

УДК 622.322+502.3: 61

ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАКОПЛЕНИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

© 2015 С.П. Шкаруппа

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 19.11.2015

В работе представлены результаты анализа и оценки фильтрационных утечек углеводородов для объектов накопления нефтесодержащих отходов. Выполнены экспериментальные исследования интенсивности фильтрации жидких углеводородсодержащих отходов, определены коэффициенты фильтрации слабопроницаемых пород с учетом их влажности. Исследования проводились с помощью метода моделирования, а в необходимых случаях использовались методы экспертных оценок и статистики. Произведен расчет фильтрационных потерь для нефтешламонакопителей с подпором и без подпора, с учетом сорбции на грунтах.

Ключевые слова: *фильтрация, закон Дарси, коэффициент фильтрации, нефтешламонакопитель*

Многолетняя деятельность нефтяного комплекса приводит к появлению многочисленных объектов размещения углеводородсодержащих отходов (шламовые амбары, ило- и нефтешламонакопители, ямы аварийного хранения продукта, полигоны нефтеотходов и др.). Общая площадь накопителей только на территории Самарской области составляет более 2,5 тыс. га, срок службы до 50 лет [1]. Совершенствование технологий обращения с отходами, а также появление современного оборудования по переработке нефтесодержащих отходов способствует выводу старых накопителей из эксплуатации. Однако заброшенный накопитель продолжает отрицательно влиять на все компоненты экосистем. Перед предприятием ставится задача ликвидации накопителей и проведения комплексной рекультивации деградированных земель. На практике эксплуатационные службы предприятий применяют технологии вытеснения жидкой фазы и засыпку образовавшейся выемки грунтом. Оставшиеся в подмассивной геологической среде нефтепродукты со временем из-за явлений капиллярного подсоса, а также вытеснения водой атмосферных осадков, выходят на поверхность, образуя обширное по площади нефтяное пятно, что сводит на нет все усилия по производству рекультивации [1]. Данное явление наблюдается вследствие фильтрации жидких отходов в слои грунта под накопителями. Особенно велико вредное влияние на почву нефтепродуктов. В загрязненной почве резко меняется соотношение между углеродом и азотом, что ухудшает азотный режим почв и нарушает корневое питание растений. При углеводородных загрязнениях почв из них также вытесняется кислород, почва теряет продуктивность и плодородный слой

долго не восстанавливается. Самоочищение почв происходит очень медленно.

Для оценки влияния фильтрации из хранилищ на грунт необходимо определить размеры зоны загрязнения при заданном режиме работы хранилища. Эта задача может быть решена на основе совместного рассмотрения гидродинамических условий формирования фильтрационного потока и физико-химических процессов, происходящих в грунтах при протекании через них фильтрата. При фильтрации из хранилищ отходы, прежде всего, проходят зону под хранилищем, двигаясь, в основном, вертикально вниз, а затем, достигая бытового потока или водоупора, начинают распространяться в горизонтальном направлении [2]. Несмотря на то, что большинство шламонакопителей имеют подложку глины (около 1м) и водонепроницаемый экран, токсические вещества (углеводороды в частности) все равно обнаруживаются мониторинговыми службами как в подземных водах (находящихся под шламонакопителем), так в пробе почвы взятой с поверхности. Объяснить это можно либо повреждением водонепроницаемого изолирующего слоя в результате неосмотрительности (при производстве, транспортировке, настиле и т.д.), либо в результате физического износа (в результате роста растений через изолирующий слой, старения материала и т.д.) [2].

Известно, что под шламонакопителями происходят следующие физико-химические процессы: диффузия, конвекция в пористой среде (фильтрация), сорбция загрязнителей [3]. В литературе методы определения фильтрационных утечек освещены достаточно подробно, однако данные о фильтрации жидких углеводородсодержащих отходов отсутствуют. Связано это, прежде всего с тем, что нефтешламы характеризуются переменным составом и вязкостью в зависимости от источника образования. Также наличие механических примесей может оказывать

Шкаруппа Светлана Петровна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Химическая технология и промышленная экология». E-mail: cp0512@yandex.ru

не последнее влияние на фильтрацию – поры грунта могут просто забиваться. Все это не позволяет просто подставить данные в уравнения фильтрации без проведения дополнительных экспериментальных исследований [4, 5]. Поэтому оценка фильтрационных утечек накопителей жидких нефтесодержащих отходов является актуальной проблемой. Для оценки интенсивности процесса фильтрации жидких углеводородсодержащих отходов были проведены экспериментальные исследования.

Существуют два основных направления в области определения коэффициента фильтрации: определение коэффициента фильтрации в полевых условиях и определение коэффициента фильтрации в лабораторных условиях. Методы определения коэффициента фильтрации по ГОСТ 25584 применяются для песчаных, пылеватых и глинистых грунтов. Коэффициент фильтрации определяют на образцах ненарушенного (природного) сложения или нарушенного сложения заданной плотности. Коэффициент фильтрации глинистых грунтов определяют при заданных давлении на грунт и переменном градиенте напора с пропуском воды сверху вниз или снизу-вверх, при предварительном насыщении образца грунта водой снизу-вверх без возможности его набухания. Для насыщения образцов грунта и фильтрации применяют грунтовую воду с места отбора грунта или воду питьевого качества. Образцы грунта взвешивают на лабораторных весах с погрешностью $\pm 0,01$ г. Результаты определения коэффициента фильтрации должны сопровождаться данными о плотности сухого грунта, степени влажности и коэффициенте пористости.

Для исследования использовались нефтешламы, находящиеся в различных накопителях Самарской области. Для определения химического состава нефтешлама проводились последовательные операции: определение фракционного состава нефтешлама, определение компонентного углеводородного состава керосиновой фракции хроматографическим методом. Состав жидких проб углеводородов определяли хроматографическим методом на аппаратно-программном комплексе марки «Хроматэк-Кристалл 5000М» с пламенно-ионизационным детектором. Идентификация веществ выполнялась с помощью специализированного программного обеспечения «Хроматэк Аналитик» по логарифмическим индексам с помощью опорных пиков с использованием широкой базы данных, содержащей около пятисот компонентов. Другая очень важная характеристика фильтрующейся жидкости это вязкость. Определение кинематической вязкости осуществлялось для каждой пробы экспериментально по методике ГОСТ 23278-78.

Для определения коэффициента фильтрации слабопроницаемых пород необходимо использовать схему опыта при падающем напоре [6]. Для всех экспериментов использовался один

и тот же грунт, насыпная плотность которого составляет $1,15 \text{ г/см}^3$; проба нефтешламов (характеристика которой представлена в табл. 1); стеклянные трубки с внутренним диаметром $d=30$ миллиметров; проба воды.

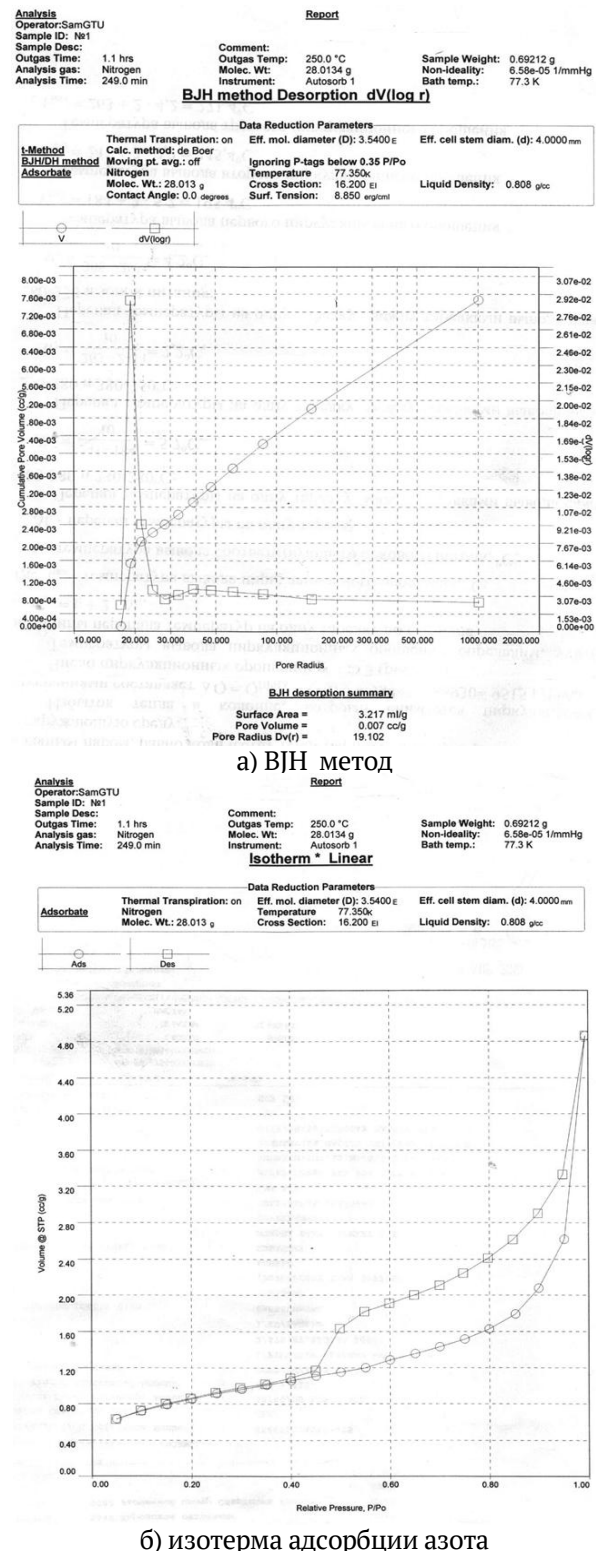


Рис. 1. Результаты анализа проб грунта

Проба грунта была предварительно высушена, обработана механически до однородного

состава. Для исследования микроструктуры проб грунта использовался газо-адсорбционный порозиметр Thermo Scientific Surfer. Принцип работы прибора основан на измерении

изотерм адсорбции газов и паров волюметрическим методом, который позволяет быстро и точно определять удельную поверхность, размер пор, объем пор (рис. 1).

Таблица 1. Физико-химические свойства пробы

Вид испытания	Метод испытания	Единицы измерения	Значения (при испытании в лаборатории)
плотность	ГОСТ 3900	кг/м ³	839,1
объемная доля воды	ГОСТ 2477	%	64,7
массовая концентрация хлористых солей	ГОСТ 21534	мг/дм ³	1013
кинематическая вязкость	ГОСТ 33	мм ² /с	14,58
массовая доля механических примесей	ГОСТ 6370	%	0,0067
массовая доля парафина	ГОСТ 11851	%	9,7

Для определения скорости фильтрации углеводородов через слой грунта с учетом его влажности были проведены сравнительные эксперименты для следующих систем: нефтешлам - сухой грунт, нефтешлам - сухой грунт - вода, нефтешлам - влажный грунт, нефтешлам - влажный грунт - вода, нефтешлам - нефтезагрязненный грунт, нефтешлам - нефтезагрязненный грунт - вода, нефтешлам - влажный грунт - солевой раствор. Исследования проводились в одинаковых условиях: высота набивки грунта 22 см массой 200 грамм; количество нефтешлама V=50

мл; количество воды 50 мл. Согласно методике [6] сухой грунт плотно набивался в три стеклянные трубки на 22 см, сверху заливалась нефть V=50 мл (рис. 2). При фильтрации пробы сквозь слой глины видно расслоение нефтешлама на более светлую и легкую фракцию и темную тяжелую фракцию. Для каждой из них была определена скорость фильтрации. Скорость фильтрации легких углеводородов через слой сухой глины составила $v_{с-л} = 0,0015$ м/сут. скорость фильтрации тяжелых углеводородов через слой сухой глины составила $v = 0,0012$ м/сут.



а) начало эксперимента



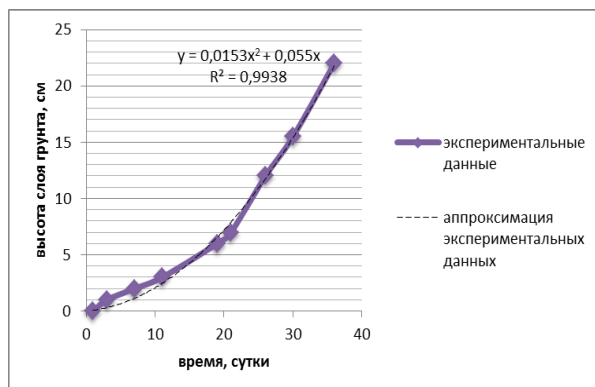
б) завершение эксперимента

Рис. 2. Исследование процесса фильтрации углеводородов

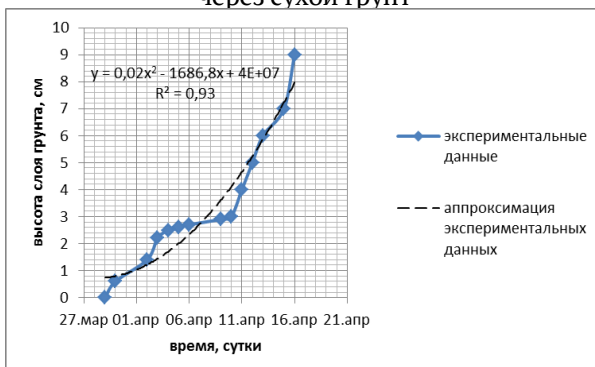
На фильтрацию углеводородов через слой сухого грунта высотой 22 см ушло 936 часов. Соответственно скорость фильтрации для сухого грунта составила $v_{с-л} = 0,0056$ м/сут. В ходе проведения эксперимента образовался солевой осадок, масса которого составила: в первой трубке $m_{соли1} = 28,6$ г, во второй $m_{соли2} = 43,3$ г, в третьей $m_{соли3} = 73,2$ г. Концентрация соли соответственно составила 730 мг/дм³, что приблизительно соответствует массовой концентрации хлористых солей, содержащихся в пробе, численные значения которых приведены в табл. 1.

Для исследования влияния воды на процесс фильтрации углеводородов стеклянная трубка с пробой грунта и нефтешлама помещалась в емкость, на дно которой заливалась вода. Природная вода, залитая на дно емкости, практически сразу стала подниматься по слою грунта в стеклянной трубке и за 3,5 часа поднялась на 5 сантиметров. Как только фронт влажного грунта соприкоснулся с фронтом фильтрующихся углеводородов, фильтрация нефтепродуктов во влажном грунте заметно ускорилась. В результате исследований было установлено, что пока природная вода

не достигла загрязненного грунта фильтрация идет, так же как и в опыте нефтешлам - сухой грунт, однако во влажном грунте фильтрация заметно ускоряется. На фильтрацию сухого грунта с подпором воды потребовалось 458 часов. На рис. 2б показано окончание эксперимента - на поверхности воды зафиксировано нефтяное пятно. Скорость фильтрации составила соответственно 0,0094 м/сут.

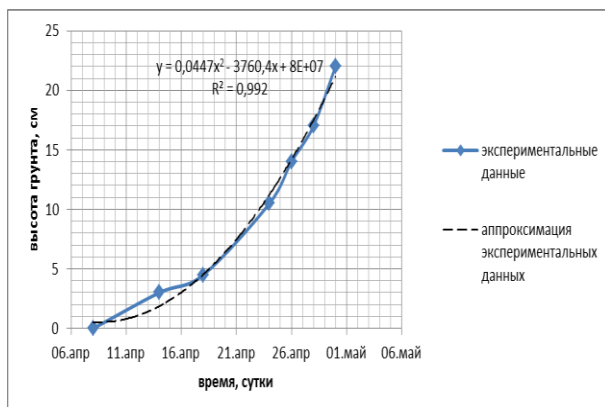


а) зависимость глубины фильтрации нефтешлама через сухой грунт

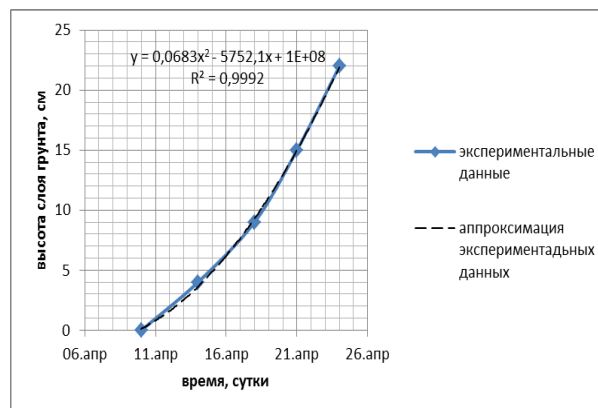


б) зависимость глубины фильтрации нефтешлама через влажный грунт

Рис. 3. Зависимость глубины фильтрации нефтешлама через грунт от времени



а) зависимость глубины фильтрации нефтешлама через влажный грунт от времени с подпором воды



б) зависимость глубины фильтрации нефтешлама через влажный грунт от времени с добавлением солевого раствора

Рис. 4. Зависимость глубины фильтрации нефтешлама через влажный грунт от времени

Аналогичные исследования были выполнены для системы нефтешлам - влажный грунт и определена скорость фильтрации углеводородов для влажной глины $v_{\text{в}}=0,0075$ м/сут. Для системы нефтешлам - влажный грунт-вода стеклянная трубка, заполненная влажным грунтом и нефтешламом, помещалась в емкость, на дно которой наливалась природная вода. Если на фильтрацию углеводородов во влажном грунте потребовалось 288 часов, то в данном опыте уже 216 часов.

Предварительная обработка результатов эксперимента показала, что при постоянном составе среды скорость фильтрации углеводородов для системы нефть - влажный грунт и нефть - сухой грунт нелинейно зависит от времени (рис. 3), а для систем нефть - влажный грунт - вода и нефть - влажный грунт - солевой раствор зависимость близка к линейной (рис 4). Результаты экспериментов показали, что на глубину проникновения углеводородов влияет повышение влажности грунта и увеличение концентрации солей в воде.

На основе экспериментальных данных построена обобщенная диаграмма зависимости скорости фильтрации от условий эксперимента. Характер изменения соотношения коэффициентов фильтрации углеводородов от влажности грунта представлен на рис. 5. Основным фактором, регулирующим направление процесса фильтрации углеводородов, является исходное соотношение углеводородов, воды и соли.

Для определения скорости горизонтальной фильтрации суглинка была собрана установка, описанная в [6] (рис. 6). Установка состоит из U образной стеклянной трубки диаметром 2 см, в которую помещали суглинок и сверху наливали нефтешлам. Скорость движения углеводородов составила $w=0,0021$ м/сут. При увеличении объема нефтешлама скорость

фильтрации углеводородов уменьшалась. Связано это с тем, что насытившись тяжелыми углеводородами поры суглинка забивались и скорость фильтрации углеводородов резко уменьшалась.

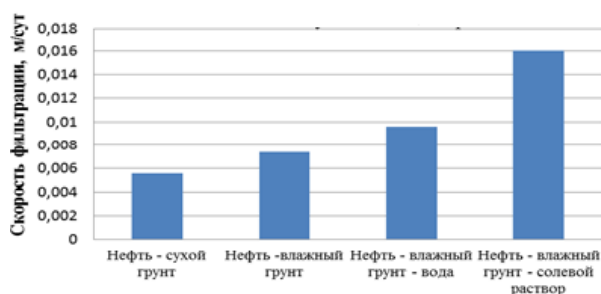


Рис. 5. Скорость фильтрации жидких углеводородсодержащих отходов в слабопроницаемых породах с учетом их влажности

Движение более легких фракций углеводородов продолжалось, но с малой скоростью, в основном обусловленной диффузией. Скорость фильтрации углеводородов через слой суглинка

по мере насыщения грунта нефтепродуктами уменьшилась с 0,0017 м/сут. до 0,00065 м/сут, т.е. скорость фильтрации равна коэффициенту фильтрации. За 183 дня проба нефтешлама прошла около 29 сантиметров, соответственно скорость фильтрации суглинка составила 0,0016 м/сут.

Скорость фильтрации при проходе по горизонтальному пласту уменьшалась намного меньше, чем в опыте с вертикальным расходом нефтешламов, хотя насыщение и «забивка» углеводородами глины присутствовала. Объясняется это тем, что фильтрация тяжелых углеводородов происходит, в основном, за счет силы земного притяжения, т.е. они практически неспособны к движению в сторону по пласту. Фильтруясь в сторону, они тут же начинают движение вниз. В то же время более легкие фракции, используя все пространство трубки, со значительной скоростью перемещаются в горизонтальном направлении. Скорость фильтрации суглинка в горизонтальном направлении составила 0,0032 м/сут.



а) начало эксперимента



б) завершение эксперимента

Рис. 6. Определение скорости горизонтальной фильтрации суглинка

Использование модельных систем позволило провести сравнительный анализ процесса фильтрации углеводородов для разных условий. В ходе исследований было установлено:

- 1) существенное различие скоростей вертикальной и горизонтальной фильтрации углеводородов;
- 2) возрастание коэффициента фильтрации углеводородов при увеличении влажности грунта;
- 3) резкое увеличение коэффициента фильтрации углеводородов в присутствии солевого раствора;
- 4) определен коэффициент фильтрации углеводородов для системы нефтешлам-глина.

Используя полученные экспериментальные данные можно провести анализ и оценку воздействия объектов накопления жидких отходов на окружающую среду. Полученные коэффициенты фильтрации углеводородов для разных систем позволяют рассчитать потери жидких углеводородсодержащих отходов вследствие фильтрационных утечек для разных шламонакопителей с учетом

влажности грунта и наличии подпора. Согласно методикам [7, 8] при фильтрации в порах и трещинах грунта создается чрезвычайно сложная микроструктура потока, анализ которой на основании общих уравнений Навье-Стокса встречает исключительные трудности, практически исключающие возможности использования такого пути исследования. В связи с этим обоснование закономерностей фильтрации производится на основе применения представлений механики сплошной среды, позволяющей, исходя из рассмотрения статистически неупорядоченного потока в поровом пространстве, перейти к осредненному рассмотрению потока в непрерывном пространстве. При этом в качестве кинематической характеристики фильтрационного потока используется понятие скорости фильтрации.

Основной закон фильтрации связывает расход фильтрационного потока с потерями напора, характеризующими затраты энергии потока; его структура устанавливается экспериментальным путем, хотя существуют попытки и теоретического

подхода к решению этой задачи [9, 10]. В качестве математического описания процесса фильтрации углеводородов в накопителе используется закон Дарси и закон Цункера. На основе полученных экспериментальных данных и справочных данных о свойствах глины [11] был выполнен расчет фильтрационных утечек для буферного пруда

ОАО КНПЗ. Расчеты представлены в табл. 2. Полученные результаты сопоставимы с данными мониторинговой службы объекта, в среднем погрешность составляет 15%, что допустимо для прогнозирования воздействия аналогичных объектов на компоненты окружающей среды (почву).

Таблица 2. Фильтрация нефтепродуктов в зависимости от состояния глины

Образец глины	Скорость фильтрации, м/сут	Отток нефтепродуктов, м ³ /год	Время достижения плоскости сравнения, лет
сухая глина	0,0015	512	38,2
сухая-вода	0,0049	1672	13,1
влажная глина	0,0035	1199	16,8
влажная глина -вода	0,0055	1872	10,7

Выводы: на основе экспериментальных данных была произведена оценка фильтрационных утечек для накопителей жидких углеводородсодержащих отходов; определен преобладающий процесс переноса загрязнителя – конвективный перенос углеводородов в присутствии воды и ее растворов; установлено что, на расход фильтрационных утечек влияет влажность грунта и содержание солей в воде. Это позволяет прогнозировать степень загрязнения грунта рядом с накопителями жидких отходов и представить обоснованные рекомендации для проведения восстановительных работ. Полученную информацию можно использовать при проектировании накопителей нефтесодержащих и буровых отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чертес, К.Л. Рекультивация накопителей углеводородсодержащих отходов / К.Л. Чертес, Д.Е. Быков, В.В. Ермаков и др. // Экология и промышленность России, 2008. №6. С. 16-18
2. Перельман, А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман, Н.С. Касимов. – М.: Астрель, 2000. 610 с
3. Сергеев, Е.М. Грунтоведение: 5-е изд. / Под ред. Е.М. Сергеева / Е.М. Сергеев, Г.А. Голодковская, Р.С. Зиангиров и др. – М.: Изд-во МГУ, 1983. 595 с.
4. Шкаруппа, С.П. Методология количественной оценки фильтрационных утечек для накопителей жидких промышленных отходов / С.П. Шкаруппа, К.М. Михайлов // Экология человека: концепция факторов риска, экологической безопасности и управления рисками. Сборник статей VI Всерос. научно-практ. конф. МНИЦ ПГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2009. С. 150-155.
5. Шкаруппа, С.П. Анализ и оценка фильтрационных процессов в нефтешламонакопителях / С.П. Шкаруппа, К.М. Михайлов, Н.В. Хорина, Д.Е. Быков // Материалы междунар. конф. «Антропогенная трансформация природной среды» (г. Пермь, 18-21 октября 2010 г.), Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2010. Т. 3. С. 486-490.
6. Даниелян, Б.З. Условия залегания нефти и газа в земной коре: Учеб. пособ. – Самара, Самар. гос. техн. ун-т., 2006. 187 с.
7. Казанский, А.Б. Теория фильтрационной диффузии и приложение ее к задачам гидрологии и гидрогеологии / А.Б. Казанский, Г.С. Кесельман, Э.Ф. Махмудбеков. – М.: Наука, 1973. 136 с.
8. Шестаков, В.М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. – М., 1961. 101 с.
9. Терцаги, К. Механика грунтов в инженерной практике / К. Терцаги, Р. Пек. – М.: Госстройиздат, 2000. 608 с.
10. Ольховская, В.А. Подземная гидромеханика. Фильтрация невязкой нефти: Учеб. пособ. – М.: ОАО «ВНИИ ОЭНГ», 2011. 226 с.
11. СНиП 2.02.01-83 Основания зданий и сооружений. 52 с.

ASSESSMENT OF SEEPAGE LOSSES AT OPERATION OF OBJECTS OILY WASTE ACCUMULATION

© 2015 S.P. Shkaruppa
Samara State Technical University

In work results of the analysis and assessment of hydrocarbon seepage leaks for objects of oily waste accumulation are presented. Pilot studies of intensity of filtration hydrocarbon liquid waste are executed, coefficients of filtration of low permeable rocks taking into account their humidity are defined. Researches were conducted by means of a modeling method, and in necessary cases methods of expert estimates and statistics were used. Calculation of seepage losses for petrosiludge collectors with a backwater and without it, taking into account sorption on soil is made.

Key words: filtration, Darcy's law, filtration coefficient, petrosiludge collector