

МНОГОСЛОЙНЫЕ СОРБЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ

НА ЗАЩИТЕ ВОДООХРАННЫХ ЗОН АВТОТРАСС ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Разработан самотечный метод очистки дорожных ливневых и талых стоков с использованием дешевых и доступных сорбентов на многослойных фильтрах с тонкими слоями (пенополиуретан, торфоплит, «Новосорб»). Исследованы параметры сорбции растворенных в воде нефтепродуктов. Установлен и обоснован порядок сорбентов по емкости: пенополиуретан, торфоплиты «ЭФТ», «Новосорб». Порядок по кинетике сорбции обратный. На основе математической модели многослойного фильтра показано, что многослойный фильтр в условиях малых толщин в несколько раз эффективнее однослойного. Разработан и реализован проект локальных очистных сооружений для одного из участков автодороги М-18 «Кола» с использованием многослойного самотечного фильтра небольшой толщины.

Введение

В соответствии с действующим природоохранным законодательством дождевые и талые воды с территории автодорог и мостовых переходов должны быть очищены перед сбросом в охраняемые реки, озера, болотные участки.

Известные в мире конструкции локальных очистных сооружений (ЛОС) для очистки ливневых стоков требуют подземного размещения с глубиной котлована от 1,5 до 3,5 м. Конструкция фильтров включает распределительный колодец, песколовку, масло-бензоуловитель, сорбционный фильтр, колодец для отбора проб, устройство выпуска очищенного стока на рельеф [1].

При подземном размещении ЛОС требуется перепад уровней между водосборной поверхностью и точкой сброса очищенного стока до 2,5 м, поэтому, как правило, требуется насосная перекачка очищенного стока.

Для многих равнинных регионов России автодорожные трассы имеют следующие характерные особенности:

- ◆ отсутствие электроснабжения;
- ◆ заболоченность территории до 40 %;
- ◆ чрезвычайно малое превышением полотна дороги над рельефом – от 0,3 м;
- ◆ высокий уровень стояния грунтовых вод – от 0,1 м.

Такие особенности трассы требуют применения ряда оригинальных решений в конструктивном оформлении ЛОС:

- ◆ включение в схему предпочистку дождевого стока, включающую песколовку и/или намывной фильтр, чтобы поверхность сорбентов была «чистой» от взвешенных примесей;
 - ◆ ЛОС должны иметь наземное расположение, движение стоков самотёчное;
 - ◆ ЛОС в режиме ожидания дождевых или талых стоков должны находиться в «сухом» состоянии;
 - ◆ ЛОС в рабочем режиме (очистка стоков) должны находиться в «водозаполненном» состоянии;
 - ◆ сброс очищенных стоков должен осуществляться на рельеф;
 - ◆ глубокая очистка дождевых и талых стоков должна осуществляться использованием многослойного сорбционного фильтра, чтобы обеспечить извлечение разных типов загрязняющих веществ.
- Ключевым устройством самотечной конструкции является сорбционный фильтр, основной особенностью которого является небольшая толщина активного фильтрующего слоя. Одним из важных требований к сорбенту является его небольшая стоимость, чтобы после исчерпания его емкости можно было направить фильтр на утилизацию.

Е.В. Веницианов*,

доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук

Е.О. Графова,

кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО Петрозаводский государственный университет

* Адрес для корреспонденции: eugeny.venitsianov@gmail.com

Это требование можно удовлетворить при использовании дешевых и доступных материалов. С учетом показателя «цена – качество» в конструкции фильтра нами использованы три разновидности сорбентов: пенополиуретан, широко используемый материал, модифицированные торфоплиты «ЭФТ», изготавливаемые из дешевого природного материала – торфа, и сорбент марки «Новосорб» на минеральной основе, используемый при очистке загрязненных нефтепродуктами стоков.

Результаты и их обсуждение

Первым этапом работы являлось исследование сорбционных свойств выбранных материалов. Ниже приведена краткая характеристика этих материалов.

1. Полимерный материал пенополиуретан (ППРТ). Это сорбент, наличие системы пор которого обеспечивает доступ сорбируемого вещества внутрь сорбента. Почти всё вещество, из которого состоит сорбент, принимает участие в сорбции. Материал характеризуется высокой пористостью, механической прочностью, значительной поглощающей способностью по нефтепродуктам, гидрофобными свойствами и химической стойкостью. Технические характеристики сорбента представлены в *табл. 1*. Может использоваться многократно при регенерации путём его отжима. При утилизации сжиганием образуется малый зольный остаток.

2. Торфоплиты «ЭФТ». Элементы фильтрующие торфяные изготавливаются из торфа. Переработка сырья в фильтрующий материал основана на улучшении природных сорбционных свойств торфа и исключает применение иных компонентов. Материал служит основой для изготовления лёгких бонов сорбционного типа для борьбы с разливами нефтепродуктов и биофильтров для очистки газовых выбросов в атмосферу. Технические характеристики «ЭФТ» приведены в *табл. 1*. Утилизация производится путём сжигания в котельных, работающих на твёрдом топливе.

3. Сорбент марки «Новосорб». Сорбент производится на минеральной основе. Он способен сохранять гидрофобные свойства при длительном (более 2 лет) контакте с водой, очищать водную фазу от эмульгированных и растворенных нефтепродуктов, незначительно увеличивает гидравлическое сопротивление в процессе работы, не вызывает вторичного загрязнения очищаемой воды. Технические характеристики сорбента приведены в *табл. 1*. Сорбент «Новосорб» пожа-

Р.И. Аюкаев,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО Петрозаводский государственный университет

Т.А. Чуднова,

кандидат химических наук, доцент, ФГБОУ ВПО Московской области Международный университет природы, общества и человека «Дубна»

ро- и взрывобезопасен, не поддерживает горения. При попадании на кожу не вызывает раздражения. Нетоксичен на всех этапах применения, экологически безопасен. Предварительные исследования сорбентов проводились в производственных условиях с использованием длинных слоев, что позволило дать оценку кинетических свойств, сорбционной емкости и фильтрационной емкости.

Исследование сорбционных свойств материалов

Лимитирующим загрязняющим веществом являются нефтепродукты, так как очистное устройство включает стадию предочистки, что обеспечивает достаточную глубину осветления дождевого стока. Поэтому модельный раствор нефтепродуктов готовили из трансформаторного масла на дистиллированной воде с концентрацией 6,2–133,2 мг/л. Ниже приведены данные по исследованию кинетики и статистики сорбции

Кинетика сорбции нефтепродуктов

В соответствии с методикой исследования кинетики сорбции проведены эксперименты для перечисленных выше сорбентов: пенополиуретана, торфоплит и сорбента марки «Новосорб». Анализ проб проводить на приборе «Флюорат – 02-3М» [2].

На *рис. 1* представлены кривые зависимости от времени концентрации нефтепродуктов на пенополиуретане. Масса сорбента составляла 0,8 г, сорбент был предварительно разрезан на куски размером примерно 3×2×1 см, объем раствора 400 мл, температура раствора 20 °С. На основе кинетических кривых сорбции нефтепродуктов на пенополиуретане определено время установления равновесия

Таблица 1

Технические характеристики сорбентов

Характеристика фильтрующего слоя	Значение		
	ППРТ	«ЭФТ»	«Новосорб»
Крупность загрузки, мм	15-20		0,6-5,0
Плотность загрузки, кг/м ³	40	80	50-120
Высота слоя, м	2	0,8	0,7
Эффект очистки от нефтепродуктов, %	93	Н.и.*	
Эффект очистки от взвешенных веществ, %	93	Н.и.	
Скорость фильтрации, м/ч	До 25	1,0-1,5	4,0
Валовая ёмкость**, кг/м ³	130-170	4,0	4,0

Примечание: * – нет данных измерений;

** – оценивалась суммарная емкость по взвешенным веществам и нефтепродуктам.

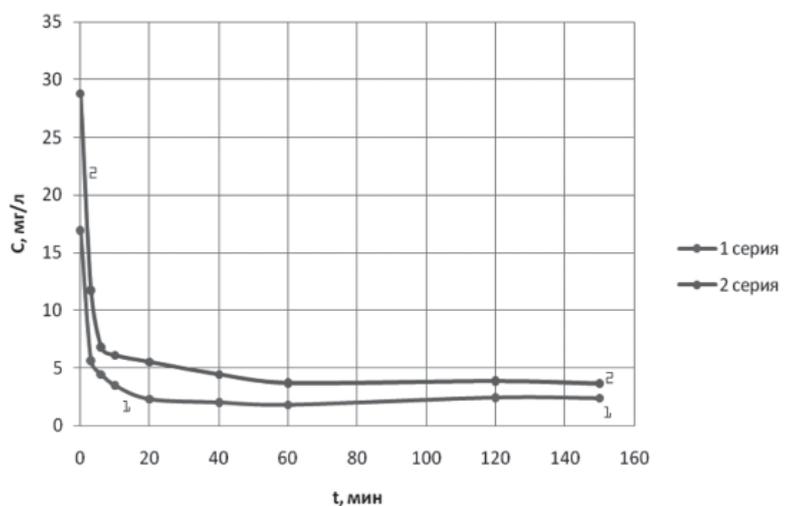


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции нефтепродуктов на пенополиуретане.

в системе раствор-сорбент, которое составило около 40 минут.

Аналогично проводились кинетические опыты на сорбентах «ЭФТ» и «Новосорб».

Лабораторное исследование кинетики сорбции на сорбенте «ЭФТ» было проведено в двух сериях. В первой серии было взято 2 фрагмента прессованного торфа общей массой 2,1 г, во второй серии был взят один фрагмент прессованного торфа размером 5,5×2,5×1,5 см и массой 2,1 г, объем раствора 400 мл, температура раствора 20 °С. Время установления состояния равновесия в обеих сериях составило приблизительно 20 мин.

Опыты на сорбенте «Новосорб» проводилась в объеме модельного раствора 400 мл, масса сорбента 3 г, фракция ≥ 1 мм, температура раствора 20 °С. Время установления равновесия в системе раствор – сорбент составило приблизительно 20 мин.

Изотермы сорбции

Методика. В 6 колб помещали навески сорбента массой m и заливали в каждую по 100 мл раствора с определенной концентрацией нефтепродуктов $C_{исх}$. Выдерживали при перемешивании в течение времени, за которое устанавливается равновесие (исходя из результатов исследования кинетики сорбции). Отбирали пробы на анализ нефтепродуктов. Анализ проб проводить на приборе «Флюорат – 02-3М». Равновесная концентрация в сорбенте определялась по формуле:

$$a = \frac{(C_o - C_p) \cdot V}{m},$$

где: $C_{исх}$ – исходная концентрация нефтепродуктов в растворе, мг/л;

C_p – концентрация нефтепродуктов по истечении равновесного времени, мг/л;

V – объем раствора, заливаемого в сорбент, л;
 m – масса навески сорбента, г.

Изотерма сорбции на полиуретане представлена на *рис. 2*, на «ЭФТ» – на *рис. 3*, на «Новосорбе» – на *рис. 4*.

Из полученных данных по кинетике и равновесию на 3 выбранных сорбентах можно сделать следующие выводы.

Пенополиуретан. 1. Изотерма сорбции на пенополиуретане в исследованном диапазоне концентраций имеет вогнутый характер, причем максимальный коэффициент распределения достигается при максимальной концентрации $C_p = 21,2$ мг/л. Равновесная величина при этой концентрации $a = 70$ мг/г. Вогнутый характер изотермы означает, что в начале процесса сорбции происходит так называемая «зарядка» фильтра, когда необходимо накопление монослоя нефтепродукта на поверхности сорбента. После накопления первоначального слоя происходит аутогезия, или «самослипание», то есть способность поглощать загрязняющие вещества за счет прочной адгезии на поверхности одного и того же вещества. В области аутогезии коэффициент распределения становится равным 3300, то есть весьма значительным.

2. Область «зарядки» наблюдается при $C_p < 14$ мг/л нефтепродукта. При больших концентрациях происходит резкое увеличение коэффициента распределения. В области аутогезии коэффициент распределения достигает величины 3300, то есть становится весьма значительным.

Особенность динамики сорбции при вогнутой изотерме заключается в наличии стадии «зарядки», когда коэффициент распределения Γ мал и отмечаются значительные проскоки на этой стадии. По данным экспериментов по измерению изотермы на стадии

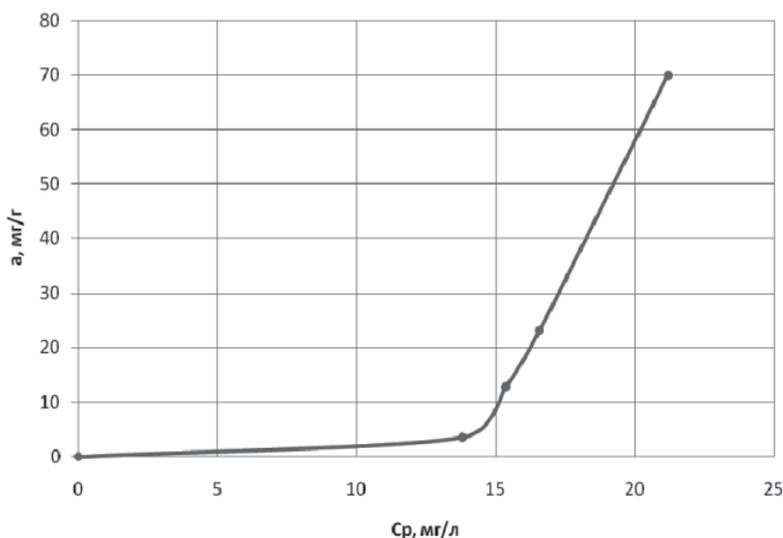


Рис. 2. Изотерма сорбции нефтепродуктов на пенополиуретане.

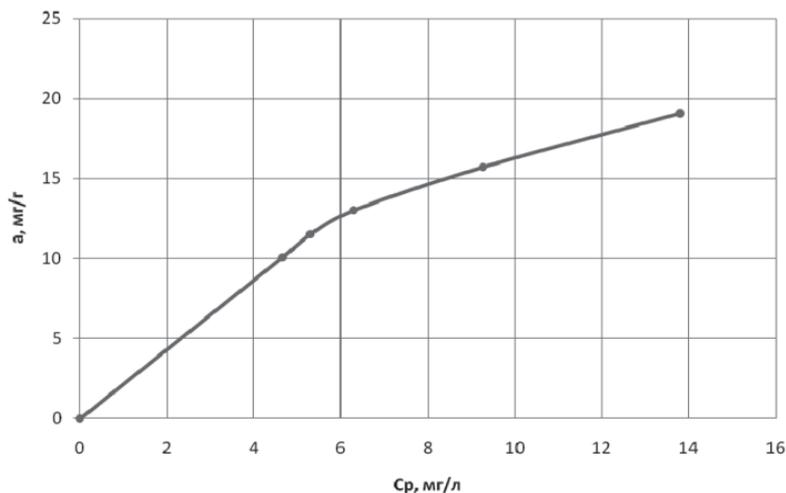


Рис. 3. Изотерма сорбции нефтепродуктов на сорбенте «ЭФТ».

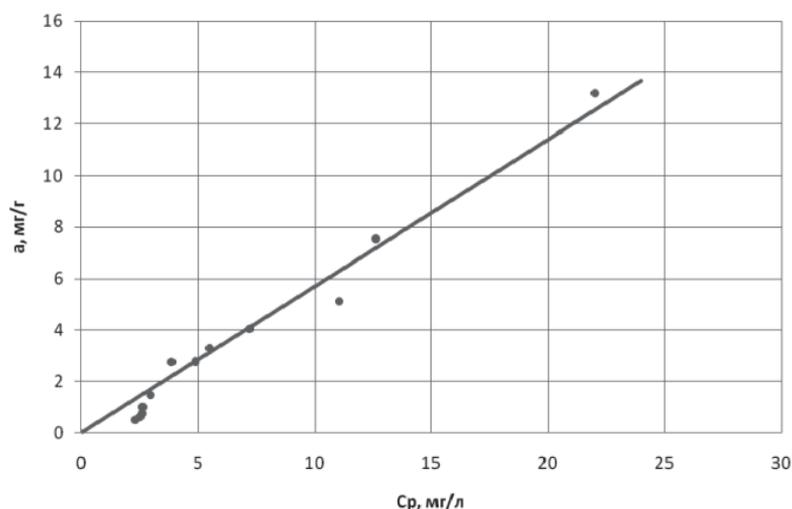


Рис. 4. Изотерма сорбции нефтепродуктов на «Новосорб».

«зарядки» величина $\Gamma = 260$. Однако затем, при переходе к стадии аутогезии, происходит значительное увеличение коэффициента распределения до 3300 и выходная концентрация резко снижается.

3. Из кривых кинетики следует отметить, что снижение концентрации нефтепродуктов в объеме раствора происходит до времени $t_p = 40$ мин, что больше, чем для двух других сорбентов (торфа и «Новосорб»), для которых $t_p = 20$ мин.

Таким образом, сорбент пенополиуретан характеризуется наличием стадии «зарядки», которая проходит, пока концентрация в фазе сорбента не достигнет величины порядка 7 мг/г. При этом возможны значительные проскоки нефтепродукта. На следующей стадии аутогезии происходит резкое увеличение коэффициента распределения Γ с 260 до 3300, что приводит к снижению проскоковой концентрации. Кинетика сорбции на пенополиуретане хуже, чем на остальных двух исследованных сорбентах.

Торфоплит 1. Изотерма сорбции на торфоплите в исследованном диапазоне концентраций имеет выпуклый характер, причем она весьма близка к линейной. Если аппроксимировать изотерму линейной, то коэффициент распределения Γ равен 1380. Это в 2,5 раза меньше, чем Γ для пенополиуретана на стадии аутогезии.

2. Кинетика сорбции для «ЭФТ» значительно лучше, чем для пенополиуретана.

Сделаем сравнительную оценку величин кинетического коэффициента для двух сорбентов – пенополиуретана и ЭФТ, исходя из внешнедиффузионной модели сорбции. Для объема раствора V и массы сорбента m условие материального баланса сорбируемого вещества имеет вид:

$$VC + ma = VC_0, \quad (1)$$

где C – концентрация в растворе в момент времени t , a – концентрация в фазе сорбента в момент времени t , C_0 – концентрация в растворе в начальный момент времени $t = 0$. Уравнение кинетики сорбции запишем для случая больших коэффициентов распределения Γ , когда можно пренебречь влиянием сорбционного торможения в сорбенте (это эквивалентно случаю прямоугольной изотермы):

$$\frac{da}{dt} = \beta C, \text{ если } a < a_0 \quad (2)$$

где a_0 – емкость сорбента.

Вместе с уравнением баланса (1) получим систему, из которой, исключая a , получим обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$-\frac{V}{m} \frac{dC}{dt} = \beta C, \text{ если } a < a_0, \quad (3)$$

решение которого при условии $C(0) = C_0$ имеет вид:

$$C = C_0 \exp(-\beta mt/V), \quad (4)$$

которое представим в виде:

$$\ln(C/C_0) = -\beta mt/V. \quad (5)$$

Используя это уравнение, из кинетических кривых (рис. 1) можно рассчитать коэффициент внешней диффузии β . Учитывая соотношение времен установления равновесия (40 мин для пенополиуретана и 20 мин для «ЭФТ»), получим:

$$\beta_{пп}/\beta_t = 40/20 = 2,$$

т.е. величина кинетического коэффициента для пенополиуретана $\beta_{пп}$ в два раза меньше β_t для «ЭФТ».

Воспользуемся данными кинетических опытов для расчета $\beta_{пп}$ и β_t . Для времени сорбции 20 мин $C = 2,6$ мг/л при $C_0 = 36,6$. Из формулы (5) при $V = 400$ мл и $m = 2,1$ г получим:

$$\beta_t = 0,41 \text{ с}^{-1}.$$

Эта величина определялась для $m = 2,1$ г, поэтому для перерасчета на 0,8 г сорбента пенополиуретана мы примем величину $0,41 \times 0,8 / 2,1 = 0,16$.

Поскольку $\beta_{пп} / \beta_t = 2$, то $\beta_{пп} = 0,08 \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, сорбент «ЭФТ» обладает емкостью в 2,5 раза меньше, чем пенополиуретан, но в два раза лучшей кинетикой сорбции.

Сорбент «Новосорб». 1. Изотерма сорбции близка к линейной, причем коэффициент распределения, равный отношению равновесных концентраций в сорбенте (измеренный в мг/г) к равновесной концентрации в растворе (измеренный в г/мл, что эквивалентно отношению г/г), равен 560.

2. Кинетика сорбции, как следует из кинетических кривых, аналогична кинетике на «ЭФТ», т.е. примерно в два раза лучше, чем на пенополиуретане.

Таким образом, сорбент «Новосорб» обладает самой малой емкостью из трех изученных сорбентов, однако обладает хорошей кинетикой сорбции, поэтому может быть использован как «финишный» сорбент в многослойном фильтре.

Математическая модель процесса двухслойного фильтра

Для выбранной системы – поверхностный сток с дорожных покрытий – лимитирующими загрязняющими веществами являются взвешенные вещества и нефтепродукты. Взвеси, в основном, снимаются предпочисткой перед поступлением на сорбционный



фильтр. Поэтому лимитирующим компонентом являются нефтепродукты.

Проведенные лабораторные исследования показали, что наиболее технологически целесообразным расположением слоев является следующий порядок: в качестве I слоя – полимерный материал пенополиуретана, обладающий самой высокой емкостью из исследованных сорбентов, в качестве II слоя – «ЭФТ», не обладающие высокой емкостью, но имеющие более высокие кинетические свойства. В качестве страховочного («финишного») сорбента следует использовать сорбент марки «Новосорб».

Рассмотрим для выявления особенностей двухслойных фильтров предельный случай – динамику при прямоугольной изотерме и лимитирующей стадии кинетики – внешней диффузии. Модель динамики сорбции при прямоугольной изотерме имеет вид:

$$v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \begin{cases} \beta C, & \text{если } a < a_0 \\ 0, & \text{если } a = a_0 \end{cases} \quad (7)$$

Здесь (6) – уравнение баланса в слое сорбента, (7) – уравнение внешнедиффузионной кинетики.

Введены следующие переменные: $C(x, t)$ – концентрация сорбируемого компонента в растворе, $a(x, t)$ – концентрация сорбируемого компонента в сорбенте (неподвижной фазе), x – координата вдоль слоя сорбента, $x = 0$ – входное сечение, t – время ($t = 0$ – начало процесса сорбции), β – внешнедиффузионный кинетический коэффициент, C_0 – концентрация сорбируемого компонента в исходном растворе, a_0 – емкость сорбента (в расчете на единицу объема слоя сорбента). Концентрации C и a зависят от координаты вдоль слоя сорбента x ($x = 0$ – входное сечение) и времени t ($t = 0$ – начало сорбции).

Прямоугольный характер изотермы проявляется в том, что поглощение вещества сорбентом происходит с постоянной скоростью до тех пор, пока не будет исчерпана емкость a_0 .

Решение этой системы выполняем при следующих условиях:

$$C(0, t) = C_0 \quad (8)$$

$$C(x, 0) = a(x, 0) = 0. \quad (9)$$

Первое условие означает, что во входное сечение слоя сорбента поступает раствор, содержащий загрязняющий компонент

с постоянной концентрацией C_0 , а второе условие – сорбент свободен от загрязняющего компонента в начальный момент времени. Решение сформулированной краевой задачи известно и имеет вид [3]:

$$\text{при } t < a_0/(\beta C_0) \quad C = C_0 \exp(-\beta x/v), \\ a = \beta t C_0 \exp(-\beta x/v) \quad (10)$$

$$\text{при } a_0/(\beta C_0) < t < a_0/(\beta C_0) + x a_0/(v C_0) \\ C = a C_0/a_0 = C_0 \exp(-\beta x/v + \beta t C_0/a_0 - 1) \quad (11)$$

$$\text{при } t \geq a_0/(\beta C_0) + x a_0/(v C_0) \\ C = C_0, \quad a = a_0 \quad (12)$$

Можно записать это решение в более простой форме, перейдя к безразмерным переменным:

$$u = \frac{C}{C_0}, \quad q = \frac{a}{a_0}, \quad X = \frac{\beta x}{v}, \quad T = \frac{a C_0}{a_0} t \quad (13)$$

Здесь u и q – безразмерные концентрации в растворе и сорбенте, X и T – безразмерные координата вдоль слоя и время. Тогда решение (5)-(7) примет вид:

$$u(X, T) = \exp(-X), \quad q(X, T) = T \exp(-X)$$

$$\text{при } 0 \leq T \leq 1$$

$$u(X, T) = q(X, T) = \exp(-X + T - 1)$$

$$\text{при } 1 \leq T < 1 + X$$

$$u(X, T) = q(X, T) = 1 \quad \text{при } T \geq 1 + X \quad (14)$$

Рассмотрим двухслойный фильтр. Первый слой состоит из сорбента с емкостью a_{01} , кинетическим коэффициентом β_1 и толщиной слоя l_1 . Второй слой состоит из сорбента емкостью a_{02} , кинетическим коэффициентом β_2 и толщиной слоя l_2 , причем $l_1 + l_2 = l$ – фиксированная толщина двух слоев.

При рассмотрении экспериментальных данных выше отмечалось, что первый сорбент (пенополиуретан) обладает на стадии аутосорбции самой высокой емкостью, однако его кинетика примерно в два раза хуже, чем у второго сорбента (торфоплиты «ЭФТ»).

Найдем ответ на вопрос: является ли двухслойный сорбент более эффективным, чем однослойный? Рассмотрим случай заполнения слоя толщиной l первым сорбентом. Поскольку по технологическим условиям слои малые, то возможна ситуация, когда уровень проскока может не отвечать требованиям глубины очистки – вследствие плохой кинетики (малости коэффициента β_1) выходная концентрация, в соответствии с (10) равная

$$C = C_0 \exp(-\beta_1 l/v),$$

Ключевые слова:

многослойный
фильтр,
сорбция,
очистка
поверхностного
стока,
нефтепродукты

может оказаться больше нормативно требуемой, которую обозначим через $C_{\text{пр}}$. Для упрощения записи требуемый уровень проскока $C_{\text{пр}}/C_0$ обозначим

$$\varepsilon = C_{\text{пр}}/C_0$$

Следовательно, в случае однослойного фильтра из пенополиуретана возможно возникновение ситуации

$$\exp(-\beta_1 l/v) > \varepsilon.$$

Если фильтр целиком заполнен II сорбентом, то поскольку $\beta_2 > \beta_1$, то условие проскока может быть выполнено, так как $\exp(-\beta_1 l/v) > \exp(-\beta_2 l/v)$.

Используем приведенные выше данные для коэффициентов: $\beta_1 = 0,08 \text{ с}^{-1}$, $\beta_2 = 0,16 \text{ с}^{-1}$.

Если слой толщиной $l = 6 \text{ см}$, ($l_1 = l_2 = 3 \text{ см}$) будет состоять только из пенополиуретана, а скорость равна $0,1 \text{ см/с}$, то уровень проскока будет равен

$$\exp(-4,8) = 0,0074$$

Если слой толщиной 6 см будет состоять только из торфоплита, а скорость равна $0,1 \text{ см/с}$, уровень проскока будет равен

$$\exp(-9,6) = 0,000054,$$

т.е. уровень проскока уменьшится в 137 раз. Однако следует учесть, что емкость «ЭФТ» значительно меньше емкости пенополиуретана. Поэтому, используя решение (14), сравним времена защитного действия для двух вариантов:

1. когда фильтр состоит только из одного второго сорбента (торфоплита) толщиной

$$l = l_1 + l_2,$$

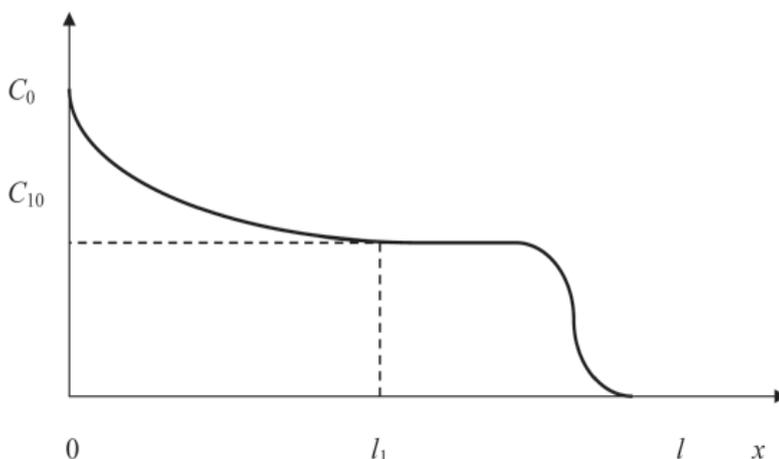


Рис. 5. Распределение концентрации $C(x, t)$ по слою для двухступенчатого фильтра.

2. когда фильтр состоит из слоя l_1 сорбента из пенополиуретана и слоя l_2 из «ЭФТ».

Для уровня проскока ε время защитного действия t_3^I для первого варианта в соответствии с решением (11) будет равно

$$t_3^I = \frac{a_{02}}{\beta_2 C_0} (1 + \ln \varepsilon) + \frac{a_{02} l}{C_0 v} \quad (16)$$

Для второго варианта на входе во второй слой поддерживается постоянная концентрация C_{10} , даваемая формулой

$$C_{10} = C_0 \exp(-\beta_1 l_1 / v) \quad (17)$$

На рис. 5 представлено распределение по слою сорбента концентраций по двум слоям фильтра.

Время защитного действия во втором случае будет даваться формулой

$$t_3^{II} = \frac{a_{02}}{\beta_2 C_{10}} (1 + \ln \frac{C_{np}}{C_{10}}) + \frac{a_{02} (l - l_1)}{C_{10} v} \quad (18)$$

Входная концентрация во второй слой определяется формулой (17).

При каком соотношении совокупности сорбционных параметров кратность изменения времен защитного действия $\tau = t_3^{II} / t_3^I$, будет больше единицы

Используя выражение (17) для C_{10} , а также полученные формулы (16) и (18), после несложных преобразований получим выражение

$$\tau = \exp X_1 \frac{1 + \ln \varepsilon + \frac{\beta_1 l_1}{v} + \frac{\beta_2 l_2}{v}}{1 + \ln \varepsilon + \frac{\beta_2 l}{v}} \quad (19)$$

Поскольку длины слоев l_1 и l_2 выбираются из условия обеспечения проскока ε , то должно выполняться условие

$$\varepsilon = \exp(-\frac{\beta_1 l_1}{v} - \frac{\beta_2 l_2}{v}) \quad (20)$$

Заменяя в формуле (19) ε по этой формуле, получим

$$\tau = \exp X_1 \frac{1}{1 + X_1 (\frac{\beta_2}{\beta_1} - 1)} \quad (21)$$

При наших условиях, т.е. при общей толщине слоя 6 см и, соответственно, при длине первого слоя (3 см), получим $X_1 = 2,4$. Поскольку $\beta_2 / \beta_1 = 2$, то по формуле (21) величина $\tau = 3,41$. Если общая толщина слоя 12 см, а толщин $l_1 = l_2 = 3$ см, то $X_1 = 4,8$ и

кратность увеличения времени защитного действия $\tau = 20,1$.

Итак, если выберем сорбенты, у которых параметры будут следующими:

$$\beta_2 = 2\beta_1, l_2 = l_1 = 3 \text{ см}, v = 0,1 \text{ см/с}$$

то выходная концентрация будет равна

$$\varepsilon = \exp(-\frac{\beta_1 l_1}{v} - \frac{\beta_2 l_2}{v}) = \exp(-7,2) = 0,00063$$

по сравнению с вариантом, когда весь слой l_1 заполнен первым сорбентом, и величина проскока $\varepsilon = \exp(-4,8) = 0,0074$. Кратность увеличения времени защитного действия по сравнению с однослойным вариантом, когда весь слой заполнен вторым сорбентом

$$\tau = 3,41.$$

Экспериментальные исследования и анализ построенных моделей позволили сделать следующие практические выводы.

- ♦ Для участков дорог с малым превышением полотна над рельефом целесообразно применять самотечные методы очистки дорожных ливневых и талых стоков с использованием дешевых и доступных сорбентов с целью предотвращения загрязнения окружающей среды нефтепродуктами и взвешьями.

- ♦ Равновесие в системе раствор – сорбент устанавливается для «Новосорба» в течение 20 мин, пенополиуретана – 40 мин и торфоплит «ЭФТ» – 20 мин. Это свидетельствует о том, что сорбент из «ЭФТ» обладает более высокими кинетическими свойствами, чем два других сорбента.

- ♦ Наибольшей сорбционной ёмкостью в изученном диапазоне концентраций обладает пенополиуретан, однако он имеет худшую кинетику, чем «ЭФТ».

- ♦ Использование двухслойного фильтра с первым слоем из пенополиуретана и вторым слоем из «ЭФТ» является более эффективным, чем использование одного сорбента. Двухслойный фильтр обеспечивает более высокое время защитного действия при заданных требованиях к глубине очистки.

- ♦ При очистке реальных талых стоков на трехслойном сорбционном фильтре обеспечивается снижение концентрации нефтепродуктов в 44 раза, а также удаление взвешенных веществ и понижение рН.

Реализация технологии многослойного фильтрации в реальных условиях

Основываясь на полученных рекомендациях, был разработан и реализован проект локальных очистных сооружений для одного из участков автодороги М-18 общего пользования федерального значения «Кола» Санкт-

Таблица 2

Расчетные параметры дождевого и талого стока с дорожного полотна

Площадь водосбора, га	Расчетное годовое количество дождевых вод, м ³	Расчетное годовое количество талых вод, м ³	Расчетный расход дождевых вод, л/с	Расчетный расход талых вод, л/с
1,2	3254,4	907,2	3,9	7,2

Таблица 3

Ожидаемый уровень загрязнения дождевого и талого стока и требуемые параметры очищенного стока

Загрязняющее вещество	Расчетный дождевой сток, мг/л	Расчетный талый сок, мг/л	Требуемый уровень очищенного дождевого стока, мг/л	Требуемый уровень очищенного талого стока, мг/л
Взвешенные вещества	780,0	1620,0	3,0	3,0
Нефтепродукты	14,4	15,6	0,05	0,05

Петербург – Петрозаводск – Мурманск – Печенга – Борисоглебский (граница с Норвегией). С водосборной поверхности дорожного полотна длиной 1200 м и шириной 10 м, общей площадью 1,2 га предусмотрен отвод дождевых и талых стоков и их очистка.

В табл. 2 представлены расчетные параметры стока с дорожного полотна:

В табл. 3 представлен ожидаемый уровень загрязнения дождевого и талого стока и требуемые параметры очищенного стока, соответствующие ПДК_{хоз-быт}:

Расчет количества задержанных за сезон загрязнений. С учетом данных табл. 2 и 3 рассчитано годовое количество задержанных взвешенных веществ:

- ◆ дождевой сток – $3254,4 \text{ м}^3 \times (780,0 - 3,0) \text{ мг/л} = 2513,6 \text{ кг}$;
- ◆ талый сток – $907,2 \text{ м}^3 \times (1620,0 - 3,0) \text{ мг/л} = 185,63 \text{ кг}$;
- ◆ всего – 2699,23 кг.

С учетом данных табл. 2 и 3 рассчитано годовое количество задержанных нефтепродуктов:

- ◆ дождевой сток – $3254,4 \text{ м}^3 \times (14,40 - 0,05) \text{ мг/л} = 46,47 \text{ кг}$;
- ◆ талый сток – $907,2 \text{ м}^3 \times (15,6 - 0,05) \text{ мг/л} = 14,05 \text{ кг}$;
- ◆ всего – 60,52 кг.

Для обеспечения нормальных условий работы сорбционного фильтра предусмотрены сооружения предочистки – решетка-песколовка и намывной фильтр.

Из опыта эксплуатации локальных очистных сооружений дождевых и талых вод в условиях Карелии (на загородных и городских АЗС) оценена эффективность песколовки горизонтального типа – 45-60 %, в среднем 50 %.

Аналогично оценен эффект задержания нефтепродуктов в песколовке – 25 %.

После песколовки стоки поступают на намывной и далее на сорбционный фильтр. Габариты намывного фильтра в плане соответствуют габаритам сорбционного фильтра и составляют $1,1 \times 2,1 = 2,31 \text{ м}^2$. Работа фильтра в режиме намывного обеспечивается за счет укладки по поверхности сорбента пленки из нетканого пористого материала.

На пленке задерживаются взвешенные вещества, прошедшие песколовку. Пленка «работает» как экран и обеспечивает съем до 50 % взвешенных веществ и до 30 % нефтепродуктов.

Остаточные концентрации нефтепродуктов после песколовки ($\Xi = 25 \%$) и пленки из нетканого пористого материала ($\Xi = 30 \%$) составят:

- ◆ от дождевого стока – 7,56 мг/л ($14,40 \text{ мг/л} \times 0,75 \times 0,7$);
- ◆ от талого стока – 8,19 мг/л ($15,6 \text{ мг/л} \times 0,75 \times 0,7$).



Таблица 4

Технологические характеристики сорбционных материалов

Показатели	«ППРТН»	«ЭФТ»	«Новосорб»
Скорость фильтрации, м/ч	до 25,0	до 5,0	до 4,0
Объемный вес, г/см ³	0,05	0,25	0,12
Потери напора за ф/цикл, см	0,003 м на 1 см фильтр. слоя	0,002 м на 1 см фильтр. слоя	0,002 м на 1 см фильтр. слоя
Грязеемкость по нефтепродуктам, кг/кг	33,0	13,8	5,6
Концентрация в очищенной воде:			
нефтепродукты	до 10,0	0,3	0,05
взвешенные вещества	до 10,0	10,0	3,0

Таблица 5

Сорбционная емкость материалов многослойного сорбционного фильтра по нефтепродуктам

№№	Показатели	«ППРТ»	«ЭФТ»	«Новосорб»	Итого
1	Удельная сорбционная емкость, кг/кг	33,0	13,8	5,6	
2	Объем сорбента, м ³	0,185	0,462	0,347	0,994
3	Объемный вес, кг/м ³	0,050	0,250	0,120	
4	Вес сорбента, кг	0,010	0,116	0,042	
5	Сорбционная емкость в объеме фильтра, кг	0,33	1,60	0,235	2,165

Годовое количество нефтепродуктов, поступающих на сорбционные фильтры, составит (с учетом работы песколовки и намывных фильтров):

- ◆ дождевой сток – $3254,4 \text{ м}^3 \times (7,56 - 0,05) \text{ мг/л} = 24,44 \text{ кг}$;
- ◆ талый сток – $907,2 \text{ м}^3 \times (8,19 - 0,05) \text{ мг/л} = 7,38 \text{ кг}$;
- ◆ всего – 31,82 кг.

Сорбционный многослойный фильтр. В качестве загрузки многослойного сорбционного фильтра были использованы исследованные выше материалы:

- ◆ полимерный материал пенополиуретан «ППРТ»;
- ◆ органический материал торфоплиты «ЭФТ»;
- ◆ минеральный сорбент «Новосорб».

Между слоем сорбента из торфоплит и слоем сорбента «Новосорб» укладывается дополнительный слой пенополиуретана толщиной 10 мм в целях предотвращения загрязнения последнего мелкими частичками торфа. Такой же толщины пенополиуретановый ковер служит в качестве дренажа. Технологические параметры сорбентов представлены в *табл. 4*.

Требуется задержать за год 31,82 кг нефтепродуктов (с учетом эффекта задержания на песколовке и намывном фильтре). Макси-

мально допустимая высота придорожных ЛОС – 0,5 м (по топографическим ограничениям), рассчитанная скорость фильтрации равна 3,8 м/ч.

Для удобства изготовления, транспортировки, монтажа и сервисного обслуживания принимаются следующие размеры сорбционного фильтра:

$$1,1 \text{ м} \times 2,1 \text{ м} = 2,31 \text{ м}^2.$$

По конструктивным соображениям и условиям поставки сорбционных материалов толщина слоев принимается равной:

- ◆ пенополиуретан «ППРТ» – 8 (6+2) см;
- ◆ торфоплиты «ЭФТ» – 20 см;
- ◆ «Новосорб» – 15 см.

В этом случае объем каждого из слоев сорбентов будет равен:

- ◆ пенополиуретан «ППРТ» – $2,31 \text{ м}^2 \times 0,08 \text{ м} = 0,185 \text{ м}^3$;
- ◆ торфоплиты «ЭФТ» – $2,31 \text{ м}^2 \times 0,2 \text{ м} = 0,462 \text{ м}^3$;
- ◆ «Новосорб» – $2,31 \text{ м}^2 \times 0,15 \text{ м} = 0,360 \text{ м}^3$.

Сорбционные емкости материалов такого объема представлены в *табл. 5*.

Исходя из представленных расчетов, для очистки за год 31,82 кг нефтепродуктов потребуется 15 перезагрузок сорбента, т.е. примерно один раз в полмесяца безснежного периода.



Увеличение межрегенерационного периода процесса сорбционной очистки до 1 месяца на придорожных ЛОС может быть достигнуто за счет увеличения в 2 раза числа секций сорбционных фильтров.

Заключение

Разработан самотечный метод очистки дорожных ливневых и талых стоков с использованием дешевых и доступных сорбентов на многослойных фильтрах с тонкими слоями.

Исследованы равновесие и кинетика сорбции растворенных в воде нефтепродуктов для выбранных сорбентов пенополиуретан, торфоплиты «ЭФТ» и «Новосорб». Рассчитаны кинетические коэффициенты и емкости сорбентов. Наибольшей сорбционной ёмкостью в изученном диапазоне концентраций обладает пенополиуретан, однако он имеет меньшую емкость, чем торфоплит. Сорбент «Новосорб» обладает меньшей из всех сорбентов емкостью (на единицу массы) и самым высоким значением кинетического коэффициента.

Разработан и обоснован порядок расположения сорбентов в следующем порядке по потоку: пенополиуретан, торфоплиты «ЭФТ» и «Новосорб».

Разработана математическая модель многослойного фильтра, апробированная в лабораторных условиях. Теоретически обосновано, что многослойный фильтр в условиях малых толщин в несколько раз эффективнее однослойного.

Разработан и реализован проект локальных очистных сооружений для одного из участков автодороги М-18 «Кола» с использованием многослойного самотечного фильтра небольшой толщины. Разработан регламент обслуживания.

Авторы выражают благодарность И.В. Хафизовой – студентке ГБОУ ВПО Московской области Международного университета природы, общества и человека «Дубна» за помощь в экспериментальной работе

Литература

1. СНиП 2.05.02-85 Автомобильные дороги.
2. Золотов Ю.А. Основы аналитической химии / Ю.А. Золотов, Е.Н. Дорохова, В.И. Фадеева. М.: Высшая школа, 2002. Кн. 1, 351 с.
3. Веницианов Е.В. Динамика сорбции из жидких сред / Е.В. Веницианов, Р.Н. Рубинштейн. М.: Наука. 1983. 240 с.

E.V. Venitsianov, E.O. Grafova, R.I. Ayukaev, T.A. Chudnova

USING MULTI-LAYER SORPTION FILTERS FOR CONTAMINATION PREVENTION OF HIGHWAY WATER CONSERVATION ZONES

Developed gravity-flowing method for cleaning of highway storm and snowmelt runoffs is based on inexpensive and available sorbents applied on multi-layer filters containing roamed polyurethane, peat slab and «Novosorb» slices. Characteristics of water-dissolved oil-products sorption were studied. Materials are in increasing capacity: roamed polyurethane, peat slab, «Novosorb». The sorption kinetics order of materials is reverse. Used sorbent sequence (roamed polyurethane, peat slab and «Novosorb») was proved. Modeling analysis showed that multi-layer filter is more effective (several times) than one-layer. Water treatment scheme using multi-layer sorption filter of shallow thickness was developed and realized for highway fragment M-18 «Kola».

Key words: multi-layer filter, sorption, cleaning of surface runoff, oil-products