

## ФИЛЬТРАЦИОННО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ НАКОПИТЕЛЕЙ ОТХОДОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ ГЕОСРЕДЫ (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ)

*Пашков А.Д., Тупицына О.В., Пыстин В.Н., Чертес К.Л.  
Самарский государственный технический университет, Самара*

**Ключевые слова:** геосреда, ликвидация загрязнений, неньютоновская жидкость, нелинейный закон фильтрации, закон Дарси, высоконапорная промывка.

**Аннотация.** Накопители отходов загрязняют геосреду путем просачивания жидкости с частицами опасных промышленных отходов в породы верхней части разреза. Зачастую данные жидкости являются неньютоновскими и при их фильтрации возникают некоторые особенности. Исследование данных особенностей способствует разработке и улучшению технологий очистки пород верхней части разреза от загрязнений накопителей опасных промышленных отходов.

## FILTRATION-RHEOLOGICAL FEATURES OF POLLUTION TRANSFERRING FROM WASTE STORAGES IN TECHNOLOGIES OF GEOLOGIC ENVIRONMENT DECONTAMINATION (THEORETICAL PREMISES AND PRACTICAL APPROBATION)

*Pashkov A.D., Tupitsyna O.V., Pystin V.N., Chertes K.L.  
Samara State Technical University (SSTU), Samara*

**Keywords:** geologic environment, pollution elimination, non-newtonian fluid, non-linear filtration law, Darcy law, high-pressure washing.

**Abstract.** Waste ponds pollute the geo-environment with fluids that contain particles of harmful industrial waste seeping into the ground. Often such fluids are non-newtonian and they flow with some features. Researching these features contributes to the development and improvement of technologies of decontamination ground pollutions from harmful industrial waste storages.

Одним из источников загрязнения геологической среды выступают накопители опасных промышленных отходов. Загрязнения из накопителей распространяются по вертикали на глубины в десятки метров (до региональных водоупоров) По горизонтали геосреда загрязняется на сотни и тысячи метров вплоть до области разгрузки подземных вод.

В последнее время получили распространение технологии очистки геосреды от загрязнений. Они основаны на сочетании активных и пассивных методов.

К активным методам относят высоконапорную (до 100 МПа) закачку в глубинные горизонты геосреды растворов вязущих, коагулянтов и детергентов. Закачку осуществляют через сеть нагнетательных скважин с использованием современных мобильных экструдеров [1-3]. Подача раствора под большим давлением, осуществляемая в «ударном» режиме, позволяет разрыхлить породу, уменьшая площадь активной поверхности на границе раздела фаз. При этом происходит перевод загрязненных флюидов из связанного (капиллярно-

пленочного) в свободное состояние с одновременным понижением вязкости стока.

Пассивными методами выступают естественное вымывание загрязнений потоком подземных вод, а так же их дренаж с последующим сбором и очисткой [1, 4].

Большинство накопителей расположено в труднофильтруемых породах зоны аэрации, преимущественно глинистой и суглинистой природы с коэффициентом фильтрации  $K_f \leq 10^{-7}$  см/с. Ударное воздействие увеличивает коэффициент фильтрации через загрязненную породы до достижения значений  $K_f \geq 10^{-5}$  см/с и способствует её самоочищению подземными водами.

Подавляющее большинство загрязненных флюидов, по общепринятым классификациям [5, 6] принадлежат к неньютоновским жидкостям. Динамическая вязкость большинства загрязнений полимерной природы ( $\mu_{гс}$ ), лежит в диапазоне значений от 10 000 до 100 000 Па·с· $10^{-3}$  при  $5,0 \pm 2,0^\circ\text{C}$ . Положительный опыт, накопленный авторами, показывает, что «ударная» подача раствора способна снизить эти значения на два-три порядка, до 1000 до 10000 Па·с· $10^{-3}$  и перевести тугопластичный флюид в подвижное состояние.

Указанные выше особенности системы «геологическая среда – загрязненный флюид накопителя», обосновывают выбор и создание технологий очистки.

### **Цель и задачи исследований**

Целью исследований выступило изучение структурно-механических свойств флюидов накопителей гетерофазных отходов неньютоновской природы (бингамовских, дилатантных, а так же их переходных типов загрязненной жидкой фазы) в выделенных фрагментах пород неоднородной проницаемости – от песчаных до глинистых включительно, для последующего создания технологий очистки геосреды, основанных на совмещении активных и пассивных методов.

Для достижения поставленной цели выполнялись следующие задачи.

1. Теоретическое обоснование и методологическое обеспечение технологии очистки загрязненной геосреды в широком диапазоне давлений нагнетания.

2. Лабораторные исследования реологических свойств (преимущественно, коэффициента динамической вязкости) жидких флюидов накопителей шламовых отходов нефтяного, химического, целлюлозно-бумажного, пищевого и коммунального секторов промышленности.

3. Полевые (конвертное бурение, опытные наливов) исследования фильтрационных свойств (коэффициенты проницаемости) верхних пород геосреды в техногенных ареалах накопителей.

4. Изучение, как в лабораторных, так и в крупномасштабных промышленных условиях, фильтрации высоковязких жидкостей в средах с различной проницаемостью.

5. Аппаратурно-конструктивное оформление технологии очистки загрязненной геосреды, а так же её эколого-экономическое обоснование.

### **Теоретические предпосылки**

Особенности фильтрации неньютоновских жидкостей обусловлен частотой проявления структурно-механических свойств загрязненных флюидов. Например,

на площадках предприятий нефтяного комплекса, загрязнения в толще пород до глубин в десятки метров, представлены малоподвижной жидкой фазой как бингамовской, так и дилатантной природы [5, 6].

Отбор образцов из загрязненных пород зоны аэрации в диапазоне глубин водоупорных горизонтов (20-25 м, Самарская область), а также изучение их свойств в грунтовой лаборатории, показали, что перемещение высоковязких флюидов в средах с низкими значениями проницаемости, подчиняется закономерностям фильтрации неньютоновских жидкостей.

Природа исследуемых флюидов не позволяет применять к ним закон линейной фильтрации Дарси, что приводит к необходимости вывода новых уравнений или ввода в имеющиеся коэффициенты, позволяющих применять их к неньютоновским жидкостям.

Исследователи неньютоновской жидкости объясняют отклонения от закона линейной фильтрации с двух позиций: это может происходить из-за внутренних свойств флюида и размеры поровых каналов, по которым происходит фильтрация. Имеет место связь отклонения от линейного закона фильтрации с коэффициентом подвижности, как функции градиента давления [7].

$$\frac{k}{\mu} = \frac{k_0}{\mu_0} \cdot f(\text{grad } P), \quad (1)$$

где  $\frac{k_0}{\mu_0}$  – предельное значение коэффициента подвижности (при больших градиентах давления);

При использовании уравнения (1) закон линейной фильтрации Дарси принимает вид

$$Q = \frac{k_0}{\mu_0} \cdot f(\text{grad } P) \cdot \frac{\Delta P}{L} \cdot F, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход фильтрующейся жидкости,  $\mu_0$  – предельная (динамическая) вязкость жидкости,  $k_0 = k(x, y, z)$  – предельная проницаемость (или коэффициент проницаемости) среды (он имеет размерность площади, а его величина имеет порядок квадрата характерного размера пор,  $\Delta P$  – перепад давлений,  $L$  – длина пути фильтрации,  $F$  – площадь поперечного сечения потока фильтрации.

Данные предельного значения коэффициента подвижности получаются при лабораторном исследовании отобранного образца загрязненной породы геосреды и в дальнейшем используются для подбора необходимого и достаточного давления, создаваемого мобильным экструдером для приближения механизма фильтрации неньютоновской жидкости к линейному закону.

Теоретические предпосылки фильтрации через пористые среды послужили основой для проведения промышленных экспериментов по высоконапорной очистке геосреды, загрязненной фильтратом одного из накопителей вязких шламовых отходов Самарской области

### **Методология исследований и обсуждение результатов**

На опытном участке была обустроена сеть нагнетательно-извлекающих скважин, установлена буровая установка «Comacchio MC 1200» в составе

смесительной станции «МІХР30», насоса высокого давления «Metax MP7-610-1» и мобильного высоконапорного экструдера.

Был произведен отбор пробы загрязненной породы и последующее лабораторное исследование. Анализ результатов лабораторных исследований пробы (песок, пропитанный нефтью (общее содержание углеводов  $1,0 \pm 0,5$  тыс.мг/кг масс)) представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Табл. 1. Результаты лабораторных исследований отобранной пробы

Градиент давлений, МПа	Вязкость динамическая, $(\text{Па} \cdot \text{с}) \cdot 10^{-3}$	Коэффициент проницаемости, $\text{м}^2 \cdot 10^{-12}$	Коэффициент подвижности, $(\frac{\text{м}^2}{\text{Па} \cdot \text{с}}) \cdot 10^{-12}$
0	7036	8.7	1.24
10	6192	10.1	1.63
20	5620	11.4	2.03
30	4284	13.2	3.08
40	3891	13.9	3.57

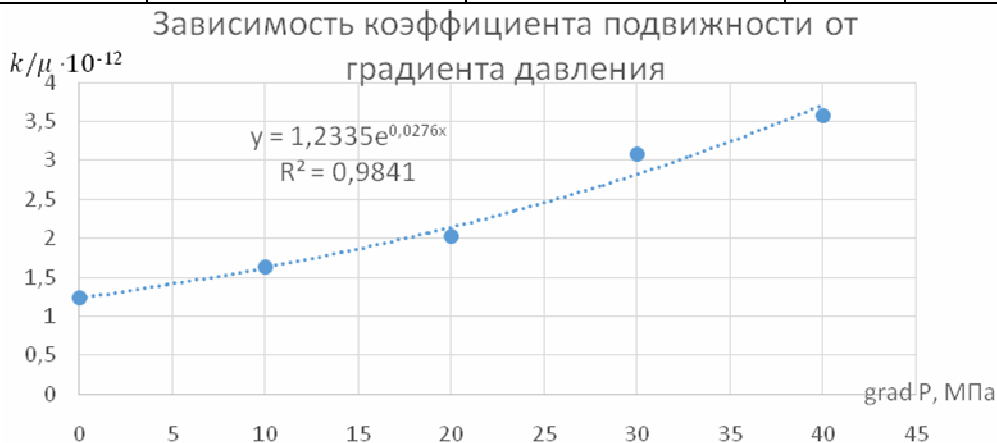


Рис. 1. График зависимости коэффициента подвижности от градиента давления

Построенный график (рис. 1) показывает экспоненциальную зависимость между коэффициентом подвижности и градиентом давления с высоким коэффициентом детерминированности  $R^2 = 0,984$ .

В таком случае уравнение (2) для опытного участка имеет вид

$$Q = \frac{k_0}{\mu_0} \cdot 1,2335e^{0,0276 \cdot \text{grad } P} \cdot \frac{\Delta P}{L} \cdot F. \quad (3)$$

### Выводы

В результате исследования было получено уравнение фильтрации неньютоновской жидкости для опытного участка путем изменения линейного закона фильтрации Дарси с учётом зависимости между коэффициентом подвижности флюида и градиентом давления.

Данное исследование сделает применение высоконапорной технологии очистки нефтезагрязненного грунта менее затратным, что приведет к более частому применению технологии и улучшению экологии за счёт очистки геосреды от загрязнений, связанными с накопителями опасных промышленных отходов.

**Список литературы**

1. Патент №2752983 РФ. Способ очистки нефтезагрязненного грунта с применением высоконапорной технологии / О.В. Тупицына, К.Л. Чертес, В.Н. Пыстин, Е.Н. Петренко, А.А. Букин, Д.Н. Шерстобитов, Д.Е. Быков, Г.Г. Гиляев. – Заявка №2020135452 от 27.10.2020; опублик. 11.08.2021.
2. Чертес К.Л., Сеянко А.П., Букин А.А. Ресурсосберегающие технологии при ликвидации бездействующих накопителей отходов нефтегазовой отрасли // Современные проблемы теории машин. – 2023. – № 16. – С. 19-24. – doi.org/10.26160/2307-342X-2023-16-19-24.
3. Чертес К.Л., Букин А.А., Сеянко А.П., Мальцева А.А. Теоретические предпосылки обращения с экосистемами, сформированными выведенными из эксплуатации шламонакопителями // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: Сборник докладов Международной научной конференции, Алушта-Белгород, 05-09 июня 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 43-54.
4. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Организация противofильтрационных мероприятий на шламохранилищах // Проблемы недропользования. – 2022. – № 2. – С. 104-114.
5. Астарита Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / пер. с англ. Д.А. Казенина. – М.: Наука, 1978. – 309 с.
6. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. – М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – С. 24-29.
7. Каширина К.О. Подземная гидромеханика. Учебник. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010.

**Сведения об авторах:**

*Тупицына Ольга Владимировна* – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой;

*Чертес Константин Львович* – д.т.н., профессор;

*Пыстин Виталий Николаевич* – к.т.н., доцент;

*Пашков Антон Дмитриевич* – аспирант.