

- 16.10.2012. – Режим доступа: <http://mashportal.ru/career-26813.aspx>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Гостеев Ю.А., Федоров А.В. Математическое моделирование спекания ультрадисперсного порошка // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 2. – с. 42 – 44.
 3. Kamnis S., Gu S., Lu T.J., Chen C. Computational simulation of thermally sprayed WC-Co powder // Computational materials science. – 2008. – Vol. 43. – P. 1172–1182.
 4. Савицкий А.П. Многоуровневое моделирование объемных изменений двухкомпонентных порошковых тел при спекании // Журн. техн. физики. – 2010. – Т. 80, вып. 3. – с. 63 – 68.
 5. Чистякова Т.Б., Корниенко И.Г., Орданьян С.С., Фищев В.Н., Полосин А.Н. Программный комплекс для имитационного моделирования процессов спекания в высокотехнологичных керамических производствах // Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 184-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ). – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2012. – с. 149 – 150.
 6. Корниенко И.Г. и др. Математическая модель для исследования усадки керамических материалов при диффузионном спекании // Неделя науки – 2013: сб. тез. III науч.-техн. конф. молодых ученых СПбГТИ(ТУ), 2–4 апр. 2013 г. – СПб. : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2013. – с. 166 – 167.
 7. Чистякова Т.Б., Бойкова О.Г., Чистяков Н.А. Интеллектуальное управление многоассортиментным коксохимическим производством. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2010. – 187 с.
 8. Чистякова Т.Б. и др. Интеллектуальные системы технологического проектирования, управления и обучения в многоассортиментном производстве гранулированных пористых материалов из тонкодисперсных частиц. – СПб. : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2012. – 324 с.

Математическое моделирование процесса регенерации зернистого фильтрующего материала от нефтепродуктов

Иванова А.А., Станиславская Ю.С., д.т.н. проф. Булатов М.А., Хаддад Дж.
Университет машиностроения
8 (499) 267-19-73
sashai0307@yandex.ru

Аннотация: Статья посвящена математическому моделированию процесса регенерации зернистого фильтроматериала от нефтепродуктов водным раствором ПАВ. Процесс регенерации производился в лабораторных условиях. Экспериментальные данные, характеризующие макрокинетику регенерации фильтра, были получены исходя из накопления частиц нефтяных фракций, выносимых из фильтра промывной жидкостью. По этим данным была построена кинетическая кривая изменения во времени средней толщины пленки загрязнения.

Ключевые слова: *поверхностно-активные вещества, скорый фильтр, поверхностное натяжение, модуль упругости пленки, явление Марангони, водонефтяные эмульсии*

Введение

Процесс регенерации зависит в первую очередь от того, что по своей природе представляет собой загрязняющее вещество, и от того, каким образом оно закреплено на поверхности зернистого материала. Механизм образования загрязняющего вещества на зерне фильтроматериала полностью не изучен и при различных условиях фильтрации происходит по-разному. Нефтепродукты сточных вод представляют собой смесь фракций нефти, образовавшихся при работе оборудования предприятия или автотранспорта. Нефтепродукты поступают на очистные сооружения в эмульгированном, деэмульгированном состоянии и сорбированные на частицах. Для удаления нефтепродуктов из очищаемой воды используются отстойники, оборудованные нефтеловушками. Часть нефтепродуктов из отстойников попадает

в фильтры, где сорбируется на поверхности зерен фильтрующего материала и образует прочную пленку, которая снижает эффективность работы аппарата. Для интенсификации процесса удаления нефти из загрузки фильтра необходимо применять реагентную промывку. Реагентная промывка происходит не только за счет вымывания загрязняющего вещества из межзернового пространства фильтрующего слоя, но и за счет разрушения непосредственно на поверхности зерна фильтроматериала [6].

В качестве реагента используется вещество природного происхождения – гуммиарабик (далее GA 100). Гуммиарабик – полисахарид, обладающий эмульгирующими и стабилизирующими свойствами. Широко применяется в пищевой и непищевой промышленности. В основу регенерации раствором GA100 положена задача активного воздействия на отработанный фильтрующий материал, загрязненный нефтепродуктами [2].

Моющее действие GA100 проявляется в удалении жидких и твердых загрязнений с поверхности и переводе их в моющую жидкость в виде растворов или дисперсий. Молекулы GA100 создают на поверхности капель нефти прочные адсорбционные слои. Гидрофобная часть молекулы связывается с нефтью, а гидрофильная – ориентируется в сторону водного раствора. При этом происходит гидрофилизация капель нефти, что препятствует их коалесценции (слиянию).

Введение в систему «нефтепродукт – фильтрующий материал» поверхностно-активного вещества вызывает локальные уменьшения пленки нефтепродукта в точке ввода ПАВ и ее утолщения по радиусу. Такое поведение веществ называется явлением Марангони. Явление Марангони используется в технологии для улучшения массообменных процессов.

Критическая величина касательного напряжения для создания условий отрыва капли нефтепродукта должна превышать модуль упругости его пленки [3]:

$$\tau_B a^2 > E_m a, \quad (1)$$

где E_m – модуль упругости пленки нефтепродукта (Па), a – характерный размер частиц, радиус (м). Таким образом:

$$\mu W_m \frac{a}{h(t)} \geq \sigma_{c-n},$$

где σ_{c-n} – поверхностное натяжение на границе «регенерирующая среда – нефтепродукт».

Сравнение τ_B с σ_{c-n} связано с тем, что именно σ_{c-n} является параметром, определяющим величину значения работы по отделению загрязняющего вещества от твердой поверхности. Для оценки снижения поверхностного напряжения вводится следующий критерий:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{c-n}}{\sigma_{b-n}}, \quad (2)$$

где k_σ – величина, показывающая во сколько раз снижается поверхностное натяжение на границе «вода – нефтепродукт» при введении в систему раствора ПАВ,

σ_{b-n} – поверхностное натяжение на границе «вода – нефтепродукт»,

σ_{c-n} – поверхностное натяжение на границе «ПАВ – нефтепродукт».

Поскольку качество и скорость регенерации зависят от снижения поверхностного натяжения фильтрующего материала, то константу регенерации можно представить в следующем виде:

$$k_r = k_\sigma \zeta, \quad (3)$$

где ζ – величина, зависящая от природы и состояния поверхности фильтрующей загрузки. Поскольку ζ – постоянная величина для конкретной системы НП – ФМ, а k_σ зависит от $\sigma_{ПАВ}$, то, найдя k_r , можно регулировать и прогнозировать процесс, изменяя состав и температуру регенерационного раствора, концентрацию активного вещества.

Построение математической модели регенерации

Выразим процесс регенерации зернистого фильтрующего материала через массу удаляемого нефтепродукта в объем регенерирующего раствора.

При регенерации концентрация извлекаемого вещества в регенерирующей среде прямо пропорциональна концентрации загрязняющего вещества (нефтепродукта) в фильтрующей загрузке:

$$C_{PC} = kC_{\Phi 3} = \frac{km}{V_{\Phi 3}}, \quad (4)$$

где C_{PC} – концентрация загрязняющего вещества в регенерирующей среде, кг/м³;

$C_{\Phi 3}$ – концентрация загрязняющего вещества в фильтрующей загрузке;

k – коэффициент пропорциональности, определяющий степень регенерации;

m – масса загрязняющего вещества (нефтепродуктов) в фильтрующей загрузке, кг;

$V_{\Phi 3}$ – объем фильтрующего материала, м³.

Коэффициент k может характеризовать степень извлечения загрязняющего вещества из фильтрующей загрузки.

Рассмотрим приращение концентрации нефтепродуктов в растворе:

$$\tau + d\tau, C_{PC} + dC_{PC}, m + dm.$$

Тогда согласно [5]:

$$C_{PC} + dC_{PC} = \frac{k(m - dm)}{V_{\Phi M}}. \quad (5)$$

Раскрыв скобки и сократив равнозначные члены уравнения, получим выражение:

$$dC_{PC} = -\frac{kdm}{V_{\Phi M}}, \quad (6)$$

тогда приращение массы равно:

$$dm = -\frac{V_{\Phi M}}{k} dC_{PC}. \quad (7)$$

Также масса нефтепродукта может быть выражена следующим образом:

$$dm = C_{PC} W d\tau, \quad (8)$$

где W – скорость потока регенерирующего раствора, м³/кг, $d\tau$ – текущее время.

Введем объемную скорость потока регенерирующего раствора A , равную отношению объемной скорости к площади поперечного сечения фильтрующей загрузки F , м²: $A = W/F$.

Получим:

$$dm = C_{PC} A F d\tau.$$

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} dm = -\frac{V_{\Phi M}}{k} dC_{PC}, \\ dm = C_{PC} A F d\tau. \end{cases}$$

Выразим:

$$\frac{dC_{PC}}{C_{PC}} = -\frac{W d\tau}{V_{\Phi M}/k}.$$

Проведя ряд сокращений, получим выражение:

$$\frac{dC_{PC}}{C_{PC}} = -\frac{kd\tau}{t},$$

где $t = V_{\text{ФМ}}/W$ – время пребывания регенерирующего раствора в объеме фильтрующей загрузки;

$$\frac{dC_{PC}}{d\tau} = -k \frac{C_{PC}}{t}, \quad (9)$$

с учетом начальных и граничных условий $C = C_{\text{ФЗ}}$ при $t = 0$, $C = C_{PC}$ при $t = t^*$;

$$C_{PC} = C_{\text{ФЗ}} \exp(-kt/t^*), \quad (10)$$

где t^* – характеристический масштаб времени регенерации, $t^* = 20$ с.

Принимая во внимание, что отношение изменения толщины пленки на зерне связано с отношением изменения концентрации и массы нефтепродукта в объеме фильтрующего материала:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{C_{PC}}{C_{\text{ФМ}}} = \frac{m}{m_0},$$

получаем, что уравнение (10) может быть с достаточной степенью точности преобразовано в уравнение [3]:

$$h_{PC} = h_{\text{ФЗ}} \exp(-kt/t^*). \quad (11)$$

Для проверки математической модели проведены эксперименты по регенерации загрязненной пробы кварцевого песка газойлем в динамических условиях.

Экспериментальное исследование

Объекты исследования:

- Фильтрующий материал – кварц фракционированный, ТУ 57126-002-45588031– 01%, $d_3=5 \cdot 10^{-4}$ м, $\rho=1500$ кг/м³;
- Реагент – гуммиарабик, марка Agrigum Spray R-E;
- Растворитель – дистиллированная вода, ГОСТ 6709-72;
- Нефтепродукт – газойль, $\rho=873,4 - 953,3$ кг/м³.

В качестве регенерирующих растворов использовались 1% водный раствор GA100 и дистиллированная вода [1].

Загрязненные пробы фильтрующего материала помещали в конические колбы, две из которых заливали раствором GA100 и одну дистиллированной водой. Регенерацию проводили на аппарате для встряхивания АБУ – 6С в течение 80 минут при 125 колебаниях в минуту. Выбранная частота являлась резонансной, не выпускающей фильтрующий материал из-под слоя регенерирующего раствора и воды. Таким образом, достигалась имитация водной промывки в промышленных аппаратах. По окончании времени регенерации растворы отфильтровали через сито.

Анализ концентрации нефтепродуктов в промывном растворе

Флуориметрический метод измерений массовой концентрации НП основан на их экстракции нефтепродуктов из пробы гексаном и измерении интенсивности флуоресценции полученного экстракта на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02» с последующим автоматическим вычислением концентрации НП при помощи градуировочной зависимости, заложенной в память анализатора [7]. Результаты флуориметрического исследования представлены в таблице 1.

По результатам анализа можно сделать вывод, что применение раствора GA100 увеличивает выход НП из кварцевого песка на 60% по сравнению с промывкой дистиллированной водой.

Результаты флуориметрического исследования

Раствор + НП	$m_{к+г}$ – до регенерации, г	Концентрация НП, $C_{нп,1}$, мг/дм ³	Проницаемость, T %
Дистилл. вода	56,3108	5,08	97,8
Раствор № 1, 1% GA	60,2370	8,15	95,8
Раствор № 2, 1% GA	57,5552	6,57	97,7

На рисунке 1 приведена построенная по уравнению (10) кинетическая кривая удаления нефтепродуктов с поверхности фильтрующей загрузки при величине $k_T=0,035$.

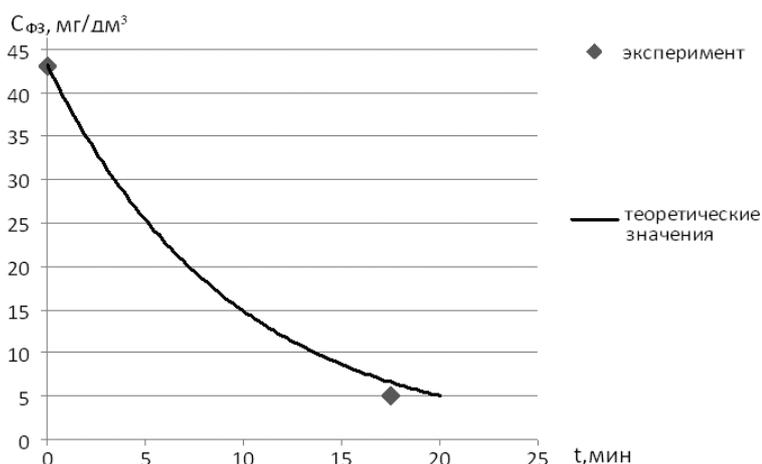


Рисунок 1. Кинетика удаления нефтепродуктов из фильтрующей загрузки:

$C_{Фз}$ – концентрация нефтепродуктов в фильтрующей загрузке, мг/дм³,

t – время регенерации, мин.

Выводы

Показано, что различие между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 10%, что подтверждает правомерность теоретических представлений о механизме регенерации и возможность управления процессом регенерации зернистого фильтрующего материала от нефтепродуктов с помощью математической модели.

Литература

1. Беренгартен М.Г., Булатов М.А., Хаддад Дж. Подготовка водных растворов гуммиарабика для использования в пищевой промышленности//Вода: химия и экология, 2008, №4 с.17 – 25.
2. Гуммиарабик. Функциональные свойства. <http://www.agrigum.ru/gum-funk/gum-funk.htm>.
3. Еремеев Б.Б. Регенерация механических фильтров в процессах очистки нефтезагрязненных сточных вод: Дис. ... канд. тех. наук. –М.: МГУИЭ, 2003.
4. Забарный Г.Н. Математические модели теплопереноса при фильтрации в теплоизолированной проницаемой среде – Петропавловск-Камчатский: Новость,1992. – 57 с.
5. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по дифференциальным уравнениям. Точные решения. –М.: Факториал, 1997.- 303 с.
6. Иванова А.А., Булатов М.А. Применение гуммиарабика в моющих композициях ПАВ// Известия МГТУ «МАМИ», 2012. – № 2(14), т. 4
7. Методика выполнения измерений массовой концентрации в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02». ПНД Ф 14.1:2:4.128-98. М.: 1998. Издание 2002 г.