

УДК 502/504:627.82.034.93

**В. Я. ЖАРНИЦКИЙ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

**МЕРГЕЛЬ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН**

*Приводятся результаты исследований по использованию продуктов разрушения мергеля как строительного материала для устройства противофильтрационных элементов напорных грунтовых сооружений. Отмечается, что изучение грунтов состоящих из обломков скальных пород с глинистым заполнителем остается востребованным и актуальным. Указывается, что при строительстве плотины «Сахаби» (Сирийская Арабская Республика) была отмечена способность грунта, представленного мергелями, в отвалах деловых выемок к изменению гранулометрического состава не только при технологическом воздействии, но и самопроизвольное его измельчение в отвалах в результате «разгрузки» сил внутреннего напряжения вследствие переработки, переменного увлажнения и высушивания в отвалах. Приводятся параметры строительных и геотехнических свойств продукта разрушения мергеля, полученные эмпирическим и опытным путем. Установлено, что переработанный и отфракционированный в отвалах продукт разрушения мергеля по использованию в качестве грунтового материала для устройства противофильтрационных элементов ограничений не имеет.*

*Мергель, карбонатный материал, отвал деловой выемки, мелкозем, виброкаток, створ, разжижение, эффективные напряжения, сдвиговые напряжения, объемная деформация.*

*There are given research results on using products of marl destruction as a building material for arrangement of screen elements of pressure earth structures. It is stated that investigation of grounds for installation of screen elements of hydraulic structures besides clean, not possessing large inclusions and being different from earth mixtures (natural or artificial), consisting of rocky debris with clay filler, overfilling pores created by large inclusions remains demanded and actual. It is described that when constructing a dam «Sakhabi» (The Syrian Arab Republic) there was marked a soil capability presented by marls, in business extraction dumps of the object to the change of granulometric composition not only under technological impact but its spontaneous crushing in dumps. It is explained by not only the result of «unloading» of internal tension forces as a result of excavation works but also because of periodical moistening and rocks drying in dumps. There are given parameters of building and geotechnical properties of the product of marl destruction obtained by the empirical and experimental way. It is established that the product of marl destruction processed and fractionated in dumps on being used as a ground material for arrangement of screen elements has no limitations.*

*Marl, carbonate material, dump of business extraction, fine-grained soil, vibroroller, section line, dilution, effective tensions, shear stresses, volumetric deformation.*

При существующих достижениях геотехнической науки и практики, строительных механизмов практически любые грунты при определенной технологии их разработки, отсыпки и уплотнения могут быть использованы для возведения грунтовых гидротехнических сооружений, в том числе некондиционные (слабопрочные, засоленные и др.).

Однако, при таком подходе, существует риск не подтвердить в условиях уже развернутого строительства расчетные строительные и геотехнические характеристики грунтов. Поэтому изучение грунтов, в частности для возведения противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений помимо чистых, не содержащих крупных включений,

а представляющих собой различные грунто-вые смеси (естественные или искусственные), состоящие из обломков скальных пород с глинистым заполнителем, переполняющим поры, создаваемые крупными включениями, 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, 2]. Карбонатный материал в мергелях может служить либо цементом, образуя кристаллизационные связи между глинистыми частицами, либо не играет роль цемента.

В этом случае глинистые свойства породы проявляются более резко, а связи между частицами, подобно связям в глинистых породах, имеют коллоидную природу.

При строительстве плотины «Сахаби» (Сирийская Арабская Республика) была отмечена способность грунта, представленного мергелями, в отвалах деловых выемок объекта к изменению гранулометрического состава не только при технологическом воздействии, но и самопроизвольное его измельчение в отвалах (рис. 1). Объясняется это результатом «разгрузки» сил внутреннего напряжения вследствие разработки грунта и из-за переменного увлажнения и высушивания породы в отвалах.



Рис. 1. Продукты разрушения мергеля в отвалах деловых выемок

Было сделано техническое предложение по использованию отвалов деловых выемок из мергеля для устройства грунтового экрана в русле реки «Бейт Яшут» объекта «Сахаби». По минимально допустимому содержанию мелкозема (частиц < 1; 2 и 5 мм), ниже которого не рекомендуется для

грунтов, используемых в противофильтрационных элементах, предложен нижний предел гранулометрического состава для переработанного (начиная с простого отсева фракций крупнее 100 мм или любого другого технологического цикла) материала деловых выемок (таблица 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 гранулометрического состава для переработанного материала в отвалах деловых выемок, практически совпадал с проектным решением для грунта ядра плотины.

Параметры строительных и геотехнических свойств продукта разрушения мергеля, полученные эмпирическим путем по известным физическим характеристикам грунта, представлены в таблице 2.

Таблица 2

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

Примечание:  $\rho_s$  – плотность частиц грунта;  $m_{<5}$  – содержание мелкозема;  $I_p$  – число пластичности; c – удельное сцепление грунто; φ – угол внутреннего рения;  $\rho_{d,max}$  – максимальная плотность сухого грунта;  $k_f$  – коэффициент фильтрации грунта

Однако для подтверждения вышеуказанных эмпирических параметров требовалось их сравнение с результатами экспериментальной (опытной) укладки карбонатно-глинистых грунтов с обломками, подготовленных в соответствии с требованиями таблиц 1 и 2. Важным считалось не только уточнение числа проходок кулачкового вибратора АВГ «Вона» VS18 по одному следу при мощности укладываемого слоя 0,35 м, чтобы получить необходимую плотность укладки в монолите и для мелкозема при  $k_{com} \geq 0,96$ , но и оценить качество сопряжения слоев, однородность распределения материала в слое и т. п. В пределах профильного объема объекта в створе реки «Бейт Яшут» с реальными параметрами участка в плане 10Ч6 м были последовательно с уплотнением уложены четыре слоя карбонатно-глинистого грунта (самопроизвольного разрушенного мергеля из отвалов деловых выемок на рисунке 2) из подготовленного для этих целей резерва. Послойная оценка плотности уложенного грунта проводилась по отбираемым образцам-монолитам с последующей их стандартной обработкой. Оценка водопроницаемости осуществлялась на образцах-монолитах (размеры  $d = 10$  см и  $h = 15$  см) в фильтрационной установке при постоянном напорном градиенте. Показатели прочности грунта определялись на образцах, вырезанных из отобранных монолитов, методом консолидированного среза с проведением предварительного водонасыщения последних. Показатели свойств уплотнения грунта представлены в таблице 3. Результаты выполненной работы показали, что 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 < 5 мм) с 68 % (в резерве) увеличивается до 75...95 % (после укатки); сопряжение слоев в контакте соответствует устройству противofильтрационных элементов (определялось через устройство шурфов).



Рис. 2. Устройство опытной насыпи из продуктов разрушения мергеля

Таблица 3

Данные по грунту в резерве с объемом 300 м <sup>3</sup>						Результаты послойной укатки									
ρ <sub>г</sub> , г/см <sup>3</sup>	W <sub>L</sub> , %	W <sub>p</sub> , %	I <sub>p</sub> , %	Proctor для m <sub>&lt;5мм</sub>		№ слоя	№ пробы	m <sub>&lt;5мм</sub> , %	Proctor*		В монолите			k <sub>сomp &lt;5мм</sub>	k <sub>с.с.</sub> , см/с
				W <sub>opt</sub> , %	ρ <sub>d,max</sub> , г/см <sup>3</sup>				W <sub>opt</sub> , %	ρ <sub>d,max</sub> , г/см <sup>3</sup>	W <sub>p</sub> , %	ρ <sub>д.г</sub> , г/см <sup>3</sup>	k <sub>сomp</sub> , %		
2,69	41,5	24,5	17	19,7	1,66	1	1	87	18,5	1,70	21,3	1,65	97	96	5,5 · 10 <sup>-5</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	

Примечание: \* учитывает содержание в образцах-монолитах частиц крупнее 5мм; \*\* результат полевого эксперимента по методу однокольцевого инфильтрометра; W<sub>p</sub> и W<sub>L</sub> – соответственно влажность на границе раскатывания и текучести грунта; W<sub>opt</sub> – оптимальная влажность; k<sub>сomp</sub> – коэффициент уплотнения

Не менее важным являлась оценка возможности разжижения карбонатно-глинистого грунта (продукта разрушения мергелей в отвалах деловых выемок) в теле противофильтрационных элементов плотин при динамическом воздействии, соответствующем землетрясению интенсивностью в 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 выполняется условие прочности и происходит разрушение грунта:

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

где σ<sub>i</sub><sup>\*</sup> - прочность грунта по данным статических опытов.

При изучении динамического воздействия на карбонатно-глинистые грунты возникли две задачи: определить интенсивность динамического воздействия, соответствующего заданной силе землетрясения; по результатам измерений в процессе динамического нагружения деформаций грунта и возникающего порового давления произвести 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 [3]. 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  $\sigma_i^a = 0,65 \rho^{nac} h (S_{max}/g) r_d$ , где  $S_{max}$  – максимальное ускорение земной поверхности, вызываемое землетрясением;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $r_d$  – коэффициент затухания колебаний с увеличением глубины;  $\rho^{nac}$  – плотность водонасыщенного грунта (при сейсмическом воздействии масса воды, содержащаяся в порах, рассматривается как присоединенная к массе твердых частиц при  $\rho_s = 2,69$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho_d = 1,65$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho^{nac} = 2,03$  г/см<sup>3</sup>). Коэффициент 0,65 учитывает, что эквивалентное циклическое сдвиговое напряжение составляет примерно 65 % от максимального напряжения сдвига.

Распределение ускорения по глубине для 8-ми бального землетрясения в упругой постановке задачи соответствует зависимости

$$(S_{max} / g) r_d = f(x/H),$$

где  $x/H$  – относительная координата рассматриваемой точки.

Подготовка образцов к динамическим испытаниям, заключались 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, при градиенте около 1. Степень водонасыщения образцов при 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. С другой стороны, степень водонасыщения грунта в теле противофильтрационного элемента сооружения при длительном воздействии фильтрационного потока

будет выше – с учетом растворенного и заземленного в воде воздуха, а также результатов жизнедеятельности микроорганизмов, степень водонасыщения составит 98...99 %.

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

Образцы грунта нагружались сначала статически всесторонним обжатием до значений  $\sigma_o = 0,5; 1; 2$  и  $3$  кг/см<sup>2</sup>. 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 характеризуется двумя параметрами:  $\sigma_o$  – всесторонним обжатием и  $\Pi = \sigma_1/\sigma_1^*$  – степенью приближения напряженного состояния к предельному. После стабилизации деформаций при заданном статическом напряженном состоянии проводилось динамическое нагружение. Амплитудные значения напряжения  $\sigma_1$  увеличивалась ступенями. Каждая степень выдерживалась 1...2 минуты. По измеренным значениям деформаций рассчитывалась объемная деформация при динамическом нагружении. Полученные значения объемной деформации сравнивались с контрольной величиной в 0,4 %. При меньшем значении полученной деформации грунт динамически устойчив. Полученные значения объемной деформации при динамическом воздействии по плотностям  $\rho_d = 1,58$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho_d = 1,65$  г/см<sup>3</sup> и представлены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 4

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

$\sigma_0$ , кг/см <sup>2</sup>	П			
	0,2...0,3	0,5...0,6	0,7...0,8	0,9...1
0,5	–	0,4/0,40	–	–
1	0,21/0,66	0,07/0,65	0,05/0,34	–
2	–	0,00/0,93 0,00/1,01 0,00/0,92	–	–
3	–	0,03/0,47	–	0,04/1,23

Таблица 5

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

$\sigma_0$ , кг/см <sup>2</sup>	П			
	0,2...0,3	0,5...0,6	0,7...0,8	0,9...1
0,5	–	–	0,11/0,2	0,00/0,55
1	–	0,03/0,59	0,00/0,63	–
3	–	0,02/1,48	–	–

Примечание: в таблицах 4 и 5 цифра в числителе показывает величину  $\varepsilon_{\text{дин}}^v$  в процентах, а в знаменателе  $\sigma_1^a$  – амплитудное значение осевого напряжения.

Как видно из таблицы 4 и 5 устойчивостьуплотненного карбонатно-глинистого грунта – продукта разрушения мергеля при динамических воздействиях обеспечивается.

**Вывод**

Согласно требованиям СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» переработанный и отфракционированный в отвалах продукт разрушения мергеля по использованию в качестве грунтового материала для устройства противофильтрационных элементов ограничений не имеет.

1. **Жарницкий В. Я.** Оперативный геотехнический контроль в обеспечении качества устройства каменно-земляных плотин и прогноз их деформаций по результатам строительства. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 172 с.

2. **Жарницкий В. Я., Силкин А. М., Жарницкая Н. Ф.** Проблемы гидротех-

нической практики в обеспечении качества работ при возведении грунтовых плотин // Природообустройство. – 2012. – № 3. – С. 50–55.

3. Исследование мелов, как материалов для возведения плотины и ее основания: отчет НИР, этап 4. – М.: НИС Гидропроекта имени С. Я. Жука. 1989. – 10с.

4. Плотины из грунтовых материалов: СП 39.13330.2012. – М.: Минрегион России, 2012.

Материал поступил в редакцию 16.05.2015  
**Жарницкий Валерий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Оснований и фундаментов, строительства и экспертизы объектов недвижимости»

E-mail: Zharnitskiy@msuee.ru

Тел. 8-905-720-30-72