

УДК 624.131.1

Л.П.КОНОНОВА

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПЛЯЖЕВОЙ ЗОНЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА АНОФ-2 ПО "АПАТИТ"

Активное воздействие на горные породы производственной деятельности создает огромные массы искусственных образований, разнообразных по составу, состоянию и свойствам. В литературе известны попытки классификации типов техногенных пород [3,4]. Согласно исследованиям Московского университета, техногенные образования подразделяются на техногенно-измененные, техногенно-перестроенные и техногенно-образованные. К последней группе можно отнести намывные образования хвостохранилищ ПО "Апатит", так как они появились в результате коренного изменения апатито-нефелиновых руд в процессе их переработки и не встречаются в виде природных отложений. Действующее поле хвостохранилища АНОФ-2 ПО "Апатит", расположенное в губе Белой озера Имандра, занимает площадь более 800 га. Намывные отложения, слогающие тело и откосы этого накопителя, представляют собой уложенные способами гидромеханизации твердые отходы обогатительной фабрики, имеющие особый минеральный и гранулометрический состав и специфичные физико-механические свойства. В общем виде для подобных сооружений можно выделить отложения пляжевой зоны (флювиотехногенные) и отложения, формирующиеся в прудковой зоне (лимнотехногенные).

В формировании техногенной намывной толщи хвостохранилища можно выделить три этапа:

- 1) преобразование руды в процессе технологических циклов обогатительной фабрики;
- 2) осадконакопление, в результате которого происходит формирование литологического разреза намывных отложений;
- 3) формирование физического состояния и свойств техногенных отложений после или между циклами намыва.

На первом этапе формируется исходный материал техногенных отложений в зависимости от вещественного состава и структурных особенностей полезного ископаемого, дробления и грохочения, а также особенностей флотационного цикла обогащения.

Апатито-нефелиновые руды и вмещающие их породы являются комплексным сырьем на фосфор и алюминий, обладают полиминеральным составом (apatит, не-

фелин, подчиненное количество эгирина, сфена, титаномагнетита, полевого шпата и других второстепенных минералов). Соответственно минеральный состав твердой части пульпы также характеризуется полиминеральным составом с преобладанием нефелиновых фракций при минимальных значениях остаточного количества апатита и других второстепенных минералов.

На стадии дробления и измельчения в зависимости от применяемого оборудования и типа сит классификаторов обогатительной фабрики создается определенный гранулометрический состав зерен твердой фазы отходов флотационного обогащения. Кроме того, минеральные частицы, прошедшие технологические циклы обогащения, согласно морфологической характеристике по показателю морфологии зерен λ , коэффициенту округленности α и коэффициенту сферичности β , могут быть отнесены к необработанным, угловатым и весьма несферичным формам (табл.1).

Таблица 1

Морфологическая характеристика минеральных зерен техногенных отложений
(данные Производственного и научно-исследовательского института по изысканиям в строительстве, 1978)

Размер фракций, мм	Содержание фракций, %	λ	α	β	Характеристика по		
					λ	α	β
>2	0,5	-	-	-	-	-	-
2-1	1,8	0,474	0,48	0,879	Слабо обработанные	Слабо окатанные	Мало сферичные
1-0,5	4,2	0,322	0,253	0,654	Почти не обработанные	Незначительно угловатые	Несферичные
0,5-0,25	43,0	0,319	0,242	0,661	То же	Угловатые	Несферичные
0,25-0,1	36,5	0,282	0,183	0,574	Необработанные	- " -	Весьма несферичные
<0,1	14,0	0,181	0,085	0,076	Весьма необработанные	Весьма угловатые	То же
В среднем по навеске		0,289	0,203	0,552	Необработанные	Угловатые	- " -

Второй этап формирования техногенных отложений связан с технологией намыва и охватывает гидротранспортирование отходов флотационного обогащения (пульпы) до места выпуска и складирования их в пределах контура хвостохранилища. Рациональная система намыва в этот период позволяет регулировать процессы формирования состава и физического состояния отложений.

Для строительства намывных сооружений в ПО "Апатит" используется напорный гидротранспорт. От величины напора зависят многие технологические характеристики (скорость движения потока, несущего исходный материал, расход и консистенция пульпы и т.д.). изменение которых позволяет регулировать гранулометрический состав. Процесс гидротранспортирования от обогатительной фабрики до намывного сооружения влияет на форму и окатанность круп-

Гранулометрический состав техногенных песков пляжевой зоны,
хвостохранилища АНОФ-2

Участок фракцио- нирова- ния	Тип песка	Расстояние от уреза воды в пружке, м	Содержание фракций (мм), %							Коэффициент неоднородности $K_H = \frac{\alpha_{60}}{\alpha_{10}}$
			2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,10	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	
			Длинный пляж (ПК-4 - левая ветка)							
4	Алевроит	0-25	-	Следы	Следы	17	36	47	5,8	
3	Песок мелко- и тонкозернистый	25-75	-	-	4	45	42	9	2,6	
2	Песок мелко- зернистый	75-200	Следы	-	26	52	19	3	3,0	
1	Песок средне- и мелкозернистый	200-300	-	-	27	59	13	1	2,5	
		300-400	1	3	44	38	12	2	3,5	
Короткий пляж (ПК-56)										
-	Песок мелко- зернистый	0-25	-	1	9	59	27	4	Следы	2,8
		25-50	Следы	2	14	64	18	2	-	2,7
		50-80	-	3	22	59	12	3	-	2,8

них песчаных зерен путем сглаживания поверхности частиц за счет волочения и перекалывания в турбулентном потоке жидкости, но незначительно.

Намыв хвостохранилища АНОФ-2 производится по схеме "от дамбы к прудку". В результате формируются три зоны:

- 1) упорная призма, где откладываются наиболее крупные фракции песков;
- 2) пляжевая зона, в которой наблюдается постепенное уменьшение дисперсности "хвостов" по направлению к прудку;
- 3) прудковая зона, где скапливается тонкая фракция и аккумулируются жидкие отходы производства.

Определенные закономерности изменения гранулометрического состава намывных песков связаны с удалением от фронта намыва по ряду створов на длинном и коротком пляжах хвостохранилища АНОФ-2. В пределах длинного пляжа наблюдается более совершенное фракционирование и можно выделить четыре участка по мере удаления от точки выпуска пульпы (табл.2). На коротком пляже тонкодисперсная фракция сносится в прудок и его техногенные отложения можно оценить как мелкозернистые пески с незначительным увеличением тонкой фракции (0,1-0,05 мм). Пески в пределах пляжа в основном однород-

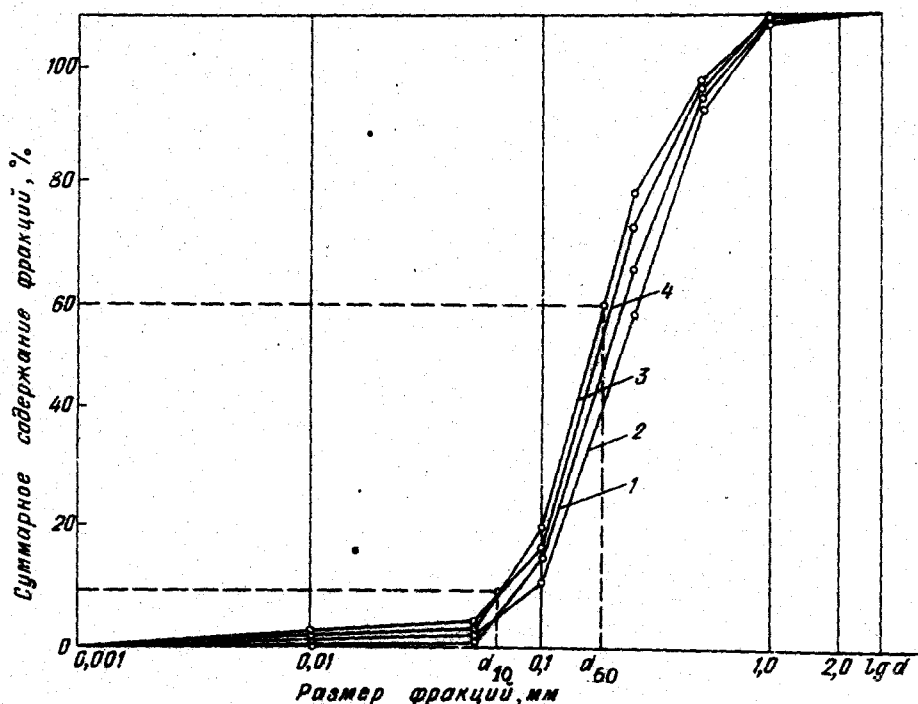


Рис.1. Интегральные кривые гранулометрического состава техногенных отложений в шурфе на расстоянии 50 м от ПК-29

1 - глубина $h = 0,5$ м, $K_H = 3,25$; 2 - $h = 1,1$ м, $K_H = 3,0$; 3 - $h = 1,6$ м, $K_H = 2,85$; 4 - $h = 2,1$ м, $K_H = 2,85$

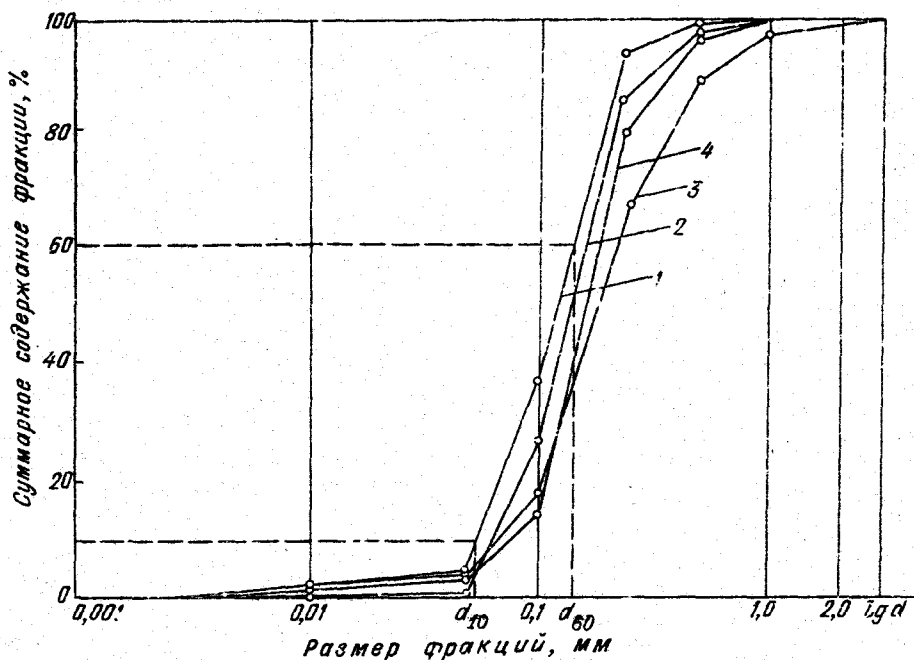


Рис.2. Интегральные кривые гранулометрического состава техногенных отложений по ярусам 1-4 откосов хвостохранилища АНОФ-2 у ПК-39
1 - $K_H = 2,6$; 2 и 4 - $K_H = 2,7$; 3 - $K_H = 3,3$

ные, за исключением участков с нарушением технологии намыва. Степень однородности сохраняется также по глубине пляжовой зоны и на внешних откосах (рис.1 и 2).

Технология намыва на втором этапе предопределяет слоистое строение разреза намывной толщи в пределах пляжа, что выражается в чередовании прослоев, в разной степени обогащенных органическими соединениями цикла флоатации. Дифференциация в таком слоистом разрезе определяется наличием остаточных пузырьков воздуха, которые сохраняются на гидрофобизированной поверхности минеральных зерен.

Третий этап характеризуется изменением намитого осадка за счет процессов уплотнения и упрочнения и формированием породы со специфическими составом, состоянием и свойствами. Важную роль в изменении во времени плотности естественного сложения ρ играют высокая скорость потока пульпы, угловатость частиц, их поверхностная физико-химическая активность, однородность по гранулометрическому составу в определенной зоне пляжа, остаточное содержание пузырьков воздуха на поверхности минеральных зерен, которые предопределяют рыхлое состояние техногенных образований. Данные о плотности в пределах пляжа и на внешних откосах подтверждают это заключение. Так, среднее значение плотности скелета $\rho_{ск}$ намывной толщи составляет 1,48-1,50 г/см³ с незначительными колебаниями, а коэффициент относи-

тельной плотности γ_d не превышает 0,33 и лишь в отдельных случаях достигает за счет слоистой текстуры значений, характерных для песков средней плотности сложения.

Плотность минеральной части ρ_m техногенных намывных песков не соответствует плотности природных песков и меняется в пределах 2,78–2,92 г/см³. Она зависит от минерального состава техногенных образований, который дифференцированно наследует вещественный состав руды за вычетом извлекаемого компонента (табл.3). С учетом того, что наиболее крупные и наиболее тяжелые минералы выпадают вблизи точки намыва, отложения откосов и частично зоны упорной призмы обладают более высокими значениями показателя плотности (2,89–2,92 г/см³); на остальной площади хвостохранилища в зависимости от однородности гранулометрического и минерального состава его значения колеблются от 2,77 до 2,86 г/см³.

Гранулометрический состав и его однородность, а также степень окатанности частиц определяют значения других физических показателей (табл.3), водных и механических свойств. В зависимости от положения уровня грунтовых вод водоносного горизонта, приуроченного к намывной толще, водоотдачи песков, коэффициента фильтрации, длительности намыва в разрезе намывной толщи меняется режим влажности и по степени водонасыщения можно выделить четыре слоя: 1) полного насыщения; 2) капиллярного поднятия; 3) максимально-молекулярной влагоемкости; 4) воздушно-сухого песка. Мощность этих слоев зависит от положения уровня и удаленности от точки намыва.

Поскольку в пределах пляжа отмечается четкое фракционирование, соответственно изменяются показатели водопроницаемости и водоотдачи. По результатам наливов в шурфы в пределах пляжевой зоны шириной 150 м получена эмпирическая зависимость, которая позволяет в первом приближении оценить величину коэффициента фильтрации K_f по мере удаления от уреза воды прудка: $K_f = K_{min} + \alpha l$, где K_{min} – наименьший коэффициент фильтрации отложений у прудиковой зоны, $K_{min} = 0,3 \pm 0,5$ м/сутки; l – расстояние от уреза воды до точки наблюдения; α – эмпирический коэффициент, для данных отложений $\alpha = 0,03$ сутки⁻¹. Водоотдача для песков призмы упора наиболее крупных разностей, определенная в полевых условиях, составляет 0,15–0,20.

Большое значение имеет оценка показателей прочности техногенных песков. Исследованиями ПНИИСа в лабораторных условиях были получены значения углов внутреннего трения для песков нарушенной текстуры: 28, 30 и 40° соответственно для рыхлого, среднеплотного и плотного сложения. Учитывая физическое состояние намывной толщи песков: их недоуплотненность, степень окатанности, специфический минеральный состав (наличие магнитной фракции), формирование пленок органических компонентов на поверхности минеральных зерен за счет флотационных реагентов и характер оползневых смещений на намывных откосах хвостохранилища в виде отдельных небольших цирков, характерных для связных сред, – наиболее достоверные характеристики прочности можно получить, проводя опыты непосредственно в полевых условиях, позволяющих сохранить ненарушенное сложение и физическое состояние этих образований. Судя по результатам более 200 испытаний на приборе ВСВ-25 по методике ускоренно-

Физические свойства флювиотехногенных песков по створу у ПК-20 пляжевой зоны
хвостохранилища АНОФ-2

Расстояние от уреза воды в пружке, м	Влаж- ность, %	Показатели плотности песков, г/см ³					γ_d	Кoeffи- ент порно- стости	Полная влажнос- тость, %
		ρ	$\rho_{ск}$	максимально плотного слоения	максимально рыхлого слоения	ρ_m			
1	30	1,91	1,46	1,70	1,24	2,82	0,56	0,931	33
20	7	1,59	1,43	1,77	1,37	2,82	0,33	0,905	32
40	4	1,55	1,48	1,78	1,39	2,86	0,27	0,932	32
80	6	1,56	1,48	1,77	1,39	2,82	0,28	0,905	32
120	9	1,60	1,47	1,83	1,41	2,78	0,18	0,891	32
160	9	1,52	1,39	1,77	1,38	2,78	0,00	0,993	36
180	6	1,72	1,62	1,84	1,45	2,89	0,49	0,784	27
200	7	1,70	1,59	1,84	1,44	2,92	0,43	0,836	29

Таблица 4

Результаты испытаний техногенных песков естественного сложения
на сдвиг в приборе ВСВ-25

Номер пакета	$h, \text{ м}$	$\rho, \text{ г/см}^3$	J_d	Природная прочность		Тип песка
				φ	$C, \text{ МПа}$	
1989						
20	0,3-1,8	1,59-1,62	0,07-0,31	13-16°	0,020-0,027	Средне- и мелко- зернистый
36	0,3-1,8	1,63-1,72	0,34-0,57	18-25 ^x	0,021-0,026	
1990						
24	0,5-1,5	1,54-1,67	0,16-0,31	12-14	0,020-0,027	Мелкозернистый или средне- и мел- козернистый
29	0,5-1,5	1,65-1,74	0,34-0,63	14-24	0,020-0,025	

^x В единичных определениях до 31°.

го сдвига, показатели прочности четко увязываются с коэффициентом относительной плотности для зоны песков неполного насыщения. Несмотря на высокую степень окатанности (см. табл. I), углы внутреннего трения имеют низкие значения и руководящим фактором является плотность сложения (см. табл. 4). Малые углы внутреннего трения можно объяснить тем, что вытянутая форма минеральных частиц способствует их ориентировке параллельно движению потока, а в этих условиях в наименьшей степени возможно проявление заданной угловатости.

Особо следует проанализировать формирование достаточно высокого сцепления, которое, однако, укладывается в очень узкий диапазон. Варьирование этого показателя не зависит от плотности сложения техногенных образований, что предполагает стабильность действия определенных факторов. В общем виде сцепление песков может быть представлено суммой составляющих связности:

$$c = c_3 + c_K + c_{\text{пл}} + c_3 + c_M,$$

где c_3 - сцепление как функция неокатанности частиц; c_K - капиллярное сцепление; $c_{\text{пл}}$ - цементационные связи за счет клеящего эффекта пленок флотореагентов; c_3 - сцепление, связанное с электростатическими силами, с учетом того, что дробление руды приводит к появлению некомпенсированных разноименных зарядов; c_M - сцепление под влиянием магнитных сил, которые возникают при наличии магнитной фракции (титаномagnetита, в меньшей степени эгирина).

Относительная роль составляющих в формировании связности техногенных песков в зависимости от степени водонасыщения разная.

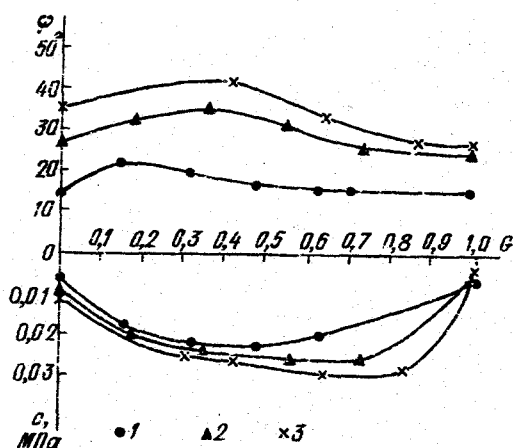


Рис.3. Зависимость параметров сопротивления сдвигу песков (сцепления C и угла внутреннего трения φ) от степени водонасыщения G
1 - рыхлые пески ($J_d = 0,17$); 2 - пески средней плотности ($J_d = 0,49$); 3 - плотные пески ($J_d = 0,75$)

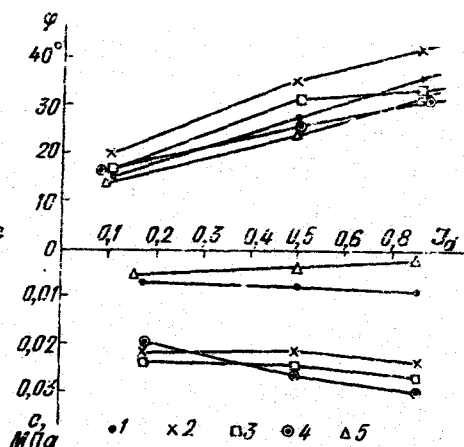


Рис.4. Зависимость параметров сопротивления сдвигу (сцепления C и угла внутреннего трения φ) от плотности сложения песков разной степени водонасыщения
1 - $G = 0$; 2 - $G = 0,31 \pm 0,42$; 3 - $G = 0,47 \pm 0,64$; 4 - $G = 0,62 \pm 0,86$; 5 - $G = 1,0$

В лаборатории моделировалось изменение более широкого диапазона плотности песков (от рыхлого до плотного) и, кроме того, оценивалось влияние влажности (от сухого до водонасыщенного состояния). Результаты эксперимента позволили установить следующие закономерности:

1. На величину угла внутреннего трения φ при нарушенном сложении песков значительно влияют как его плотность, так и степень водонасыщения (рис.3, 4). Максимальная величина этого показателя для рыхлого, средней плотности и плотного состояний наблюдается при степени водонасыщения $G = 0,15 \pm 0,40$. В этом интервале влажности в наибольшей степени проявляется действие капиллярных сил в кольцевых оболочках воды, которые способствуют увеличению площади контактов частиц, а также слабая окатанность песчаных зерен [1]. Можно считать, что угловой параметр прочности в этих условиях включает в себя величину собственно внутреннего трения, а также некоторую величину прочности, обусловленную капиллярными силами. При дальнейшем водонасыщении связи между песчаными частицами ослабевают и угол внутреннего трения снижается. Значения этого параметра при полном водонасыщении в зависимости от плотности сложения составляют 14° ($J_d < 0,33$), 24° ($J_d = 0,33 \pm 0,66$) и 31° ($J_d > 0,66$).

2. Величина сцепления в модельных опытах мало зависит от плотности сложения песков, в большей степени на них влияет степень водонасыщения. В воздушно-сухом состоянии ($G = 0$) пески обладают в основном зацеплением, формирующимся за счет малой окатанности частиц, электризации сухих песчаных зерен и магнитные силы незначительны ($C = 0,007 \pm 0,010$ МПа). При

изменении влажности от 5 до 20 % сцепление меняется от 0,018 до 0,03 МПа, причем этот показатель при среднеплотном и плотном состояниях отложений более резко повышается при коэффициенте водонасыщения, равном 0,6-0,85. В состоянии полного водонасыщения песков ($\sigma = 1$) сохраняется только остаточный эффект сцепления ($c = 0,0025+0,007$ МПа).

Таким образом, в формировании связности изучаемых песков немаловажную роль играют прежде всего капиллярные силы, присутствие тонкозернистой и пылевой фракций, а также клеящее действие органо-минеральных пленок, образовавшихся за счет сорбирования флоторезагентов и проявляющихся в большей степени в интервале водонасыщения от 0,6 до 0,80. Проведенные модельные испытания мелкозернистых техногенных песков подтвердили выводы И.П.Иванова, Н.П.Иваниковой и М.Б.Заводчиковой [2] о том, что плотность сложения и степень водонасыщения являются одними из ведущих факторов, влияющих на прочность песков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1979. 303 с.
2. Иванов И.П., Иваникова Н.П., Заводчикова М.Б. Интерпретация результатов испытаний песков на срез // Гидротехническое строительство. 1987. № 12. С. 37-39.
3. Огородникова Е.Н., Спиридонов Л.В. Инженерно-геологическая оценка техногенных грунтов и перспективы использования их в народном хозяйстве // Теория, практика, проблемы. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 120-129.
4. Хазанов М.И. Искусственные грунты, их образование и свойства. М.: Наука, 1975. 135 с.