of hydraulic structures: the presence of clay material in marls adds some clayish properties to them, the carbonate material either fulfills a function of cement forming crystallized links among clay particles or does not play a part of cement. In this case clay properties of the species become evident more sharply.*

*Carbonate-clay soil, marl, earth dams, anti-filtering elements, hydraulic structures.*

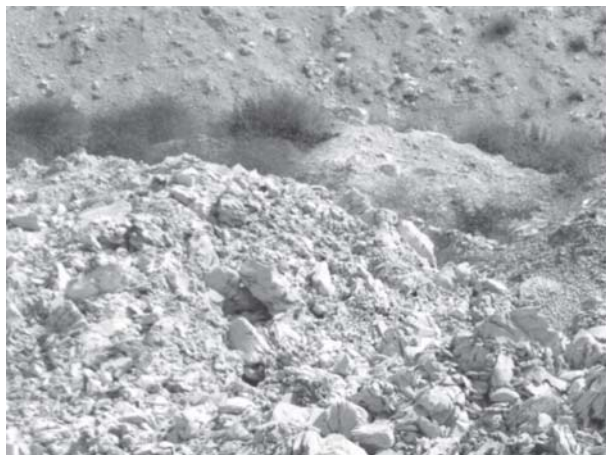
При существующих достижениях геотехнической науки и практики, строительных механизмов практически любые грунты, в том числе некондиционные (слабопрочные, засоленные и др.), при определенной технологии их разработки, отсыпки и уплотнения могут быть использованы для возведения грунтовых гидротехнических сооружений. Однако при таком подходе существует риск не подтвердить в условиях уже развернутого строительства расчетные строительные и

геотехнические характеристики грунтов. Поэтому изучение грунтов для возведения противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений – чистых, не содержащих крупных включений, а также различных грунтовых смесей (естественных или искусственных), состоящих из обломков скальных пород с глинистым заполнителем, переполняющим поры – остается востребованным и актуальным.

Среди карбонатных пород большую группу составляют разности, переходные

к глинистым грунтам, – мергели. Мергели являются представителями полускальных грунтов. Присутствие в них глинистого материала придает им некоторые глинистые свойства [1]. Карбонатный материал в мергелях либо выполняет функцию цемента, образуя кристаллизационные связи между глинистыми частицами, либо нет. В первом случае глинистые свойства породы проявляются более резко, а связи между частицами, подобно связям в глинистых породах, имеют коллоидную природу.

В 1999 году при строительстве плотины «Сахаби» (САР) была отмечена способность грунта, представленного мергелями, в отвалах деловых выемок объекта изменять гранулометрический состав не только при технологическом воздействии, но и самопроизвольно (рисунок). Объяснялось это не только результатом «разгрузки» сил внутреннего напряжения вследствие разработки грунта, но и переменным увлажнением и высушиванием породы в отвалах.



Продукт разрушения мергелей в отвалах деловых выемок

В сентябре 2001 года было сделано техническое предложение по использованию отвалов деловых выемок из мергеля для устройства грунтового экрана в русле реки Бейт Яшут объекта «Сахаби» (САР). По минимально допустимому содержанию мелкозема (частиц менее 1, 2 и

5 мм) для грунтов, используемых в противодиффузионных элементах, предложен нижний предел грансостава для переработанного (начиная с простого отсева фракций крупнее 100 мм или любого другого технологического цикла) материала деловых выемок (табл. 1).

Таблица 1

Размер частиц, мм	0,01	0,1	1	2	5	10	100
Минимально допустимое содержание частиц, %	21	29	41	46	53	60	100

Предложенный нижний предел грансостава для переработанного материала в отвалах деловых выемок практически совпадал с проектным решением для грунта ядра плотины. Параметры строи-

тельных и геотехнических свойств карбонатно-глинистого грунта, полученные эмпирическим путем по известным физическим характеристикам грунта, представлены в следующем виде (табл. 2).

Таблица 2

$\rho_s, \text{ г/см}^3$	$I_p, \%$	$m_{<5}, \%$	Proctor (для < 5 мм)		Proctor (для монолита)		Прочность (для < 5 мм)		$k_f, \text{ см/с в монолите}$
			$\rho_{d \max}$	$W_{\text{opt}}$	$\rho_{d \max}$	$W_{\text{opt}}$	$\text{tg}\varphi$	$C, \text{ кПа}$	
2,68	$\geq 12$	53	1,67	19	1,80	15	0,41	0,44	$0,18 \times 10^{-5}$

Однако для подтверждения указанных эмпирических параметров необходимо было сравнить их с результатами экспериментальной (опытной) укладки карбонатно-глинистых грунтов (см. табл. 1 и 2). Для того чтобы получить необходимую плотность укладки в монолите и для мелкозема при  $k_{com} \geq 0,96$ , необходимо было не только уточнить число проходок кулачкового вибратора АВГ «Вона» VS18 по одному следу при мощности укладкиваемого слоя 0,35 м, но и оценить качество сопряжения слоев, однородность распределения материала в слое.

В мае 2003 года в пределах профильного объема объекта в створе реки Бейт Яшут (параметры участка в плане 10x6 м) были последовательно, с уплотнением, уложены четыре слоя карбонатно-глинистого грунта (самопроизвольного разрушенного мергеля из отвалов деловых выемок) из подготовленного для этих целей резерва. Послойная оценка плотности уложенного грунта проводилась по отби-

раемым образцам-монолитам с последующей их стандартной обработкой. Оценка водопроницаемости осуществлялась на образцах-монолитах ( $d = 10$  см;  $h = 15$  см) в фильтрационной установке при постоянном напорном градиенте. Показатели прочности грунта определялись на образцах, вырезанных из отобранных монолитов, методом консолидированного среза (предварительно проводилось водонасыщение последних). Показатели свойств уплотнения грунта представлены в табл. 3. Результаты выполненной работы показали следующее: для достижения проектных условий по плотности укладки слоя 0,35 м необходимо 12 проходок катка по одному следу; при уплотнении грунта происходит дополнительное его измельчение; содержание мелкозема (частиц менее 5 мм) (в резерве) увеличивается с 68 до 75...95 % (после укатки); сопряжение слоев в контакте соответствует устройству противотриационных элементов (определялось через устройство шурфов).

Таблица 3

Данные по грунту в резерве. Объем 300 м <sup>3</sup>						Результаты послойной укатки									
$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$W_L$ , %	$W_p$ , %	$I_p$ , %	Proctor для $m_{<5mm}$		№ слоя	№ пробы	$m_{<5mm}$ %	Proctor*		В монолите			$k_{com}$ <5mm %	$k_f$ ** см/с
				$W_{opt}$ , %	$\rho_{d max}$ , г/см <sup>3</sup>				$W_{opt}$ , %	$\rho_{d max}$ , г/см <sup>3</sup>	$W_i$ , %	$\rho_{d i}$ , %	$k_{com}$ , %		
2,69	41,5	24,5	17	19,7	1,66	1	1	87	18,5	1,70	21,3	1,65	97	96	5,5x10 <sup>-7</sup> **
							2	87	18,5	1,70	18,7	1,69	99	99	
							3	87	18,5	1,70	20,9	1,69	99	99	
						2	1	92	19	1,69	21	1,66	98	98	
							2	92	19	1,69	22,8	1,65	97,6	97,6	
							3	95	19,2	1,68	23,2	1,62	96	96	
						3	1	88	18,6	1,70	20,9	1,68	99	98,8	
							2	82	18	1,72	19,8	1,72	100	100	
							3	92	19	1,69	17,4	1,71	101	102	
						4	1	92	19	1,69	21,8	1,67	99	99	
							2	92	19	1,69	21,9	1,66	98,2	98,4	
							3	92	19	1,69	22,9	1,67	99	99	

Примечания: \*учтено содержание в образцах-монолитах частиц крупнее 5 мм; \*\*результат полевого эксперимента по методу однокольцевого инфильтрометра.

Не менее важным являлась оценка возможности разжижения карбонатно-глинистого грунта (продукта разрушения мергелей в отвалах деловых выемок) в теле противотриационных элементов плотин при динамическом воздействии, соответствующем землетрясению интенсивностью 8 баллов, а также изучение влияния

динамического воздействия на развитие деформаций и прочность. Разжижением водонасыщенного грунта называется такое его состояние, при котором сопротивление сдвигу исчерпано, а развитие деформаций носит незатухающий характер. Разжижение водонасыщенного грунта при динамическом воздействии возникает

вследствие развития дополнительных объемных деформаций, приводящих к росту динамического порового давления и, как следствие, к снижению эффективного напряжения до значения, при котором в эффективных напряжениях выполняется условие прочности:

$$\sigma' = (\sigma - u) = \frac{\sigma_i^* - c}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

Если это условие выполняется, происходит разрушение грунта.

При изучении динамического воздействия на карбонатно-глинистые грунты возникла необходимость решить две задачи: определить интенсивность динамического воздействия, соответствующего заданной силе землетрясения; по результатам измерений в процессе динамического нагружения деформаций грунта и возникающего порового давления дать оценку динамической устойчивости грунтов.

В середине прошлого столетия в Калифорнийском университете была разработана методика трехосных динамических испытаний водонасыщенных грунтов по консолидированно-недренированной схеме с замером порового давления, которая в настоящее время является общепринятой в мировой практике механики грунтов [2]. Данная методика предполагает, что серия равномерных циклических нагружений с амплитудой  $\sigma_i^a$ , приложенных к образцу грунта, по своему влиянию на деформационное поведение грунта эквивалентна последовательности нерегулярных колебаний, вызываемых землетрясением. Расчет амплитуды эквивалентного сдвигового напряжения  $\sigma_i^a$  выполняется по формуле

$$\sigma_i^a = 0,65 \rho^{\text{нас}} h \frac{S_{\text{max}}}{g} r_d,$$

где  $S_{\text{max}}$  – максимальное ускорение земной поверхности, вызываемое землетрясением;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $r_d$  – коэффициент затухания колебаний с увеличением глубины;  $\rho^{\text{нас}}$  – плотность водонасыщенного грунта (при сейсмическом воздействии масса воды, содержащаяся в порах, рассматривается как присоединенная к массе твердых частиц: при  $\rho = 2,69 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho^{\text{нас}} = 2,03 \text{ г/см}^3$ . Коэффициент 0,65 учитывает, что эквивалентное циклическое сдвиговое напряжение составляет примерно 65 % от максимального напряжения сдвига.

Распределение ускорения по глубине для восьмибалльного землетрясения (в упругой постановке задачи) соответствует зависимости:

$$\frac{S_{\text{max}}}{g} r_d = f\left(\frac{x}{H}\right),$$

где  $\frac{x}{H}$  – относительная координата рассматриваемой точки.

Подготовка образцов к динамическим испытаниям заключалась в уплотнении грунта при оптимальной (или на 1...2 % выше) влажности в разъемной цилиндрической форме и в последующем водонасыщении образца, изолированного по боковой поверхности резиновой оболочкой (градиент около 1). Степень водонасыщения образцов по описанной методике подготовки образцов составляла 89...93 %.

Другие методы, пригодные для водонасыщения образцов грунта применительно к карбонатно-глинистым грунтам, дают небольшой эффект ввиду низких значений градиента фильтрации. Степень водонасыщения грунта в теле противофильтрационного элемента сооружения при длительном воздействии фильтрационного потока выше – с учетом растворенного и заземленного в воде воздуха, а также результатов жизнедеятельности микроорганизмов – 98...99 %.

При оценке сейсмической устойчивости продуктов разрушения мергелей в отвалах деловых выемок учитываем следующее: безопасные деформации грунта при сейсмическом воздействии определяются их величиной, необходимой для изменения степени водонасыщения от 99 до 100 %. Дальнейшее объемное деформирование грунта невозможно ввиду его полного водонасыщения, стремление к деформированию вызывает развитие порового давления, снижающего эффективное среднее напряжение, что в свою очередь ведет к разжижению грунта. Расчеты показывают, что для изменения степени водонасыщения грунта от 99 до 100 % требуется объемная деформация, равная 0,004 (0,4 %).

Образцы грунта нагружались сначала статически всесторонним обжатием до значений  $\sigma_0 = 0,5; 1; 2$  и  $3 \text{ кг/см}^2$ . Затем при неизменных напряжениях  $\sigma_2 = \sigma_3$  увеличивалась величина  $\sigma_1$  до заданных значений  $\sigma_1$  и  $\sigma_1^*$ . Статическое нагружение проводилось ступенями. Каждая последующая степень нагрузки прикладывалась после стабилизации деформации от предыдущей. Статическое напряженное состояние характеризовалось двумя

параметрами:  $\sigma_0$  – всесторонним обжатием и  $\Pi = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^*}$  – степенью приближения напряженного состояния к предельному ( $\sigma_i^*$  – прочность грунта, по данным статических опытов). После стабилизации деформаций при заданном статическом напряженном состоянии проводили динамическое нагружение. Амплитудные значения напряжения  $\sigma_1$  увеличивали ступенями. Каждая ступень выдерживалась 1...2 мин. При динамичес-

ком нагружении по измеренным значениям деформаций рассчитывалась объемная деформация. Полученные значения объемной деформации сравнивались с контрольной величиной – 0,4 %. При меньшем значении полученной деформации грунт динамически устойчив. Полученные значения объемной деформации при динамическом воздействии по плотностям  $\rho_d = 1,58 \text{ г/см}^3$  и  $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$  представлены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 4

**Результаты динамических испытаний продукта разрушения мергеля при  $\rho_d = 1,58 \text{ г/см}^3$**

$\Pi = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^*}$ $\sigma_0, \text{ кг/см}^2$	0,2...0,3	0,5...0,6	0,7...0,8	0,9...1
0,5	–	$\frac{0,4}{0,40}$	–	–
1	$\frac{0,21}{0,66}$	$\frac{0,07}{0,65}$	$\frac{0,05}{0,34}$	–
2	–	$\frac{0,00}{0,93}$ $\frac{0,00}{1,01}$ $\frac{0,00}{0,92}$	–	–
3	–	$\frac{0,03}{0,47}$	–	$\frac{0,04}{1,23}$

Примечание: числитель –  $\varepsilon_v^{\text{дин}} \%$ ; знаменатель –  $\sigma_i^a$  – амплитудное значение осевого напряжения.

Таблица 5

**Результаты динамических испытаний продукта разрушения мергеля при  $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$**

$\Pi = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^*}$ $\sigma_0, \text{ кг/см}^2$	0,2...0,3	0,5...0,6	0,7...0,8	0,9...1
0,5	–	–	$\frac{0,11}{0,2}$	$\frac{0,00}{0,55}$
1	–	$\frac{0,03}{0,59}$	$\frac{0,00}{0,63}$	–
3	–	$\frac{0,02}{1,48}$	–	–

Примечание: числитель –  $\varepsilon_v^{\text{дин}} \%$ ; знаменатель –  $\sigma_i^a$  – амплитудное значение осевого напряжения.

Как видно из табл. 4 и 5, устойчивость уплотненного карбонатно-глинистого грунта – продукта разрушения мергеля – при динамических воздействиях обеспечивается.

### Вывод

Согласно пунктам 2.6а, 2.6б, 2.6в СНиП 2.06.05–84 «Плотины из грунтовых материалов», переработанный и

фракционированный в отвалах карбонатно-глинистый грунт – продукт разрушения мергеля – может использоваться в качестве грунтового материала для устройства противофильтрационных элементов ограничений.

1. **Жарницкий В. Я.** Обеспечение качества и надежности каменно-земляных

плотин при строительстве: монография. – Иваново: Изд-во ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2005. – 156 с.

2. Щербина В. И., Зарецкий Ю. К. Исследование мелов как материалов для возведения плотины и ее основания: отчет НИР, этап 4. – М.: НИС Гидропроект-та им. С. Я. Жука, 1989. – 10 с.

3. Плотины из грунтовых материалов: СНиП 2.06.05-84 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 32 с.

Материал поступил в редакцию 01.03.11.

**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Экспертиза и управление недвижимостью»

E-mail: Zharnitskiy@msuee.ru

Тел. 8-905-720-30-72

УДК 502/504:622.691.4.053

**О. В. ИЛЬНИЧ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## **АНАЛИЗ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

*Представлен анализ системы мониторинга подводных переходов магистральных газопроводов. Получены вероятностные характеристики их аварийности в зависимости от факторов природной и технической систем, по которым ведется постоянное наблюдение в отрасли. Приводятся рекомендации по совершенствованию системы мониторинга.*

*Подводный переход газопровода, факторы, мониторинг, статистический анализ, вероятность аварии.*

*The analysis of the monitoring system is made for underwater main gas pipeline crossovers. Probability characteristics of their accident rate were obtained depending on the factors of natural and technical systems on which a constant observation is maintained in the industry. There are given recommendations on improvement of the monitoring system.*

*Underwater gas pipeline crossover, factors, monitoring, statistical analysis, probability of accident rate.*

Огромные размеры территории, удаленность основных районов добычи углеводородов от потребителя, высокие объемы экспорта – определяющие факторы развития нефтегазотранспортной сети России. Особенность территории страны – густая сеть рек и других водных объектов, являющихся наиболее сложными и опасными участками трубопроводов. Количество подводных переходов магистральных газопроводов (далее ППМГ), их значимость для безопасности жизнедеятельности населения обусловили рассмотрение вопросов эксплуатации и строительства как отдельного специфического водопользователя, во многом определяющего правила использования водных

ресурсов и природообустройства прилегающих ландшафтов. Подводные переходы магистральных газопроводов через водные объекты являются весьма специфическими инженерными сооружениями и сложными природно-техническими комплексами. В условиях различного типа водных преград эксплуатация магистральных трубопроводов сопряжена с многофакторными рисками их повреждения, несущими угрозу экологической безопасности природных комплексов и значительные экономические риски, связанные с необходимостью бесперебойной поставки углеводородного сырья потребителю. Качественное системное ведение мониторинга за такими подводными переходами