

УДК 627.8.059.22::712.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ОГРАЖДАЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ ШЛАМОХРАНИЛИЩ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ПРИСТЕННОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Миканович Д.С., Ласута Г.Ф.

Установлена эмпирическая закономерность зависимости коэффициентов фильтрации песчаных грунтов от содержания в шламе полиакриламида в концентрации 0,17–0,90 мг/дм³ (эффект пристенного скольжения). Определен коэффициент фильтрации для грунтов ограждающих сооружений шламохранилищ Республики Беларусь с учетом присутствия в фильтрующемся шламе полиакриламида. Подтверждено результатами экспериментальных исследований и натуральных наблюдений превышение скорости фильтрации шлама 0,045–0,047 см/с над скоростью фильтрации воды в 1,2–1,4 раза.

Ключевые слова: шламохранилище, гидродинамическая авария, поверхностно-активное вещество, подпорное сооружение, шлам, эффект пристенного скольжения, вязкость, критическая скорость фильтрации, полиакриламид.

(Поступила в редакцию 19 апреля 2019 г.)

Введение. За 1968–2018 гг. в мире зарегистрировано более 100 аварий на гидротехнических сооружениях шламохранилищ. Наиболее известная из них – авария 4 октября 2010 г. на крупном глиноземном комбинате производственной компании MAL Zrt (Ajkaí Timfoldgyar Zrt) в 160 км западнее Будапешта, в результате которой произошло разрушение бетонных стен, из хранилища вылилось около 1,1 млн м³ красного шлама, представляющего собой нерастворимый осадок, образующийся при производстве глинозема, содержащий щелочь и тяжелые металлы. Авария привела к гибели 7 человек, 10 получили ожоги, пострадали порядка 160, 390 были временно переселены, около 5 тыс. готовились к эвакуации. На территории, подверженной разрушению, в трех областях был введен режим чрезвычайного положения, существовала опасность попадания ядовитых веществ в воды Дуная [1].

В Республике Беларусь имеется более 60 сооружений шламохранилищ, однако специальные исследования в области оценки состояния и устойчивости данных сооружений с прогнозированием возможных чрезвычайных ситуаций на них и определением вероятности возникновения гидродинамических аварий до настоящего времени не проводились. Поэтому данный аспект стал причиной нашего внимания. В ходе наших исследований было запланировано два этапа: 1) натурные обследования напорных ограждающих дамб шламохранилищ с определением коэффициента фильтрации песчаных грунтов в зависимости от содержания в шламе поверхностно-активных веществ; 2) лабораторное изучение водопроницаемости и суффозионной устойчивости грунтов, применяемых при строительстве дамб на шламохранилищах.

Следует отметить, что в нормативной и научной литературе недостаточно внимания уделяется вопросам безопасной эксплуатации сооружений шламохранилищ, хотя они обладают рядом особенностей и представляют опасность для жизнедеятельности человека. Шламы содержат в своем составе поверхностно-активные вещества, и в частности полиакриламид. Данные примеси способны изменять реологические свойства жидкости и тем самым влиять на развитие процессов деформации сооружений шламохранилищ. Наличие в шламе различных химических веществ способствует увеличению скорости фильтрации, что может привести к тяжелым экономическим и экологическим последствиям при чрезвычайной ситуации на гидротехнических сооружениях шламохранилищ Республики Беларусь.

Основная часть. При проведении лабораторных исследований коэффициента и скорости фильтрации жидкости в зависимости от содержания в ней поверхностно-активных веществ были определены следующие параметры фильтрационного потока:

- фильтрационный расход и средняя скорость фильтрации;
- потенциальные напоры на каждом участке;
- потери напора на каждом участке;
- средние потери напора и средний гидравлический уклон на каждом участке;
- критическая и действительная скорость фильтрации;
- коэффициент фильтрации для каждого образца жидкости.

При проведении фильтрационных исследований весьма актуальной является проблема оценки способности грунтов отдавать или вмещать воду и оценка вязкости фильтрующейся жидкости. Коэффициент фильтрации определяется в фильтрационных колоннах. Высота образца грунта в опытах составляет до 1 м. Для более полного удаления воздуха из водонасыщенного образца грунт загружается на увлажненную поверхность послойно. В целях обеспечения пористости грунтов, близкой к природной, уложенный грунт равномерно уплотняется. Исследуемые грунты доводятся до полного насыщения путем подпитывания сверху вниз.

С целью оценки влияния температуры на процессы фильтрации были проведены исследования вязкости образцов шлама в зависимости от изменения температуры (5–35 °С). Проводилось измерение вязкости воды в данном диапазоне температур тем же способом для сравнения и оценки результатов исследований.

Для определения вязкости образцов шлама и воды использовали вискозиметр капиллярный стеклянный ВПЖ-1, соответствующий ГОСТ 10028-81 [2]. Перед началом использования прибор подготавливали согласно инструкции.

Измерение вязкости образцов шлама проводили при семи различных температурах: 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 °С. Для этого термостат с погруженным в него вискозиметром с исследуемой жидкостью выдерживали при заданной температуре не менее 15 минут, после чего производили измерение вязкости шлама. Измерение времени проводилось с помощью измерителя темпа электронного «Электроника ИТ-01».

Кинематическую вязкость определяли по формуле

$$\eta = \frac{g\tau K}{9,807}, \quad (1)$$

где K – постоянная вискозиметра $0,03118 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$; τ – время истечения жидкости в секундах; g – ускорение свободного падения в месте измерения $\text{м}/\text{с}^2$.

Для каждого образца измерение времени истечения проводили семь раз, после чего находили среднее значение и определяли кинематическую вязкость шлама и воды. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Вязкость шлама в зависимости от температуры

t, °С	Кинематическая вязкость шлама (изм.), $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Кинематическая вязкость воды (изм.), $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Кинематическая вязкость воды (справоч.), $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
5	1,471	1,525	1,519
10	1,345	1,321	1,307
15	1,217	1,154	1,140
20	1,171	1,012	1,004
25	1,095	0,903	0,894
30	0,971	0,817	0,802
35	0,890	0,740	0,725

В результате исследований было установлено, что кинематическая вязкость шлама больше кинематической вязкости воды в среднем на 15–20 %, однако она незначительно меняется с изменением температуры жидкого шлама. Данный факт объясняется наличием в

шламе большого количества примесей, таких как калийная соль и ее составляющие, в концентрациях до 338 мг/дм³ (рис. 1) [3].

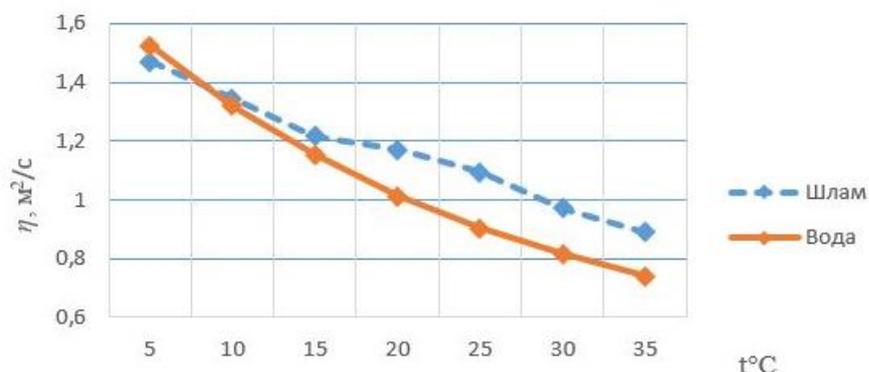


Рисунок 1. – Зависимость вязкости шлама и воды от температуры, Беларусь, 2019 г.

С целью определения качественных характеристик грунтов, используемых при строительстве ограждающих конструкций сооружений шламохранилищ, проводилась оценка их гранулометрического состава.

Гранулометрический состав песчаного грунта определялся ситовым методом в соответствии с [4] в зависимости от весового содержания в нем водостойких микроагрегатов различной крупности, выраженных в процентах по отношению к весу сухой пробы грунта, взятой для анализа.

В результате выполненных исследований было установлено, что на шламохранилищах Республики Беларусь наиболее часто встречается среднезернистый однородный грунт с коэффициентом неоднородности $\eta = 1,96-2,18$. Точность измерений определяется точностью лабораторных весов и составляет 0,01 г.

Для определения фильтрационного расхода и средней скорости фильтрации, а также коэффициента фильтрации для каждого образца была изготовлена экспериментальная установка (рис. 2).



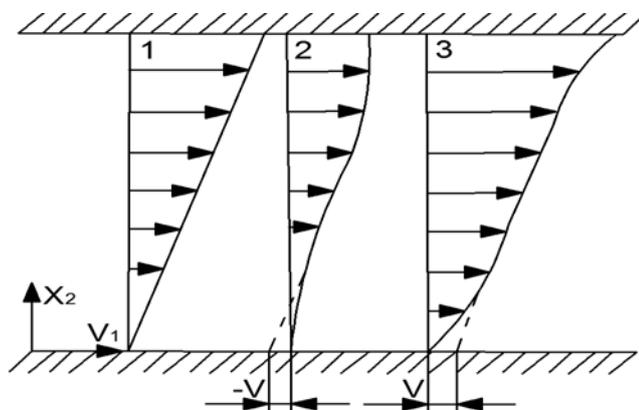
1 – вертикальная колонка прямоугольного сечения;
2 – кран для регулирования фильтрационного расхода; 3 – металлическая решетка;
4 – дно экспериментальной установки; a, b, c, d – пьезометры

Рисунок 2. – Схема экспериментальной установки, Беларусь, 2016 г.

При проведении исследований подготовлены три пробы грунта, вода и шлам (шламохранилища второго рудоуправления ОАО «Беларуськалий»). Грунт был уложен в колонку прямоугольного сечения 1 на высоту 0,9 м. По трубке 2 из водонапорного бака в колонку 1 с испытуемым грунтом подавалась жидкость, и проводилась проверка работы пьезо-

метров a , b , c , d . После установления неизменного во времени положения уровня воды в пьезометрах при фильтрации воды через грунт проводились измерения расхода объемным способом при помощи мерного сосуда и секундомера. В ходе экспериментальных исследований по определению коэффициента фильтрации проведены три серии однотипных опытов, по 6 измерений для каждого образца грунта.

Анализ результатов исследований показал, что скорость фильтрации шлама больше скорости фильтрации воды в среднем в 1,2–1,4 раза, хотя кинематическая вязкость шлама больше кинематической вязкости воды в среднем на 15–20 %. Данный феномен объясняется возникновением эффекта пристенного скольжения [5, 8] вследствие присутствия в жидкости полиакриламида. В результате возникновения данного эффекта поведение шлама в непосредственной близости от стенок отличается от поведения в глубине объема. Пристенный слой, в котором возникает эффект, – очень тонкий, порядка 10–100 мкм, но результирующий макроскопический эффект приводит к увеличению скорости фильтрации за счет возникновения скольжения объема жидкости по нему (рис. 3 [5]).



$t = \text{const}$; V – кажущаяся скорость скольжения, м/с; 1 – без пристенного эффекта, $V = 0$;
2 – отрицательное скольжение, $V < 0$; 3 – положительное скольжение, $V > 0$

Рисунок 3. – Кажущееся скольжение при условиях простого сдвигового течения

«Существует ряд параметров макроскопического или феноменологического характера, пространственное изменение которых может быть связано с появлением механических пристенных эффектов (концентрация диспергированной фазы, вязкость, микрореологические параметры, описывающие упорядоченность и прочность гелевой структуры). Можно представить себе совокупность физических факторов, ответственных за такие локальные пристенные градиенты (ограничение степеней свободы осредненного и броуновского движения микродисперсных частиц, влияние электрического двойного слоя, хемосорбция диспергированной фазы на активных центрах поверхности). Однако ни одно из имеющихся микрореологических или термодинамических предположений до сих пор не способствовало успешному описанию экспериментально наблюдаемых пристенных эффектов» [5].

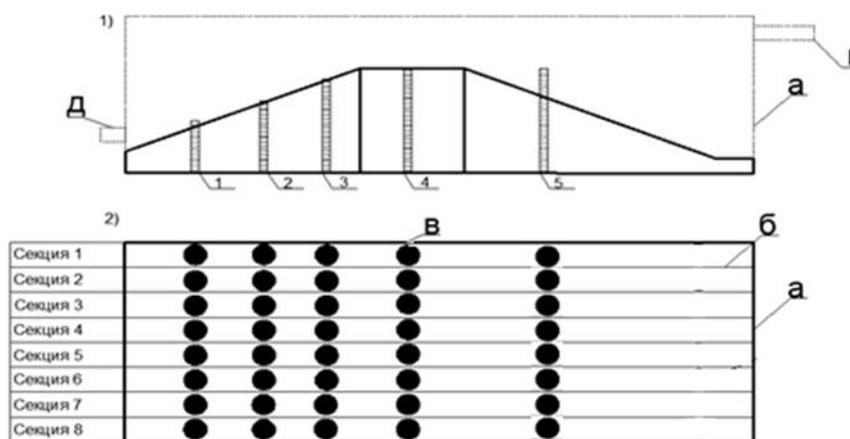
Нами изучена зависимость скорости и коэффициента фильтрации от концентрации в жидкости ПАВ. Скорость фильтрации для проб шлама с содержанием поверхностно-активных веществ в концентрации 0,17 мг/дм³ меньше скорости фильтрации для проб шлама с содержанием поверхностно-активных веществ в концентрации 0,9 мг/дм³ в среднем в 1,9 раза. Установлена зависимость скорости фильтрации от коэффициента неоднородности грунта: чем выше однородность грунта, тем меньше скорость фильтрации.

Определено, что коэффициент фильтрации жидкости будет зависеть от концентрации в ней ПАВ. 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 способствует увеличению вероятности достижения откосом сооружения критических градиентов

фильтрации и может вызвать его разрушение, а также привести к возникновению чрезвычайной ситуации. Следует отметить, что скорость фильтрации шлама через грунт средней группы крупности приближается к критическим значениям предела его размываемости ($V = 0,05$ см/с) [6].

Целью дальнейших экспериментальных исследований явилось определение фильтрационного расхода в моделях плотин различного конструктивного исполнения: установление закономерностей движения фильтрационного потока, положения депрессионной кривой, удельного фильтрационного расхода и коэффициента фильтрации грунта тела дамбы при фильтрации шлама с учетом возникновения эффекта пристенного скольжения для практического применения полученных данных при определении критической скорости фильтрации и аварийного режима эксплуатации тестовых шламохранилищ ОАО «Беларуськалий».

Исследования проводились в фильтрационном лотке $2,9 \times 1,2 \times 0,85$ м, разделенном на 6 секций с помощью герметичных перегородок, не допускающих гидравлической связи потока секций. Водоупором для моделей служило днище лотка. В лотке одновременно устанавливались модели земляных дамб: с ядром, с ядром и экраном, однородной, с наружным дренажем, с экраном, с понуром. Модели имели следующие размеры: высота – 0,4 м; ширина по гребню – 0,25 м; заложение низового откоса – 1:2, верхового откоса – 1:3 (масштаб 1:250 от тестовых объектов). Низовой откос дамбы поочередно устраивался с низовой призмой, без низовой призмы и с каналом (в зависимости от условий опыта). Для измерения уровня воды (шлама) в дамбе устанавливались трубчатые пьезометры в количестве 5 шт., выведенные на общий щиток (рис. 4). Пьезометры в секциях 1 и 2 устанавливались за ядром и ядром с понуром соответственно. Пьезометры изготавливались из поливинилхлоридных трубок диаметром 10 мм. Для сброса и измерения профильтровавшейся воды (шлама) в нижнем бьефе в стенке лотка на уровне дна имелось отверстие с водоотводящей трубкой. Для измерения пьезометрической высоты депрессионной кривой вдоль оси лотка в основании плотины было установлено 5 пьезометров для каждой модели плотин. Точность измерения отметки уровней воды при помощи пьезометра составляла 0,5 мм.



1 – поперечный разрез; 2 – план размещения пьезометров;

а – корпус лотка; б – внутренние перегородки; в (1, 2, 3, 4, 5) – пьезометры;

г – трубка для поддержания постоянного уровня в верхнем бьефе; д – сливная воронка

Рисунок 4. – Схема экспериментальной установки – фильтрационного лотка, Беларусь, 2017 г.

Схема эксперимента. Определялось положение кривой депрессии при различных уровнях жидкости в верхнем бьефе. Для этого модели после их изготовления замачивались путем медленного подъема уровня воды (шлама) в лотке до отметки 0,324 м (максимальный уровень тестовых объектов с учетом масштаба). После этого подача жидкости в лоток осуществлялась в объеме, компенсирующем потери на фильтрацию. После установления неизменного режима фильтрации жидкости через тело дамбы проводилось измерение

уровня в пьезометрах и фильтрационного расхода. Затем путем уменьшения расхода уровень жидкости в верхнем бьефе опускался на 0,04 м, и эксперимент повторялся. Таким образом, для каждой модели фиксировались элементы фильтрационного потока для различных отметок уровней верхнего бьефа: 0,324; 0,284; 0,244; 0,204 и 0,164 м. Уровень 0,164 м является максимальным для сработки тестовых шламохранилищ с учетом масштаба. Погрешность измерений составляет 0,5 мм.

Анализ результатов экспериментов состоял в сравнении кривых депрессии, полученных в результате фильтрации воды и шлама через тело дамбы при различных уровнях напора верхнего бьефа (рис. 5), а также определении коэффициентов фильтрации K_f песчаных грунтов при фильтрации шлама.

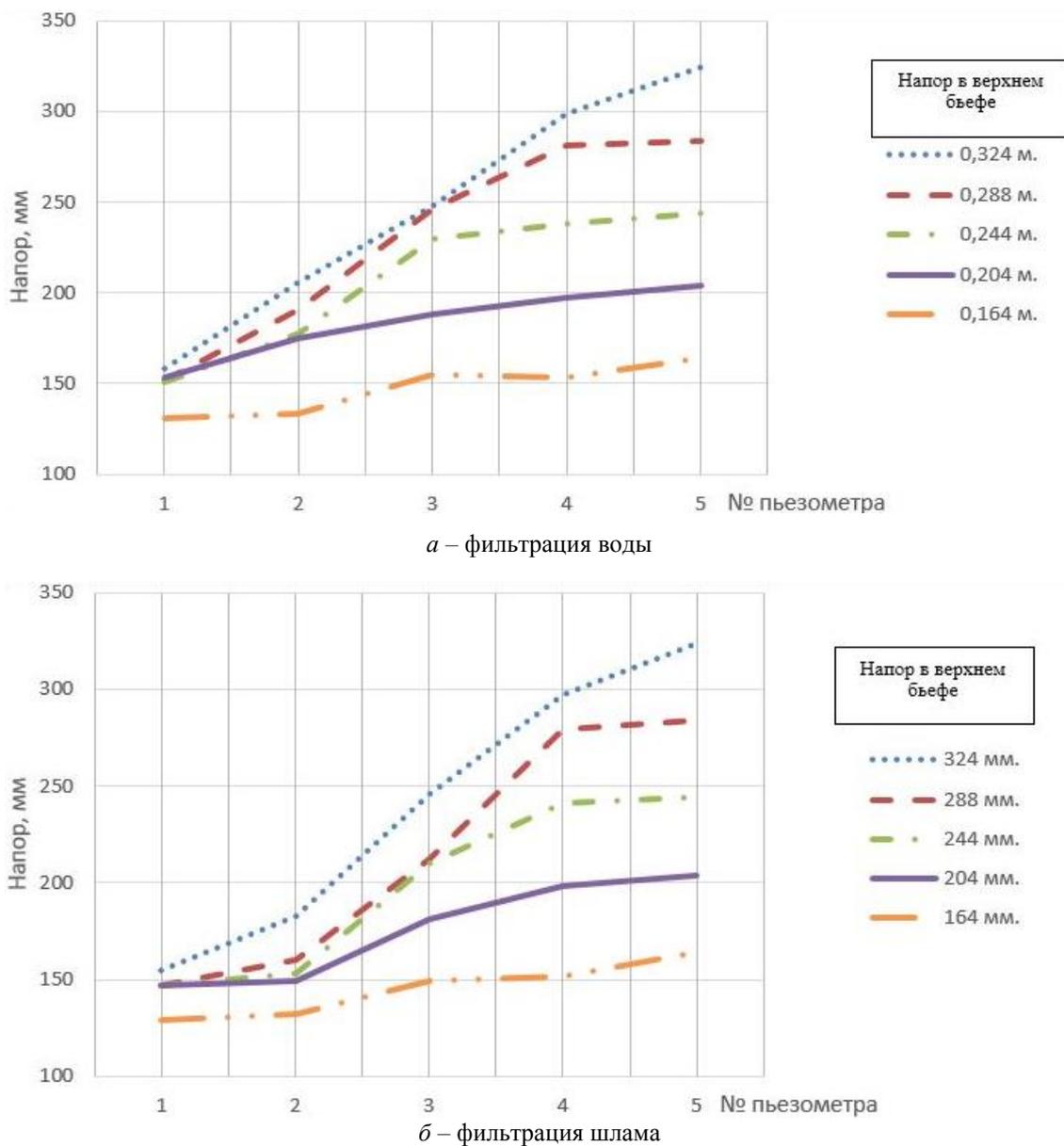


Рисунок 5. – Кривые депрессии для однородной дамбы с низовой призмой

При проведении дальнейших исследований установлена зависимость полученных коэффициентов фильтрации шлама от температуры фильтрующейся жидкости. Для этого вычислялась и учитывалась температурная поправка по формуле Пуазёйля (2). Граничным условием применения данной поправки является ламинарное течение фильтрующейся жидкости (условие соблюдалось при проведении экспериментальных исследований):

$$ТП = 1 + 0,0337T + 0,000221T^2, \quad (2)$$

где $ТП$ – температурная поправка; T – температура во время опыта.

Далее проводился пересчет коэффициента фильтрации, полученного при температуре 20 °С для различных температур: 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 °С с учетом поправки Пуазейля, использовалась зависимость:

$$ТП k_{иск} = \frac{kТП_{иск}}{ТП_{факт}}, \quad (3)$$

где $k_{иск}$ – коэффициент фильтрации, приведенный к искомой температуре; k – коэффициент фильтрации, найденный при фактической температуре – 20 °С; $ТП_{иск}$ и $ТП_{факт}$ – температурные поправки, вычисленные соответственно при искомой температуре $T_{иск}$ и фактической температуре $T_{факт}$ во время опыта (рис. 6).

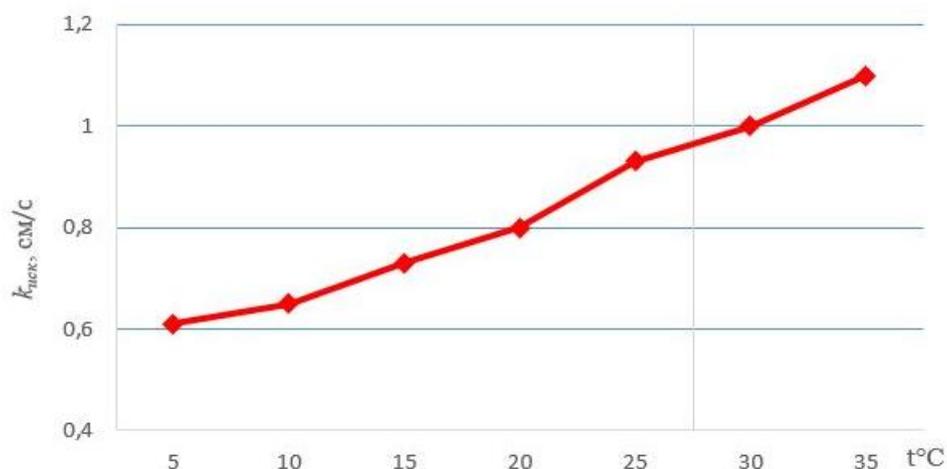


Рисунок 6. – Зависимость коэффициента фильтрации от температуры

В результате исследований было установлено, что коэффициент фильтрации для различных грунтов изменяется в зависимости от температуры от 5 до 35 °С в пределах 40 %.

В ходе дальнейших исследований проводилась оценка влияния сезонности (зима, весна, лето, осень) на коэффициент фильтрации грунтов ограждающих сооружений шламохранилищ калийного производства Республики Беларусь для уточнения прогнозных расчетов возникновения чрезвычайных ситуаций. Основные шламохранилища калийного производства сосредоточены в Солигорском промышленном районе, поэтому при исследованиях использовали данные этой области по среднемесячной температуре воздуха, почвы и воды, а также глубине промерзания почвы (табл. 2) и среднемесячной температуре почвы на различных глубинах по вытяжным термометрам (табл. 3) [9].

С учетом того, что на дамбах сооружений шламохранилищ калийного производства фильтрация протекает в ламинарном режиме, для оценки зависимости коэффициента фильтрации от коэффициента проницаемости грунта использовали следующую формулу:

$$ТП k_{\phi} = \frac{k_{п} \rho_w}{\eta}, \quad (4)$$

где k_{ϕ} – коэффициент фильтрации; $k_{п}$ – коэффициент проницаемости грунта, Д (Дарси $\sim 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$); ρ_w – плотность жидкости, г/см³; η – вязкость воды, мПа·с.

Таблица 2. – Среднемесячная температура воздуха, воды и почвы в Солигорском промышленном районе

Месяц	Среднемесячная температура воздуха, °С	Среднемесячная температура воды, °С	Среднемесячная температура поверхности почвы, °С	Глубина промерзания почвы, м
Январь	-4,5	1,5	-5	0,59
Февраль	-4,3	2,3	-5	0,70
Март	0,2	4,9	0	–
Апрель	7,5	10,3	8	–
Май	13,5	16,1	16	–
Июнь	16,3	18,6	20	–
Июль	18,3	21,7	21	–
Август	17,5	19,6	20	–
Сентябрь	12,2	16,5	13	–
Октябрь	6,8	8,1	7	–
Ноябрь	1,0	5,4	1	0,07
Декабрь	-3,2	1,2	-4	0,23

Таблица 3. – Среднемесячная температура почвы в Солигорском промышленном районе на различных глубинах по вытяжным термометрам

Месяц	Глубина, м				
	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2
Январь	0,3	0,9	1,8	3,5	6,4
Февраль	0,2	0,6	1,3	2,7	5,3
Март	1,1	1,2	1,5	2,5	4,6
Апрель	6,6	5,9	5,1	4,2	4,6
Май	13,3	12,2	10,6	8,3	6,3
Июнь	17,4	16,2	14,6	12,0	8,8
Июль	19,5	18,5	17,1	14,6	10,9
Август	18,7	18,2	17,4	15,8	12,5
Сентябрь	14,1	14,3	14,4	14,4	12,9
Октябрь	8,7	9,4	10,3	11,5	12,0
Ноябрь	3,7	4,6	5,9	7,9	10,1
Декабрь	1,1	1,9	3,1	5,2	8,0

Далее с учетом полученных данных о влиянии температуры шлама на коэффициент фильтрации песчаных грунтов (рис. 6), исследований о вязкости шлама с изменением температуры (рис. 1), среднемесячной температуре воздуха, почвы и воды, глубине промерзания почвы и формулы (4) были получены зависимости коэффициента фильтрации грунта от сезонности (зима, весна, лето, осень). В результате проведенных исследований установлено, что изменение коэффициента фильтрации по сезонам года не превышает 20–30 % (рис. 7). Это связано с особенностями шлама и технологического процесса на шламохранилищах калийного производства. Забор с обогатительной фабрики отстоявшегося шлама и подача его в сооружения в объеме до 30 м³ осуществляется 1 раз в 2–3 дня. В результате этого температура жидкой фазы в зимнее время выше температуры воды в водоемах данной местности и более стабильна в течение года. Глубина промерзания грунта на сооружениях шламохранилищ на 0,1–0,15 м меньше глубины промерзания почв для данной местности в связи с накоплением солей.

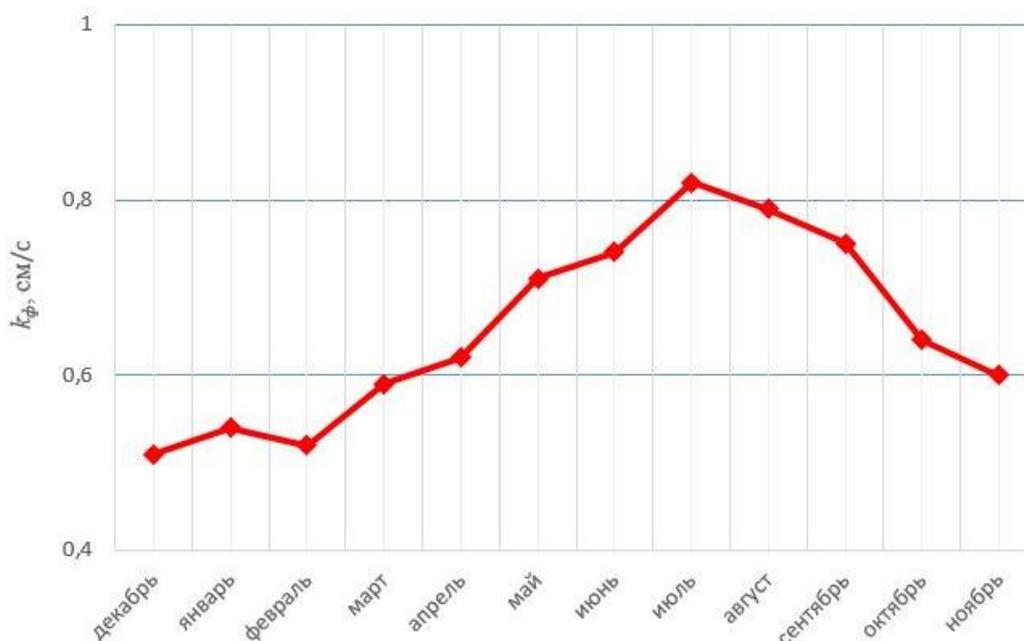


Рисунок 7. – Зависимость коэффициента фильтрации шлама от сезона

Объектом дальнейших исследований стала критическая скорость фильтрации шлама для каждой модели земляной дамбы. В связи с тем, что эмпирические расчетные формулы имеют узкие пределы применимости, их использование нецелесообразно [7, с. 200–264; 320–385]. Поэтому определение критической скорости фильтрации проводилось нами экспериментальным путем. Поднимался уровень верхнего бьефа во всех опытных моделях плотин до тех пор, пока не происходило нарушение ламинарного режима фильтрации и не возникал критический вынос грунта при фильтрации шлама из тела дамбы. При создании данных условий производились измерения пьезометрического уровня и определение критической скорости фильтрации (табл. 4).

Таблица 4. – Критическая скорость фильтрации для дамб различного исполнения

Модель земляной плотины	Скорость фильтрации, см/мин
1. Однородная земляная дамба	0,63
2. Земляная дамба с ядром	1,57
3. Земляная дамба с экраном	1,93
4. Земляная дамба с понуром	2,69
5. Земляная дамба с наружным дренажем	0,74
6. Земляная дамба с ядром и экраном	4,18

Проведенные исследования показали, что фильтрационный расход и коэффициент фильтрации шлама по сравнению с водой увеличивается от 25 до 45 %. Это подтверждает возникновение при фильтрации эффекта пристенного скольжения. Установлено, что при небольших напорах в верхнем бьефе положения кривой депрессии для воды и шлама существенно не отличаются. Однако с увеличением напора в верхнем бьефе наблюдается различие положения кривой депрессии для шлама по сравнению с водой (увеличивается скорость и коэффициент фильтрации) для всех моделей экспериментальных земляных дамб. Эффект пристенного скольжения способствует достижению фильтрационным потоком критических значений градиентов при выходе на низовой откос, что приводит к увеличению вероятности возникновения гидродинамических аварий на сооружениях шламохранилищ, разрушению ограждающих конструкций данного типа сооружений. Установлена критическая скорость фильтрации для дамб различного исполнения, и на ее основании сделан вывод, что оптимальной конструкцией является профиль земляной дамбы с ядром или зем-

ляной дамбы с экраном как наиболее устойчивых к процессам фильтрации, а также менее сложных и более технологичных при строительстве.

Заключение. В результате выполнения исследований по оценке влияния химического состава шлама на фильтрационные свойства грунтов ограждающих сооружений шламохранилищ были получены следующие результаты:

– в результате анализа проб грунта и шлама, отобранных на шламохранилищах второго рудоуправления ОАО «Беларуськалий», установлено, что грунт, образующий тело ограждающих дамб, относится к средней группе крупности, а количество содержащихся в шламе синтетических поверхностно-активных веществ колеблется в пределах 0,17–0,90 мг/дм³;

– в результате исследований кинематической вязкости шлама было установлено, что она больше кинематической вязкости воды в среднем на 30–35 %;

– определено, что кинематическая вязкость шлама меняется в пределах 35 % с изменением температуры в пределах 5–35 °С. Данный факт объясняется наличием в шламе большого количества примесей, таких как калийная соль и ее составляющие, в концентрациях до 338 мг/дм³;

– в результате выполненных исследований по определению скорости фильтрации шлама было обнаружено возникновение эффекта пристенного скольжения. Возникновение данного эффекта способствует увеличению скорости фильтрации шлама в сравнении с водой в среднем в 1,2–1,4 раза, хотя кинематическая вязкость шлама больше кинематической вязкости воды на 15–20 %;

– в результате проведенных лабораторных исследований процесса безнапорной фильтрации в теле ограждающих сооружений шламохранилищ была установлена критическая скорость фильтрации для дамб различного исполнения. На ее основании определено, что оптимальной конструкцией дамбы на шламохранилищах является профиль земляной дамбы с ядром или земляной дамбы с экраном, поскольку они наиболее устойчивы к процессам фильтрации, а также менее сложны и более технологичны при строительстве;

– установлено, что коэффициент фильтрации для различных грунтов изменяется в зависимости от температуры от 5 до 35 °С в пределах 40 %. Это способствует возникновению чрезвычайных ситуаций на сооружениях шламохранилищ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Из-за катастрофы в Венгрии в Украине начинается внеплановая проверка двух крупных заводов [Электронный ресурс]. – Киев, 2010. – Режим доступа: [http:// dozor.kharkov.ua/zhizn](http://dozor.kharkov.ua/zhizn). – Дата доступа: 15.03.2010.
2. Вискозиметры капиллярные стеклянные. Технические условия (с изменениями № 1, 2): ГОСТ 10028-81 – Введ. 01.01.83. – М.: Межгос. стандарт, 2005. – 31 с.
3. Протокол испытаний природных и сточных вод № 8-В/13 / Центр. науч.-исслед. ин-т комплексного использования водных ресурсов. – Минск: ЦНИИКИВР, 2013. – 1 с.
4. Грунты, методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: ГОСТ 12536–79. – Введ. 20.04.80.– М., 1979. – 39 с.
5. Астарита, Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Дж. Астарита, Дж. Марруччи. – М.: Мир, 1978. – 230 с.
6. Справочник по гидротехнике. – М.: Гос. изд. лит. по строительству и архитектуре, 1955. – 901 с.
7. Арзуманов, Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях / Э.С. Арзуманов [и др.]. – М.: Энергия, 1978. – 385 с.
8. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 311 с.
9. Мельников, В.И. Справочник по климату Беларуси / В.И. Мельников [и др.]. – Минск: Респ. центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 2017. – 85 с.

**Исследование фильтрационных свойств грунтов ограждающих сооружений
шламохранилищ с учетом влияния эффекта пристенного скольжения**

**Effect of wall sliding effect on filtration properties of soils of protecting
constructions of slurry storage**

Миканович Дмитрий Станиславович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС
Беларуси», кафедра пожарной аварийно-
спасательной техники, старший
преподаватель

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск,
ул. Машиностроителей, 25
e-mail: dmikanovich@list.ru

Dmitry S. Mikanovich

The State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Chair
of Fire Rescue Equipment, Senior Lecturer

Address: 220118, Belarus, Minsk,
ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: dmikanovich@list.ru

Ласута Геннадий Федорович

кандидат сельскохозяйственных наук

Министерство по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь, заместитель Министра

Адрес: 220030, г. Минск,
ул. Революционная, 5

Gennadiy F. Lasuta

PhD in Agricultural Sciences

Ministry of Emergency Situations of the Republic
of Belarus, Deputy Minister

Address: 220118, Belarus, Minsk,
ul. Revolyutsionnaya, 5

EFFECT OF WALL SLIDING EFFECT ON FILTRATION PROPERTIES OF SOILS OF PROTECTING CONSTRUCTIONS OF SLURRY STORAGE

Mikanovich D.S., Lasuta G.F.

Purpose. To determine the indicators that allow an objective assessment of the risk of emergencies on the protective structures of the slurry storage facilities of the Republic of Belarus.

Methods. Field and experimental studies, statistical processing of their results.

Findings. The empirical conformity of the dependence of filtration coefficient of sandy soils on the content of polyacrylamide in the sludge with the concentration of 0.17–0.9 mg/dm³ (wall slip effect). The coefficient of filtration for soil of protective constructions of slurry storage of the Republic of Belarus taking into account polyacrylamide available in slurry is determined. By experimental studies and field observations 1.2–1.4 times excess of the sludge filtration rate of 0.045–0.047 cm/s over the filtration rate of water was proved.

Application field of research. In the assessment of the probability of the occurrence of hydrodynamic accidents at protection structures of sludge storage facilities of the Republic of Belarus.

Conclusions. The results of the assessment of the risk of emergencies in the sludge storage of Belarus, taking into account the new data, are of practical importance for the determination of management decisions and technical measures to prevent the occurrence of hydrodynamic accidents in this type of facilities and to minimize their consequences.

Keywords: sludge storage, hydrodynamic accident, surfactant, retaining structure, sludge, wall slip effect, viscosity, critical filtration rate, polyacrylamide.

(The date of submitting: April 19, 2019)

REFERENCES

1. *Iz-za katastrofy v Vengrii v Ukraine nachinaetsya vneplanovaya proverka dvukh krupnykh zavodov* [Due to the catastrophe in Hungary in Ukraine, an unscheduled inspection of two large plants begins], available at: <http://dozor.kharkov.ua/zhizn> (accessed: March 15, 2010). (rus)
2. *Viskozimetry kapillyarnye steklyannye. Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniyami No. 1, 2): GOST 10028–81* [Capillary glass viscometers. Specifications (with Changes No. 1, 2): GOST 10028–81]. Affirmed January 1, 1983. Moscow: Gostandart, 1983. 31 p.(rus)
3. *Protokol ispytaniy prirodnykh i stochnykh vod No.8-V/13* [Test report on natural and waste waters No. 8-B/13]: Central research institute of complex use of water resources. Minsk: Central research institute of complex use of water resources, 2016. 1 p. (rus)
4. *Grunty, metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava: GOST 12536–79* [Soils, laboratory methods for determining the grain-size (grain) and microaggregate composition: State standard 12536–79]. Affirmed April 20, 1980. Moscow: Gostandart, 1979. 39 p.(rus)
5. *Astarita Dzh. Osnovy gidromekhaniki nen'yutonovskikh zhidkostey* [Fundamentals of non-Newtonian fluid mechanics]. Moscow: Mir, 1978. 230 p. (rus)
6. *Spravochnik po gidrotekhnike* [Handbook on hydraulic engineering]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture, 1955. 901 p. (rus)
7. *Arzumanov E.S. Kavitatsiya v mestnykh gidravlicheskiykh soprotivleniyakh* [Cavitation in local hydraulic resistances]. Moscow: Energiya, 1978. 385 p. (rus)
8. *Uilkinson U.L. Nen'yutonovskie zhidkosti* [Non-Newtonian fluids]. Moscow: Mir, 1964. 311 p. (rus)
9. *Mel'nikov V.I. Spravochnik po klimatu Belarusi* [Belarus climate handbook], Minsk: State Institution «Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Pollution and Environmental Monitoring», 2017. 85 p. (rus)