

УДК 628.393: 001.891.53

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ШЛАМОХРАНИЛИЩ

Касперов Г.И.*, к.т.н., доцент, Левкевич В.Е.***, к.т.н., доцент,
Пастухов С.М.*, к.т.н., доцент, Кукшинов М.С.***, к.г.н., Бузук А.В.*,
Миканович Д.С.*, Кобяк В.В.****, к.т.н.

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

**Институт экономики Национальной академии наук Беларуси

***Научно-практический центр Минского городского управления МЧС Республики Беларусь

****Научно-исследовательский институт пожарной безопасности
и проблем чрезвычайных ситуаций

e-mail: dmikanovich@list.ru

Проведено лабораторное исследование по определению гранулометрического состава грунта и химический анализ шлама гидротехнических сооружений шламохранилищ ОАО «Беларуськалий». Определен фильтрационный расход и средняя скорость фильтрации, а также коэффициент фильтрации образцов грунта в зависимости от гранулометрического состава и химического состава жидкости. Проведена обработка экспериментальных данных.

Laboratory studies to determine granulometric composition of the soil and chemical analysis of sludge on hydraulic structures of sludge storage tanks «Belaruskali» have been carried out. The average filtration flow and discharge of seepage of soils samples as well as the coefficient of filtration depending on granulometric composition and chemical composition of water has been determined. The processing of experimental data has been performed.

(Поступила в редакцию 30 марта 2015 г.)

Введение. Ежегодно на земном шаре вводится в эксплуатацию несколько сот новых водоемов-хранилищ. Эти сооружения, преобразовывают рельеф местности, на которой размещаются, а по площади и объему, протяженности и глубине сопоставимы с крупнейшими естественными озерами планеты. Дефицит пресной воды уже сейчас становится мировой проблемой. Все более возрастающие потребности промышленности и сельского хозяйства в воде заставляют все страны, ученых мира искать разнообразные средства для решения этой проблемы.

Опыт эксплуатации Старобинского месторождения калийных солей выявил ряд отрицательных последствий деятельности ОАО «Беларуськалий». Это вызвано тем, что объединение является типичным представителем горнорудных предприятий, деятельность которых всегда вызывает существенные изменения структуры природных ландшафтов, и поверхность земли в этих районах в значительной мере меняет свой облик. Это проявляется, прежде всего, в оседании земной поверхности над отработанными подземными выработками и отчуждении больших площадей плодородных земель для хранения отходов обогатительных фабрик [1].

Объединение состоит из четырех рудоуправлений промышленные площадки, которых отстоят друг от друга на расстоянии 10-15 км. Площадь промышленной площадки каждого рудоуправления составляет от 1 до 2 км². Суммарная площадь промплощадок около 6 км². Кроме того, значительные площади заняты для складирования отходов производства (солеотвалы и шламохранилища) – около 16 км².

По данным Института общей и неорганической химии НАН Беларуси, при переработке около 50 млн. тонн сильвинитовой руды ОАО «Беларуськалий» в год образуется более 28 млн. тонн твердых галитовых отходов, складированных на высотных солеотвалах (терриконах) и около 3 млн. м³ глинисто-солевых шламов, направляемых на шламохранилища [2].

В процессе эксплуатации данных гидротехнических сооружений создается угроза возникновения чрезвычайных ситуаций с образованием волн прорыва, катастрофических

затоплений и прорывного паводка. Аварии на гидротехнических сооружениях шламохранилищ отрицательно влияют на нормальную работу многих отраслей промышленности и сельского хозяйства.

Исходя из анализа аварий произошедших в мире на гидротехнических сооружениях шламохранилищ с 1958 года, можно сделать вывод, что их наибольшее количество произошло на земляных дамбах (плотинах), а основными причинами аварий являются переполнение шламохранилища и ошибки при проектировании.

В настоящее время в Республике Беларусь отсутствует методика по оценке вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на гидротехнических сооружениях шламохранилищ, хотя они обладают рядом особенностей и представляют опасность для жизнедеятельности человека. Шламы и технологическая вода содержат в своем составе различные химические вещества, которые способны уменьшать вязкость воды в несколько раз, что будет способствовать достижению фильтрационным потоком критических пределов и может привести к возникновению суффозии в испытуемом грунте. Характерными признаками возникновения суффозионных явлений в грунте являются:

- возникновение местных размывов грунта;
- увеличение интенсивности выноса частиц за пределы испытываемого образца по мере увеличения градиента напора;
- изменение расхода фильтрации;
- деформация образца;
- изменение крупности выносимых из грунта частиц.

Для оценки скорости фильтрации различных жидкостей и проведении исследований фильтрационных свойств песчаных грунтов была разработана методика лабораторных исследований и усовершенствована экспериментальная установка-прибор Дарси.

При проведении исследований по данной тематике были отобраны пробы шлама и грунта на трех шламохранилищах ОАО «Беларуськалий». Пробы грунта отбирались в соответствии с рекомендациями по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость [6]. Химический анализ этих проб, проведенный в «Центральном научно-исследовательском институте комплексного использования водных ресурсов» Республики Беларусь показал, что количество содержащихся в шламе синтетических поверхностно-активных веществ колеблется в пределах от 0,17 до 0,90 мг/дм³ [7].

Лабораторное определение гранулометрического состава. Дополнительно было проведено лабораторное исследование гранулометрического состава проб грунта. Гранулометрический состав песчаного грунта определялся ситовым методом: набор сит с поддоном, сита с размерами отверстий 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1 мм; весы лабораторные по ГОСТ 24104, металлические бюксы по ГОСТ 25336; шкаф сушильный. Результаты для 3-х проб представлены в таблицах 1-3. Гранулометрический состав грунта определяют в соответствии с [3] в зависимости от весового содержания в нем водостойких микроагрегатов различной крупности, выраженных в процентах по отношению к весу сухой пробы грунта, взятой для анализа.

Таблица 1 – Результаты определения гранулометрического состава исследуемых образцов грунта

Проба № 1							
Диаметр ячеек сита, мм	меньше 0,1	0,25	0,5	1,0	2,0	10,0	всего
Масса частиц грунта, г	3,09	68,41	27,87	0,35	0	0	99,72
Относительное весовое содержание, %	3,1	68,6	27,95	0,35	0	0	100
Проба № 2							
Масса частиц грунта, г	2,95	55,69	40,51	0,75	0	0	99,8
Относительное весовое содержание, %	2,96	55,7	40,59	0,75	0	0	100
Проба № 3							
Масса частиц грунта, г	1,64	63,08	34,21	0,95	0	0	99,88
Относительное весовое содержание, %	1,64	63,16	34,25	0,95	0	0	100

Примечание: Как видно из таблицы во всех трех образцах преобладает грунт средней группы крупности.

Таблица 2 – Расчет к построению интегральной кривой гранулометрического состава исследуемых образцов грунта

Проба № 1					
Диаметр ячеек сита, мм	меньше 0,1	0,25	0,5	1,0	больше 2,0
Суммарное содержание частиц, г	3,09	71,5	99,37	99,72	99,72
Проба № 2					
Суммарное содержание частиц, г	2,95	58,64	99,15	99,9	99,9
Проба № 3					
Суммарное содержание частиц, г	1,64	64,72	98,93	99,88	99,88

Таблица 3 – Результаты определения коэффициента неоднородности и среднего диаметра частиц

Номер образца	Коэффициент неоднородности, η	Средний диаметр частиц d_{50}
Образец № 1	1,96	0,2
Образец № 2	2,18	0,23
Образец № 3	1,99	0,22

Порядок определения гранулометрического состава грунта. Сита монтируются в колонку. Их размещают от поддона в порядке увеличения размера отверстий и рассеивая на отдельные фракции. Затем, начиная с крупной фракции, на лабораторных весах с точностью до 0,01 г взвешивают просеянный на ситах грунт.

Из суммарной массы навески определяют содержание каждой фракции по формуле:

$$X = \frac{A \times 100}{B}, \quad (1)$$

где X – процентное содержание фракций в грунте; A – масса фракции; B – масса средней пробы.

При определении содержания частиц грунта производят суммирование с мелкой фракцией, и заканчивают крупной.

Затем по интегральной кривой строится график, по которому определяются коэффициент неоднородности грунта (η) и средневзвешенный диаметр его частиц (d_{50}) (рисунки 2-4).

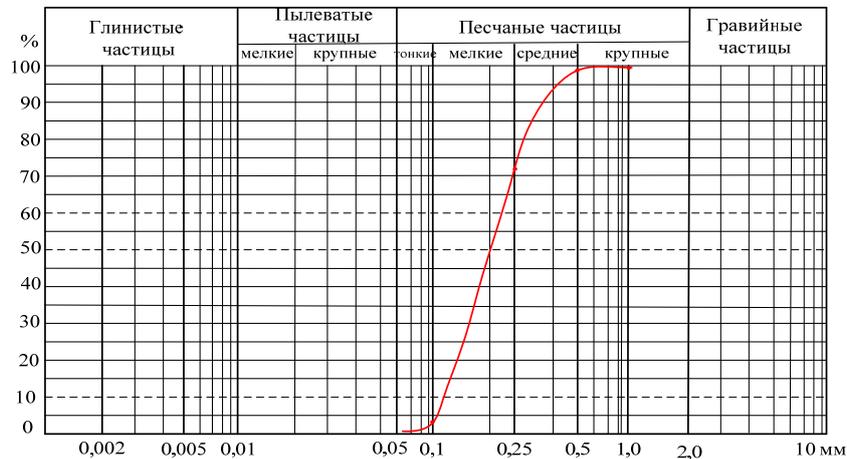


Рисунок 2 – Кривая гранулометрического состава грунта пробы № 1

На графике по оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладываются значения диаметров частиц, а по оси ординат суммарное содержание всех частиц, %, меньше принятых диаметров, начиная с самой мелкой фракции.

Значения d_{60} , d_{50} и d_{10} определяют путем опускания перпендикуляров на ось абсцисс из точек пересечения горизонтальных линий, соответствующих суммарному содержанию фракций 60, 50 и 10% с кривой гранулометрического состава.

Коэффициент неоднородности грунта (η) по кривой гранулометрического состава является отношение диаметра частиц, процентное содержание которых в грунте менее 60 %, к диаметру частиц, с процентным содержанием в грунте меньше 10 % [3].

$$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (2)$$

где: d_{60} – диаметр частиц, меньше которого в данном грунте содержится (по массе) 60 % частиц, мм; d_{10} – то же 10 % частиц, мм (величина d_{10} называется еще действующим или эффективным диаметром).

Грунт считается однородным если коэффициент однородности равен $\eta < 3$ и неоднородным при $\eta \geq 3$. Однородность грунта способна влиять на скорость фильтрации жидкости, в связи с тем, что чем меньше в грунте пылевидных частиц и глинистых примесей, тем больше коэффициент фильтрации.

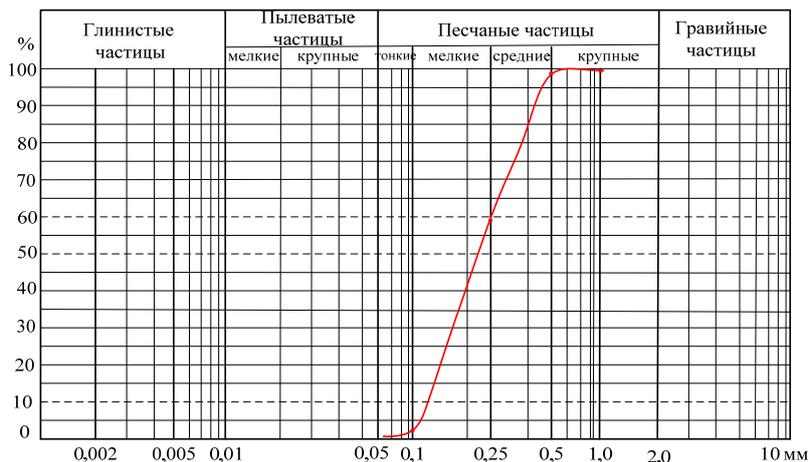


Рисунок 3 – Кривая гранулометрического состава грунта пробы № 2

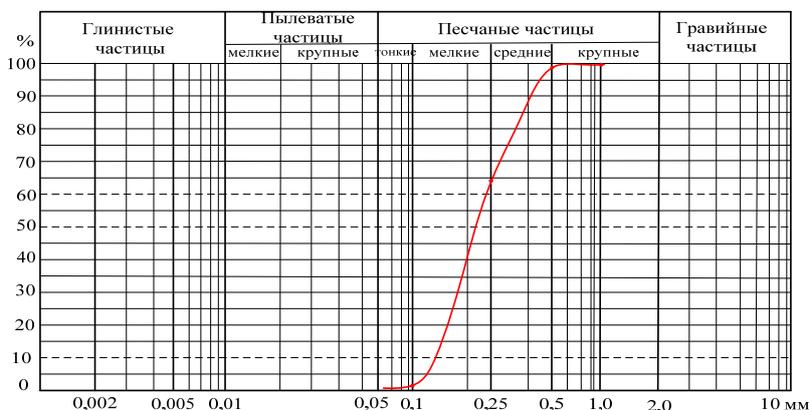


Рисунок 4 – Кривая гранулометрического состава грунта пробы № 3



1 – вертикальная колонка прямоугольного сечения; мерный сосуд; 2 – кран для регулирования фильтрационного расхода; 3 – металлическая решетка; 4 – дно экспериментальной установки; a, b, c, d – пьезометры

Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки

Для определения фильтрационного расхода и средней скорости фильтрации, а также коэффициента фильтрации для каждого образца была доработана и изготовлена экспериментальная установка (рисунок 5).

В ходе экспериментальных исследований было проведено три серии однотипных опытов. При проведении экспериментов использовались пробы песчаного грунта и три различные жидкости: вода, шлам, вода с поверхностно-активными веществами (ПАВ). В качестве поверхностно-активных веществ мы использовали полиакриламид, в связи с тем, что именно это вещество используется при производстве калийных удобрений (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты эксперимента

№ опыта	Количество профильтрованной воды $W, \text{см}^3$	Вода		Шлам		Вода с ПАВ	
		Время $t, \text{с}$	Скорость фильтрации см/с	Время $t, \text{с}$	Скорость фильтрации см/с	Время $t, \text{с}$	Скорость фильтрации см/с
1	500	19,35	0,0382	17,25	0,0429	13,85	0,0534
2	500	19,45	0,0380	17,45	0,0424	13,9	0,0532
3	500	19,35	0,0382	17,55	0,0421	13,95	0,0530
4	500	19,25	0,0384	17,5	0,0423	13,85	0,0534
5	500	19,2	0,0385	17,3	0,0428	13,95	0,0530
6	500	19,1	0,0387	17,35	0,0426	13,95	0,0530

Исходя из полученных результатов эксперимента, можно сделать вывод, что скорость фильтрации растворов полиакриламида и шлама существенно больше скорости фильтрации воды.

Обработка результатов экспериментальных данных проводилась в соответствии с [4]. Относительная погрешность измерения времени фильтрации определялась по формуле:

$$\delta_h = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Результат измерения записывался в следующем виде:

$$\delta_h = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100\%. \quad (4)$$

При экспериментальном исследовании времени фильтрации проводилось по 6 измерений для каждого образца грунта. Результаты измерений и обработки полученных данных по каждому образцу приведены в таблицах 5-7.

Таблица 5 – Результаты обработки экспериментальных данных по определению времени фильтрации воды через пробу № 1

№ опыта	\bar{h}_n	$\Delta h / \delta_h$	h
1	19,30	0,1 / 0,52	19,3±0,1
2	19,88	0,09 / 0,47	19,88±0,09
3	20,83	0,12 / 0,58	20,83±0,12
4	20,39	0,09 / 0,42	20,39±0,09
5	19,91	0,09 / 0,43	19,91±0,09
6	19,87	0,11 / 0,57	19,87±0,11

Таблица 6 – Результаты обработки экспериментальных данных по определению времени фильтрации шлама через пробу № 1

№ опыта	\bar{h}_n	$\Delta h / \delta_h$	h
1	17,40	0,12 / 0,68	17,4±0,12
2	18,37	0,07 / 0,37	18,37±0,07
3	17,37	0,09 / 0,5	17,37±0,09
4	17,41	0,06 / 0,34	17,41±0,06
5	18,27	0,08 / 0,41	18,27±0,08
6	17,76	0,15 / 0,86	17,76±0,15

Таблица 7 – Результаты обработки экспериментальных данных по определению времени фильтрации раствора полиакриламида через образец № 1

№ опыта	\bar{h}_n	Δ_h / δ_h	h
1	13,91	0,05 / 0,007	13,91±0,05
2	13,99	0,09 / 0,025	13,99±0,09
3	14,08	0,04 / 0,005	14,08±0,04
4	14,15	0,12 / 0,043	14,15±0,12
5	14,22	0,05 / 0,008	14,22±0,05
6	14,04	0,11 / 0,033	14,04±0,11

Как видно из таблиц 5-7 пределы относительной погрешности измерений составляют не более 15%.

Вывод. Таким образом, можно сделать вывод, что скорость и коэффициент фильтрации жидкости будут зависеть от ее температуры и химического состава. Химические вещества, находящиеся в жидкости, способны увеличивать скорость фильтрации в несколько раз, что в свою очередь способно вызвать более интенсивный вынос грунта из тела гидротехнического сооружения. Это обстоятельство будет способствовать увеличению вероятности достижения гидротехническим сооружением критических пределов фильтрации и может вызвать его разрушение, а также привести к возникновению чрезвычайной ситуации. Для более эффективного прогнозирования чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях шламохранилищ необходимо разработка методики, которая будет учитывать все особенности данных сооружений. Ярким примером и подтверждением экспериментальных данных является авария, которая произошла в г. Качканар (Российская Федерация) 2 ноября 1999 г. на горно-обогатительном комбинате. В следствии увеличения скорости фильтрации произошло разрушение тела плотины шламохранилища. В результате чего в реку Выя вылилось более 12 млн. кубометров воды. В деревне Елкино была нарушена телефонная связь. В результате аварии был подмыт мост, находящийся на практически единственной дороге, соединяющей Екатеринбург, Нижнюю Туру и Качканар. Сумма ущерба комбината составила 207 миллионов рублей, 23 миллиона составил ущерб экономики городов Качканар, Нижняя Тура и Лесной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоров, Н.Н. Методы оценки технического состояния ограждающих дамб шламохранилищ калийного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Н.Н. Прохоров. – Минск, 2009. – 20 с.
2. Лиштван, И.И., Парфенок, В.И., Лучков, А.И. Экологические проблемы в Белоруссии и пути их научного решения. Экологические проблемы в Белоруссии. 2001 г. – с.111-116.
3. ГОСТ 12536-79 Грунты, методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава – Москва, 1979 – 29 с.
4. ГОСТ 8.207-76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений – Москва, 1976 – 18 с.
5. Бонч-Осмоловская, Н.Е, Механика жидкости и газа. Лабораторный практикум: [учебное пособие/ Н.Е. Бонч-Осмоловская и др.], под ред. И.В. Качанова и В.Н. Юхновца. – 4-е изд., перераб. и доп. – Мн.: БНТУ, 2006. – 299 с.
6. П 12-83 Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. – Ленинград, 1983 – 38 с.
7. Протокол испытаний природных и сточных вод № 8-В/13 / РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов» (РУП «ЦНИИКИВР») – Минск 2013.
8. Битюрин, А.К. Фильтрация воды в гидротехнических сооружениях. Часть I. Методические указания. – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит.-строительный университет, 2011 – 22 с.