

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 2 / 2023, Vol. 15, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/74SAVN223.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Невзоров, А. Л. Кольматация песков суспензией высокодисперсных отходов алмазодобывающей промышленности / А. Л. Невзоров, Ю. В. Саенко, А. М. Ширанов // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/74SAVN223.pdf>

For citation:

Nevezorov A.L., Saenko Yu.V., Shiranov A.M. Clogging of sands with a suspension of nanoclay waste of the diamond mining industry. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(2): 74SAVN223. Available at: <https://esj.today/PDF/74SAVN223.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-20013)

Невзоров Александр Леонидович

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», Архангельск, Россия
Профессор кафедры «Инженерной геологии, оснований и фундаментов»
Доктор технических наук, профессор, советник РААСН
E-mail: a.l.nevezorov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6547-2741>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=393637

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-2809-2012>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7004203097>

Саенко Юрий Викторович

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», Архангельск, Россия
Доцент кафедры «Инженерной геологии, оснований и фундаментов»
Кандидат технических наук
E-mail: yuri_saenko@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-014X>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1066359

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57074076400>

Ширанов Алексей Михайлович

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», Архангельск, Россия
Ассистент кафедры «Инженерной геологии, оснований и фундаментов»
E-mail: alexeyshiranov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=987147

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57219989831>

Кольматация песков суспензией высокодисперсных отходов алмазодобывающей промышленности

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального изучения водопроницаемости четырех типов песков различного состава и генезиса, модифицированных высокодисперсными отходами обогащения алмазоносной руды. Модификация осуществлялась путем кольматации пор при фильтрации сапонитсодержащей суспензии концентрации 5,8–6,3 г/л.

Образцы диаметром 73 мм и высотой 145 мм испытывались в экспериментальной установке, включающей три камеры трехосного сжатия и полуавтоматические устройства для

подачи суспензии и воды. Применение камер обеспечивало близкое к природному напряженно-деформированное состояние образцов и исключало погрешности за счет пристенной фильтрации, свойственные фильтрационным приборам.

Эффект кольматации пор зависел от коэффициента неоднородности песка c_u . У песка средней крупности флювиогляциального с $c_u = 5,0$ коэффициент фильтрации снизился в 12,1–17,7 раза относительно исходного значения, а у песка мелкого аллювиально-морского с $c_u = 3,5$ — в 6,4–10,8 раза. У аллювиального и озерно-ледникового мелких песков с коэффициентами неоднородности 2,2 и 2,5 эффект кольматации был незначительным из-за выноса частиц глины потоком воды.

В качестве вещества, вызывающего агрегацию глинистых частиц и обеспечивающего их накопление в порах, служил карбонат кальция. Кольматация песков с добавкой 1–3 % мела привела к снижению коэффициента фильтрации в 12,5–67,0 раза до значений 0,027–0,085 м/сут. При добавке 5 % мела водопроницаемость мелкого аллювиального песка снизилась в 51,8–71,0 раза. Как правило, больший эффект имел место у менее плотных образцов песка и при скорости фильтрации суспензии не менее 3,5 м/сут. Вынос частиц глины при последующей фильтрации воды не наблюдался ни у одного из образцов.

Эксперименты показали, что отходы алмазодобывающей промышленности, представляющие собой суспензию высокодисперсной сапонитовой глины малой концентрации, могут быть использованы для модификации песков, например, в основании накопителей бытовых отходов.

Ключевые слова: кольматация пор; модификация грунта; промышленные отходы; сапонит; водопроницаемость грунта; коэффициент фильтрации

Введение

Для предотвращения механической или химической суффозии в основаниях гидротехнических сооружений, защиты геологической среды от загрязнения фильтратом из накопителей бытовых и промышленных отходов, сокращения потерь воды из каналов и водохранилищ устраивают специальные противофильтрационные конструкции — экраны, завесы, облицовки и т. п. На существующих сооружениях в случае необходимости снижения водопроницаемости грунтов основания используют растворы вяжущих и высокодисперсных глин, полимеров или их смесей. Указанные составы вносят в основание путем нагнетания через буровые скважины или инъекторы, механическим перемешиванием с помощью буросмесительных установок или фрез, а в подходящих геологических условиях выполняют кольматацию пор грунта, запуская в поток инфильтрующейся или грунтовой воды раствор, а точнее, суспензию вяжущего или высокодисперсной глины малой концентрации¹ [1; 2]. Условием успешного применения последнего метода является подбор оптимального состава суспензии для ее фильтрации через грунт и постепенного накопления частиц в порах [1].

Дистанция проникновения и эффект кольматации зависят от размера пор в грунте, размера частиц и концентрации суспензии, наличия в ней веществ, вызывающих коагуляцию, напора и других факторов [3; 4]. Считается, что суспензии высокодисперсных глин имеют ряд преимуществ перед растворами вяжущих. Во-первых, размер глинистых частиц существенно

¹ Методическое пособие по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. — Москва: ФЦС, 2020. — 83 с. — URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp1_6_2020.pdf.

меньше размера частиц тонкодисперсных микроцементов^{2,3}. Во-вторых, из-за отсутствия схватывания суспензия глины удобнее при производстве работ, она проникает в грунты на большее расстояние и не вступает в химические реакции. Кроме того, применение глины вместо цемента позволяет сократить расходы [5].

В нашей стране первые опыты по кольматации песков раствором бентонита были проведены учеными МГУ для обоснования возможности строительства канала в каракумских песках. Обширные лабораторные исследования показали, что способ требует тщательного подбора режима фильтрации, в противном случае может происходить накопление глинистых частиц на поверхности песка, а при эксплуатации сооружения, наоборот, — их вынос потоком воды [6].

По данным K.L. Kasperski и др. вязкость суспензии бентонита с концентрацией до 1 % практически не отличается от вязкости воды, а при концентрации до 5 % она сохраняет свойства, присущие ньютоновской жидкости [7]. С другой стороны, в экспериментах S. Abend и G. Lagaly при концентрации более 3 % суспензия Na-монтмориллонита становилась вязким гелеобразным веществом [8].

Внесение электролита за счет уменьшения толщины диффузных ионных слоев может изменить поведение суспензии, так, например, ионы натрия уменьшают вязкость и повышают ее подвижность, а пиррофосфат натрия играет роль агента-диспергатора [7–9]. В то же время, ряд экспериментов показал, что суспензия бентонита стабильна в широком интервале pH — от 3 до 12, что является еще одним аргументом в пользу ее применения для изоляции промышленных отходов [10].

По данным R. Jadid и M.Z. Abedin при концентрации суспензии менее 0,5 % частицы бентонита не задерживались в порах песков, при 1 % — суспензия проникала на глубину более 30 см и для кольматации пор в образце требовалось 10 часов, а при 5 % и более — наблюдалось образование осадка на фильтрах [5]. В то же время S. Gulhati и M. Datta для кольматации пор в песке удалось применить суспензию с концентрацией твердых частиц более 10 % [11].

Приведенные, иногда противоречивые, данные говорят о том, что процесс кольматации грунтов глинистыми суспензиями зависит от многих факторов и, в частности, от физико-химических явлений на развитой поверхности частиц глины, таких как адсорбция воды, наличие двойного электрического слоя и др. [12; 13]. Поэтому разработке соответствующих проектов должны предшествовать тщательные лабораторные исследования.

Заметим, что начиная со второй половины прошлого века все большее применение для изоляции отходов находят составы, полученные перемешиванием сухих компонентов — песка и бентонита [14; 15]. Минимальная добавка бентонита к песку составляет 1,5 % по массе, а внесение 5–10 % обеспечивает коэффициент фильтрации не выше 10^{-4} м/сут⁴ [16; 17]. При 15 % — водопроницаемость смеси практически не отличается от водопроницаемости самой высокодисперсной глины [18]. Смеси, содержащие 50 % бентонита, пригодны даже для изоляции радиоактивных отходов, тем более что бентонит способен сорбировать ионы тяжелых металлов [19–21].

² ГОСТ 59538-2021 — Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе цемента.

³ СТО 1746653-001-2011 Рекомендации по инъекционному закреплению грунтов с применением особо тонкодисперсного минерального вяжущего (ОТДВ) «Микродур».

⁴ LFE10 — Using bentonite enriched soils in landfill engineering // Environment Agency — 2014. — 51 p.

Особенностью одного из месторождений алмазов в Архангельской области является присутствие в кимберлитовой руде большого количества сапонита — глинистого минерала подкласса слоистых силикатов группы той же группы монтмориллонита, что и бентонит, с удельной поверхностью частиц до 400–600 м²/г. Отходы обогащения, содержащие до 87 % сапонита, содержатся в хвостохранилище горно-обогатительного комбината в виде суспензии, концентрация которой изменяется в широком интервале в зависимости от глубины и времени года⁵. Проведенные нами ранее эксперименты показали, что одним из способов снижения водопроницаемости песка с помощью сапонитсодержащей суспензии может быть кольматация пор [22].

Целью настоящей работы было экспериментальное изучение снижения водопроницаемости песков в результате кольматации пор при фильтрации сапонитсодержащей суспензии из отходов обогащения алмазоносной руды.

Материалы

Исследования выполнялись на четырех типах песков, наиболее распространенных в Архангельской области. Их характерные размеры частиц D , найденные интерполяцией по экспериментальным значениям, полученным ситовым методом, и степень неоднородности c_u приведены в таблице 1, а графики гранулометрического состава — на рисунке 1. Плотность частиц изменяется в интервале 2,64–2,66 г/см³, максимальная плотность — 1,63–1,84 г/см³, оптимальная влажность 0,13–0,16. В составе мелких песков содержание кварца составляет 74,4–84,7 %, а в песке средней крупности, кроме 64,0 % кварца присутствуют оксиды алюминия и железа, присущие глинистым минералам.

Таблица 1

Свойства песков, использовавшихся в экспериментах

№	Пески	Характерные размеры частиц, мм						c_u
		D_{10}	D_{15}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	D_{85}	
1	Мелкий, a	0,106	0,118	0,155	0,205	0,230	0,382	2,2
2	Мелкий, am	0,054	0,074	0,086	0,167	0,190	0,248	3,5
3	Средней крупности, f	0,068	0,105	0,171	0,266	0,341	0,638	5,0
4	Мелкий, lg	0,071	0,092	0,123	0,160	0,178	0,223	2,5

Составлена авторами на основе полученных данных

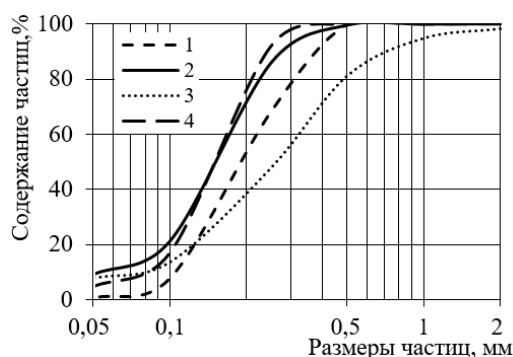


Рисунок 1. Графики гранулометрического состава, цифрами обозначены номера песков из таблицы 1 (рисунок авторов)

⁵ Карпенко Ф.С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов имени М.В. Ломоносова. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. геол.-минер. наук. — М.: Институт геоэкологии РАН, 2019. — 39 с.

Испытания каждого из песков проводились при трех значениях коэффициента уплотнения $K_{com} = \rho_d/\rho_d^{max}$, соответствующих применению их в основаниях накопителей, защитных слоях на поверхности и ограждающих дамбах. Интервалы варьирования значений K_{com} и коэффициента пористости e исследованных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Интервалы изменения K_{com} и e образцов

№	Пески	K_{com}	e
1	Мелкий, a	0,90–0,92	0,77–0,81
		0,93–0,95	0,72–0,75
		0,96–0,98	0,67–0,70
2	Мелкий, am	0,89–0,91	0,70–0,74
		0,93–0,95	0,63–0,66
		0,98–0,99	0,56–0,58
3	Средней крупности, f	0,89–0,92	0,57–0,62
		0,93–0,95	0,52–0,55
		0,95–0,97	0,48–0,52
4	Мелкий, lg	0,89–0,91	0,79–0,83
		0,92–0,94	0,74–0,77
		0,95–0,96	0,70–0,72

Составлена авторами на основе полученных данных

Концентрация отобранной из пруда–отстойника хвостохранилища сапонитсодержащей суспензии составляла 0,58–0,63 %. Твердая фаза была представлена преимущественно частицами размером менее 0,001 мм — 91,5–94,2 %, содержание фракции 0,001–0,002 мм находилось в пределах 0,5–2,5 %. Судя по приведенной на рисунке 2 изотерме сорбции паров воды, удельная поверхность твердой фазы составляла 350–400 м²/г. Столь высокая дисперсность служит причиной длительной седиментации частиц глины в хвостохранилище.

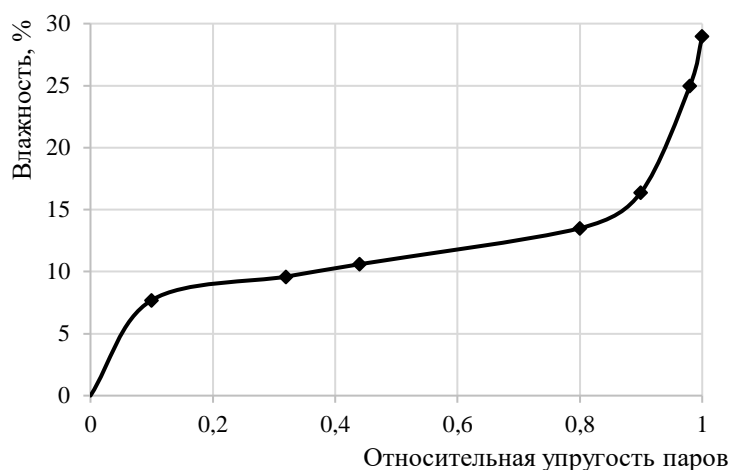


Рисунок 2. Изотермы сорбции паров воды твердой фазой суспензии (рисунок авторов)

Методика исследований

Образцы диаметром 73 мм и высотой 145 мм размещались в камерах трехосного сжатия производства компании «Геосотр». В камерах в ходе экспериментов поддерживалось давление 100 кПа, исключавшее пристенную фильтрацию, свойственную обычным фильтрационным приборам [23; 24]. Постоянный уровень жидкости в подающей емкости поддерживался автоматически, а во избежание образования осадка ее периодически перемешивали магнитной мешалкой. Детальное описание экспериментальной установки приведено в ранее опубликованной работе [22].

В начале эксперимента образцы насыщали дистиллированной водой, пропуская ее снизу-вверх в течение 12 часов. После чего при движении воды в том же направлении определяли коэффициент фильтрации, замеряя с двукратной повторностью 60-минутные расходы при градиентах напора 0,25; 0,5; 0,75 и 1. Переход на следующую ступень напора осуществляли при достижении установившегося режима фильтрации, а именно равных значений расхода в течение 12 часов.

Далее через образцы сверху-вниз фильтровали сапонитсодержащую суспензию, постепенно, по мере кольтатации пор, повышая напор. Подачу суспензии прекращали при выносе частиц глины через сливной патрубков прибора или при достижении максимально возможного для лабораторной установки градиента напора $I = 10$.

М. Jadid и M.Z. Abedin подчеркивали, что при проведении подобных исследований следует отличать собственно кольтатацию пор в образцах от закупорки фильтров прибора [5]. В наших экспериментах для исключения этого фактора перед определением коэффициента фильтрации модифицированных песков выполняли очистку фильтров на верхнем торце образцов за счет циркуляции дистиллированной воды в надштамповом пространстве в течение 12 часов.

Определение водопроницаемости выполняли по той же методике, что и в начале экспериментов. Отличие состояло лишь в том, что замеры расходов при каждом градиенте напора выполняли не менее четырех раз.

При каждом коэффициенте уплотнения K_{com} испытания проводились с двух-, трехкратной повторяемостью.

Наличие и местоположение глинистых частиц в образцах контролировали путем сепарации на центрифуге проб, отобранных из верхней, средней и нижней трети образцов, в течение 10 мин при 1000 об/мин.

Результаты

Из-за схожести гранулометрического состава исследованные пески по водопроницаемости отличаются незначительно, в частности, при коэффициенте уплотнения $K_{com} = 0,89-0,92$ исходные значения коэффициента фильтрации k_0 составляли 1,67–2,05 м/сут, а при $K_{com} = 0,95-0,99$ — $k_0 = 0,78-1,35$ м/сут (табл. 3).

Таблица 3

Влияние кольтатации на водопроницаемость песков

№	Разновидности песков	K_{com}	k_0 , м/сут	k_{m1} , м/сут	$N_1 = \frac{k_0}{k_{m1}}$	I_s	v_c , м/сут	I_c
1	Мелкий, <i>a</i>	0,90...0,92	2,05	0,28/0,99	7,4/2,1	7	3,5–5,4	0,25
		0,93...0,95	1,85	0,51/0,96	3,6/1,9	7		0,25
		0,96...0,98	1,35	0,50/0,93	2,7/1,4	10		0,25
2	Мелкий, <i>am</i>	0,89...0,91	1,67	0,26	6,4	8	3,9–4,8	–
		0,93...0,95	1,35	0,12	10,8	10		–
		0,98...0,99	0,78	0,10	7,8	–		–
3	Средней крупности, <i>f</i>	0,89...0,92	1,91	0,11	17,7	–	1,5–1,9	–
		0,93...0,95	1,51	0,09	17,1	–		–
		0,95...0,97	0,97	0,08	12,1	–		–
4	Мелкий, <i>lg</i>	0,89...0,91	1,98	0,90/1,78	2,2/1,1	7	2,8–3,5	0,5
		0,92...0,94	1,81	0,30/1,43	5,9/1,3	8		0,5
		0,95...0,96	1,62	0,13/1,34	12,5/ 1,2	8		0,5

Составлена авторами на основе полученных данных

При пропуске сапонитсодержащей суспензии через образцы со скоростью 3,5 м/сут и более осаждения глинистых частиц на верхних фильтрах приборов не наблюдалось. Указанную скорость поддерживали, как отмечалось выше, за счет постепенного повышения напора. Вынос частиц глины через нижние торцы образцов с коэффициентом уплотнения $K_{com} \leq 0,95$ начинался при градиенте напора $I_s = 7-8$, а из образцов с коэффициентом уплотнения $K_{com} > 0,95$ при $I_s = 8-10$. Значения скорости фильтрации суспензии на завершающей стадии кольматации образцов v_c приведены в таблице 3.

Значения коэффициента фильтрации воды для модифицированных образцов, то есть образцов после пропуска суспензии, обозначенные k_{m1} , приведены в таблице 3. У двух исследованных песков при достижении критического градиента напора I_c начинался вынос частиц глины из пор и рост водопроницаемости, поэтому в таблице дано по два значения k_{m1} — до и после I_c . В качестве примера зависимость скорости фильтрации от градиента напора $v = f(I)$ для образцов мелкого озерно-ледникового (*lg*) песка показана на рисунке 3. Данные при $I = 1$ на графиках не приведены, так как при указанном градиенте в образцах до и после модификации наблюдался вынос уже песчаных частиц.

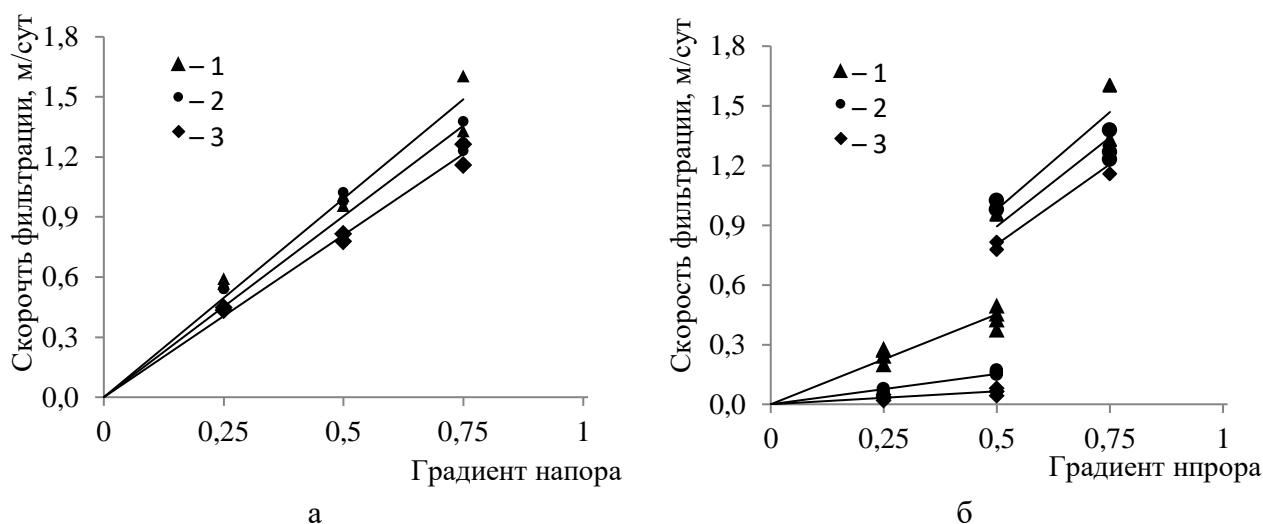


Рисунок 3. Зависимости $v = f(I)$ для образцов мелкого озерно-ледникового песка: а — в исходном состоянии; б — после пропуска суспензии; при коэффициенте уплотнения: 1 — 0,89–0,91; 2 — 0,92–0,94; 3 — 0,95–0,96 (рисунок авторов)

Эффект кольматации песков оценивался по снижению водопроницаемости. Можно заметить, что он зависел от коэффициента неоднородности песка s_u . В частности, у песка средней крупности с $s_u = 5,0$ коэффициент фильтрации снизился в 12,1–17,7 раза относительно исходного значения k_0 , а у песка мелкого аллювиально-морского (*am*) с $s_u = 3,5$ он уменьшился в 6,4–10,8 раза. У двух оставшихся песков с коэффициентом неоднородности 2,2 и 2,5 за счет выноса частиц потоком воды первоначально достигнутый эффект стал незначительным. Заметим, что в половине случаев не удалось достичь значения коэффициента фильтрации менее 0,3 м/сут, присущего слабоводопроницаемым грунтам⁶.

Усилить эффект кольматации позволяют вещества-коагулянты, способствующие агрегации и накоплению глинистых частиц в порах, например соединения алюминия, железа и кальция [6; 12]. J. Yoop в качестве такой добавки использовал, например, портландцемент в количестве 4 % от массы бентонита [1]. Наши опыты показали, что внесение коагулянтов в

⁶ ГОСТ 25100-2020 — Грунты. Классификация.

суспензию ведет к быстрой седиментации частиц и блокировке фильтрации, поэтому предпочтение следует отдавать добавкам в грунт (рис. 4).

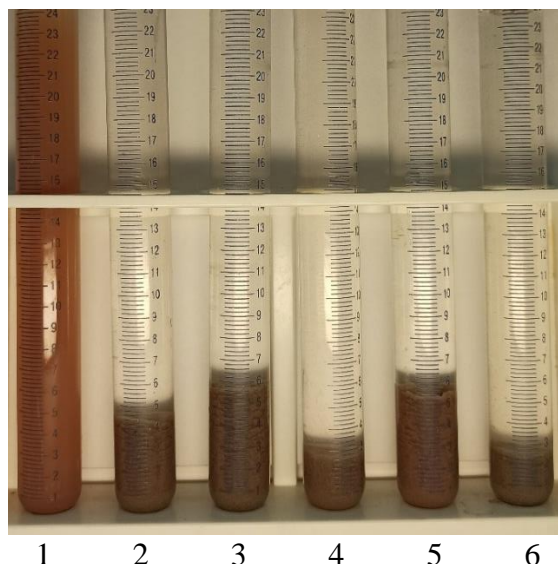


Рисунок 4. Эксперимент по седиментации суспензии:

1 — контрольная проба; 2...6 — пробы с добавкой коагулянтов (рисунок авторов)

Для усиления эффекта кольматации нами применялся кальцит, а именно, мел, порошок которого после измельчения и просеивания через сито 0,1 мм вносили в среднюю по высоте треть образцов [22]. Количество кальцита изменяли в пределах от 1 % до 5 % от массы твердой фазы песка из условия обеспечения коэффициента фильтрации не более 0,1 м/сут. При выполнении указанного условия модифицированные пески могут использоваться для создания противофильтрационных устройств в теле и основании дамб⁷.

Таблица 4

Влияние кольматации на водопроницаемость песков с добавкой мела

№	Разновидности песков	Добавка $CaCO_3$, %	K_{com}	k_{m2} , м/сут	$N_2 = \frac{k_0}{k_{m2}}$	k_{m3} , 10^{-2} м/сут	$N_3 = \frac{k_0}{k_{m3}}$
1	Мелкий, <i>a</i>	3	0,91...0,92	1,58	1,29	5,6	36,6
			0,94...0,95	1,30	1,42	8,5	21,7
			0,98...0,99	1,03	1,31	3,3	40,8
		5	0,91...0,92	1,11	1,85	2,9	70,6
0,93...0,95	0,67		2,76	2,6	71,0		
0,98...0,99	0,42		3,20	2,6	51,8		
2	Мелкий, <i>am</i>	1	0,88...0,90	0,73	2,29	4,3	38,8
			0,90...0,92	0,69	1,97	5,0	27,0
			0,95...0,98	0,36	2,19	3,2	24,5
3	Средней крупности, <i>f</i>	1	0,91...0,92	1,77	1,08	8,4	22,7
			0,93...0,94	1,48	1,02	7,9	19,1
			0,96...0,97	0,71	1,38	7,8	12,5
4	Мелкий, <i>lg</i>	1	0,89...0,91	1,65	1,20	3,5	56,7
			0,92...0,94	1,29	1,41	2,7	67,0
			0,96...0,98	0,82	1,97	3,6	45,0

Составлена авторами на основе полученных данных

⁷ СП 39.13330.2012 — Плотины из грунтовых материалов.

Частичное заполнение пор мелом привело к незначительному снижению коэффициента фильтрации образцов k_{m2} по отношению к исходному значению k_0 у образцов без мела — в среднем в 1,8 раза (табл. 4). После пропуска суспензии удалось добиться за счет кольматации пор требуемой водопроницаемости. Коэффициент фильтрации образцов, содержащих 1–3 % мела, снизился до значений $k_{m3} = 0,027–0,085$ м/сут, то есть в 12,5–67,0 раз относительно k_0 . Добавка 5 % привела к снижению водопроницаемости аллювиального песка (a) в 51,8–71 раз.

В таблице 4 значения I_s и I_c не приведены, так как вынос частиц глины при пропуске суспензии и воды не наблюдался ни у одного из песков, подвергшихся модификации, вплоть до максимально возможного для лабораторной установки градиента напора $I = 10$.

Сепарация на центрифуге показала, что большее количество глинистых частиц содержалось в средней трети образцов, куда предварительно вносилась добавка мела.

Обсуждение результатов

С середины прошлого века применимость материала в дренажных фильтрах определяют исходя их следующего условия⁸:

$$D_{15}/d_{85} < 5,$$

где D_{15} — размер, содержание частиц меньше которого в фильтре составляет 15 %; d_{85} — размер, содержание частиц меньше которого в грунте составляет 85 %.

Используя приведенное соотношение, Е.В. Burwell предложил два критерия для оценки возможности инъекции цементного раствора в грунт [25]:

$$N_1 = D_{15}/d_{85} \text{ и } N_2 = D_{10}/d_{95}, \quad (1)$$

где характерные размеры частиц D_{15} и D_{10} относятся к грунту основания, а размеры d_{85} и d_{95} — к частицам цемента в растворе.

По данным J.K. Mitchell раствор может проникать через поры грунта при $N_1 > 25$ и $N_2 > 11$ [26]. R.J Krizek с соавторами допустили несколько меньшие значения показателей: $N_1 > 15$; $N_2 > 8$ [27]. По мнению Б.А. Ржаницына инъекция будет успешной при $N_1 > 8$ [23]. Нормы допускают выполнение пропитки грунта цементным раствором при $N_1 > 10–11$, но при этом подчеркивается, что использование особо тонкого цемента, для которого $N_1 > 24$, считается экономически нецелесообразным^{1,9}.

Несколько иной показатель рекомендовали М. Axelsson и др. [28]:

$$N_3 = 0,15(D_{50}/d_{85}), \quad (2)$$

считается, что инъекция возможна при $N_3 > 5$.

I.N. Markou с соавторами при решении той же задачи учитывали содержание в грунте самых мелких фракций, а именно тех, суммарное содержание которых в грунте не превышает 2,5 % [29–32]:

$$N_4 = D_{2,5}/d_{85}. \quad (3)$$

⁸ Investigation of filter requirements for underdrains / USACE // Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. — Technical Memorandum № 3-360. — 1953. — 60 p.

⁹ СТО 1746653-001-2011 Рекомендации по инъекционному закреплению грунтов с применением особо тонкодисперсного минерального вяжущего (ОТДВ) «Микродур».

В зависимости от значения соотношения $D_{15}/D_{2,5}$ должно выполняться условие $N_4 > 24-27$.

Более сложный показатель, учитывающий кроме характерных размеров частиц цемента и грунта, плотность последнего, водоцементное отношение раствора и давление инъецирования, содержится в работе S. Akbulut и A. Saglamer [33].

Расчет с использованием данных о гранулометрическом составе песков и твердой фазы суспензии глины показал, что все приведенные критерии выполняются, а именно: $N_1 > 74$, $N_2 = 20-40$, $N_3 > 80$, а эксперименты подтвердили, что при размере частиц 0,001 мм и менее суспензия легко проникает через поры в образцах исследованных песков.

Второй проблемой изучаемого процесса, как отмечалось выше, является вынос потоком фильтрующейся воды частиц глины, накопившихся в порах.

При оценке фильтрационной устойчивости гидротехнических сооружений подобную задачу решают, сопоставляя размер частиц с диаметром пор. Последний находят как функцию коэффициента пористости, коэффициента неоднородности и размера частиц D_{17}^{10} [34–38]. Вычисления показали, что диаметр пор в образцах песков изменялся в среднем от 0,03 мм до 0,07 мм, что в десятки раз больше размера частиц глины.

Устойчивая кольматация пор объясняется особыми свойствами частиц высокодисперсной глины. При их сближении с поверхностью частиц песка начинают действовать силы, обусловленные молекулярным взаимодействием между твердыми телами (силы Ван-дер-Ваальса), взаимодействием ионных атмосфер, образующихся у поверхности частиц в растворах электролитов, а также термодинамическими особенностями граничных слоев поровой влаги с измененной по сравнению с объемной водой структурой [12; 13; 39]. Кроме того, кольматации пор способствует взаимодействие частиц глины друг с другом, а также с ионами кальция. Отметим, что названные силы по-разному реагируют на наличие и концентрацию электролита в фильтрующейся воде и температуру.

Таким образом, при исследовании движения суспензии через грунт и кольматации пор, а также способов воздействия на эти процессы, основное внимание следует уделять не геометрии порового пространства грунта, а физико-химическим явлениям на развитой поверхности частиц глины.

Выводы

1. Отходы алмазодобывающей промышленности, представляющие собой суспензию высокодисперсной сапонитовой глины малой концентрации (0,58–0,63 %), могут быть использованы для кольматации песков, например, в основании накопителей бытовых отходов. В качестве вещества, вызывающего агрегацию глинистых частиц и тем самым препятствующего их выносу из грунта, может служить карбонат кальция.

2. Эффект кольматации пор в результате пропуска сапонитсодержащей суспензии зависел от коэффициента неоднородности песка c_u . У песка средней крупности с $c_u = 5,0$ коэффициент фильтрации снизился в 12,1–17,7 раза относительно исходного значения k_0 , а у песка мелкого аллювиально-морского с $c_u = 3,5$ — в 6,4–10,8 раза. У двух других мелких песков с коэффициентом неоднородности 2,2 и 2,5 наблюдался вынос частиц глины потоком воды и эффект кольматации был незначительным.

¹⁰ Руководство по расчётам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. — Ленинград: Энергия, 1973. — 60 с.

3. Кольматация песков с добавкой 1–3 % мела привела к снижению коэффициента фильтрации в 12,5–67,0 раза до значений 0,027–0,085 м/сут. При добавке 5 % мела водопроницаемость мелкого аллювиального песка снизилась в 51,8–71,0 раза. Вынос частиц глины потоком воды не наблюдался ни у одного из образцов. Как правило, больший эффект имел место у менее плотных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yoon J. Application of pore fluid engineering for improving the hydraulic performance of granular soils — Austin: University of Texas, 2011 — 319 p.
2. Murray H. Applied clay mineralogy / H. Murray. — Radarweg: Elsevier, 2007. — 180 p.
3. Ives, K. Filtration of clay suspensions through sand / K.J. Ives // Clay Minerals. — 1987. — 22. pp. 49–61.
4. Yoon J. Groutability of granular soils using bentonite grout based on filtration model / J. Yoon, C.S. El Mohtar. — DOI: 10.1007/s11242-014-0279-6 // Transport in porous media — 2014. — Vol. 102(3). — pp. 365–385.
5. Jadid R. Permeation of bentonite suspension through loose sandy soil / R. Jadid, Z. Abedin. // Malaysian Journal of Civil Engineering — 2015. — Vol. 27(3) — pp. 413–424.
6. Орнатский Н.В. Исследование процесса кольматации песков / Н.В. Орнатский, Е.М. Сергеев, Ю.М. Шехтман — М.: Изд-во МГУ, 1955. — 185 с.
7. Kasperski K. Viscosities of dilute aqueous suspensions of montmorillonite and kaolinite clays / K.L. Kasperski, C.T. Hepler, L.G. Hepler. — DOI: 10.1139/v86-316 // Canadian Geotechnical Journal — 1986. — Vol. 64 — pp. 1919–1924.
8. Abend S. Sol-gel transitions of sodium montmorillonite dispersions / S. Abend, G. Lagaly. — DOI: 10.1016/S0169-1317(99)00040-X // Applied Clay Science Journal. — 2000. — Vol. 16 — pp. 201–227.
9. El Mohtar C.S. Liquefaction mitigation using bentonite suspensions / C.S. El Mohtar, A. Bobet, M.C. Santagata, V.P. Drnevich, C.T. Johnston. — DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000865 // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2013. — Vol. 139(8). — pp. 1369–1380.
10. Magzoub M. Effects of sodium carbonate addition, heat and agitation on swelling and rheological behavior of Ca-bentonite colloidal dispersions / M.I. Magzoub, M.S. Nasser, I.A. Hussein, A. Benamor, S.A. Onaizi, A.S. Sultan, M.A. Mahmoud. DOI: 10.1016/j.clay.2017.07.032 // Applied Clay Science Journal. — 2017. — Vol. 147 — pp. 176–183.
11. Gulhaty S. Geotechnical Engineering / S. Gulhaty, M. Datta. — MacGraw-Hill Education, 2005, 549 p.
12. Теоретические основы инженерной геологии / Под ред. акад. Сергеева Е.М. — М: Недра, 1985, — 332 с.
13. Ives K. Filtration of clay suspensions through sand / K.J. Ives // Clay Minerals. — 1987. — 22. pp. 49–61.

14. Chapuis R.P. Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests / R.P. Chapuis // Canadian Geotechnical Journal — 1990. — Vol. 27. — pp. 47–57.
15. Permeability and durability testing of soil/bentonite backfill Mix. // St. Louis, Michigan: Conestoga-Rovers & Associates Limited — 1983. — 52 p.
16. Chapuis R.P. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil–bentonite and compacted clay liners / R.P. Chapuis. DOI: 10.1139/T01-092 // Canadian Geotechnical Journal. — 2002. — Vol. 39. — pp. 417–439.
17. Chalermyanont T. Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners / T. Chalermyanont, S. Arrykul // Songklanakarin Journal of Science and Technology — 2005. — Vol. 27. — № 2. — pp. 313–323.
18. Sakita T. Influence of bentonite type and producing method on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture / T. Sakita, H. Komine, A. Yamada, H. Wang, Sh. Goto DOI: 10.1051/e3sconf/202020510005 // E3S Web Conference — 2020. — № 205.
19. Kayode A.D. Clay soil modification techniques for the adsorption of heavy metals in Aqueous Medium: A Review / A.D. Kayode, A.S. Sunday, A.S. Oluyemi, A.A. Adegalu, O.O. Samson, I.O. Abidemi, O.A. Hellen DOI: 10.20431/2349-0403.0606003 // International Journal of Advanced Research in Chemical Science. — 2019. — Vol. 6 — № 6. — pp. 14–31.
20. Sharma L.K. Experimental evaluation of geomechanical behavior of bentonite-sand mixture for nuclear waste disposal / L.K. Sharma, R. Singh, M. Ahmad, R.K. Umrao, T.N. Sing // Procedia Engineering, Symposium of the International Society for Rock Mechanics. — 2017. — Vol. 191. — pp. 386–393.
21. Akgun H. Performance assessment of a bentonite-sand mixture for nuclear waste isolation at the potential Akkuyu Nuclear Waste Disposal Site, southern Turkey / H. Akgun, M. Ada, M.K. Kockar DOI: 10.1007/s12665-014-3837-x // Environmental Earth Science. — 2015 — Vol. 73. pp. 6101–6116.
22. Невзоров А.Л. Модификация песка суспензией сапонитовой глины — одним из отходов алмазодобывающей промышленности / А.Л. Невзоров, Ю.В. Саенко, А.М. Ширанов DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.08. — Construction and Geotechnics. — 2022. — Т. 13. — № 4. — С. 103–115.
23. Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. — М.: Изд-во Стройиздат, 1986. — 264 с.
24. Daniel D. Fixed-wall versus flexible-wall permeameters / D.E. Daniel, D.C. Anderson, S.S. Boynton // Hydraulic barriers in soil and rock, ASTM STP 874, Philadelphia. — 1985. — pp. 107–126.
25. Burwell E.B. Cement, clay grouting of foundations: Practice of the corps of engineering / E.B. Burwell DOI: 10.1061/JSFEAQ.0000099 // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. — 1958. — Vol. 84. — № 1551. — pp. 1–22.
26. Mitchell J.K. Soil improvement — state of the art report / J.K. Mitchell // Proceedings of the conference on soil mechanics and foundation engineering. — 1981. — Vol. 4 — pp. 509–565.
27. Krizek R.J. Mechanical properties of microfine cement / sodium silicate grouted sand / R.J. Krizek, H.-J. Liao, R.H. Borden // Proceedings of the conference of grouting, soil improvement and geosynthetics. — 1992. — Vol. 1. — pp. 688–699.

28. Axelsson M. Stop mechanism for cementitious grouts at different water-to-cement ratios / M. Axelsson, G. Gustafson, A. Fransson // *Tunneling and Underground Space Technology*. — 2009. — Vol. 24(4). — pp. 390–397.
29. Christodoulou D. Experimental investigation of microfine cement suspensions injectability in sandy soils / D. Christodoulou, I. Markou, A. Droudakis // *International Journal of Environmental Science*. — 2021. — Vol. 6. — pp. 445–456.
30. Markou I.N. Efficiency of soil groutability criteria for cement suspension grouting / I.N. Markou, A.E. Litsiou. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0197 // *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019*. — 2019.
31. Markou I.N. Prediction of cement suspension groutability based on sand hydraulic conductivity / I.N. Markou, Ch.K. Kakavias, D.N. Christodoulou, I. Toumpanou, D.K. Atmatzidis // *Soils and Foundations*. — 2020. — Vol. 60. — pp. 825–839.
32. Pantazopoulos I.A. Performance of microfine cement grouted sands under quick loading conditions / I.A. Pantazopoulos, I.N. Markou, D.K. Atmatzidis. DOI: 10.1007/s40891-021-00255-0 // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. — 2021. — Vol. 7(11).
33. Akbulut S. Estimating the groutability of granular soils: a new approach / S. Akbulut, A. Saglamer // *Tunneling and Underground Space Technology*. — 2002. — Vol. 17(4). — pp. 371–380.
34. Kovacs G. *Seepage Hydraulics* / G. Kovacs. — Budapest.: Elsevier, 1981. — 730 p.
35. Павич М.П. Способ определения несuffозионных гранулометрических составов грунта / М.П. Павич // *Известия ВНИИГ*. — 1961. — Т. 68. — С. 197–202.
36. Пендин В.В. Оценка suffозионной опасности площадки АЭС и её окрестностей / В.В. Пендин, А.С. Гусельцев, И.К. Фоменко, О.В. Зеркаль, О.Н. Сироткина // *Опасные для строительства геологические процессы*. — Москва: Издательство МИСИ-МГСУ. — 2019. — С. 22–29.
37. Буренкова В.В. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязных грунтов тела плотины и основания / В.В. Буренкова, П.М. Буренков // *Природообустройство*. — 2020. — № 4. С. 84–91.
38. Maroof M.A. Particle shape effect on internal instability of cohesionless soils / M.A. Maroof, A. Mahboubi, A. Noorzad // *Proceedings of the 10th International Conference on Scour and Erosion, Arlington, Virginia, USA*. — 2021.
39. Ives K.J. Optical fibre investigations of filtration processes / K.J. Ives, G. Clough. DOI: 10.1016/B978-0-08-032591-0.50016-6 // *Proceedings of the 4th IAWPRC workshop held in Houston and Denver, U.S.A., 27 April — 4 May 1985*. — 1985. — pp. 69–76.

Nevezorov Alexander Leonidovich

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

E-mail: a.l.nevezorov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6547-2741>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=393637

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-2809-2012>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7004203097>

Saenko Yuri Viktorovich

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

E-mail: yuri_saenko@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-014X>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=1066359

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57074076400>

Shiranov Alexey Mikhailovich

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

E-mail: alexeyshiranov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=987147

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57219989831>

Clogging of sands with a suspension of nanoclay waste of the diamond mining industry

Abstract. The article presents results of an experimental study for the water permeability of four types of sands of different composition and genesis modified by clayey waste of diamond ore processing. The modification was carried out by way of pore clogging under filtration of saponite clay suspension with a concentration from 5.8 to 6.3 g/l.

Samples with a diameter of 73 mm and a height of 145 mm were tested in an experimental apparatus including three triaxial chambers and semi-automatic devices for supplying suspension and water. The use of chambers provided a stress-strain state of the samples close to the natural one and eliminated errors due to sidewall leakage inherent in conventional permeameters.

The effect of pore clogging depended on the uniformity coefficient of sand c_u . The hydraulic conductivity of the medium fluvioglacial sand with $c_u = 5.0$ decreased by 12.1–17.7 times as compared to the initial value, and that of the fine alluvial-marine sand with $c_u = 3.5$ decreased by 6.4–10.8 times. The clogging effect of the alluvial and glacial-lacustrine fine sands with the uniformity coefficients of 2.2 and 2.5 was insignificant due to the removal of clay particles by the water flow.

Calcium carbonate was used as a substance causing aggregation of clay particles and ensuring their accumulation in the pores. The clogging of sands while adding 1–3 % of chalk resulted in a decrease in the hydraulic conductivity by 12.5–67.0 times to values of 0.027–0.085 m/day. While adding 5 % of chalk, the hydraulic conductivity of fine alluvial sand decreased by 51.8–71.0 times. In general, a greater effect was observed in less dense sand samples under a suspension filtration rate of at least 3.5 m/day. The removal of clay particles during subsequent water filtration was not observed in any of the samples.

The experiments have shown that the waste of the diamond mining industry, which is a saponite clay suspension of low concentration, can be used to modify sands, for example, in the basement of municipal waste landfills.

Keywords: pore clogging; soil modification; industrial waste; saponite; soil permeability; hydraulic conductivity