

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.И. Истомин, канд. техн. наук, доцент,

Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-техническими задачами. Вопросы охраны окружающей среды в последнее десятилетие выдвинулись в число важнейших задач человечества. В процессе нормальной эксплуатации энергетической установки образуются нефтесодержащие воды вследствие протечек воды и нефтепродуктов из трубопроводов, арматуры, теплообменных аппаратов, насосов, при ремонте. Кроме того, нефтесодержащие воды образуются при промывке двигателей машин, топливных масляных танков, а также в результате аварийных протечек [1].

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Существующие в настоящее время сепарационные установки для очистки нефтесодержащих вод, как правило, не удовлетворяют современным требованиям. Одни не обеспечивают необходимого качества очистки, другие имеют малый ресурс работы и большие габариты, третьи сложны в изготовлении и эксплуатации [2]. Большими возможностями повышения эффективности работы обладают коалесцирующие элементы, имеющие нежесткую структуру, к которым можно отнести фильтры с гранулированной коалесцирующей загрузкой.

Цель исследований. Исследование очистной способности сепарационной установки с гранулированной коалесцирующей загрузкой, которая позволяет производить регенерацию фильтрующей загрузки в режиме псевдооживления гранул без разборки и замены фильтроэлемента, а также разработка математической модели процесса очистки нефтесодержащих вод в объеме гранулированной загрузки.

Результаты исследований. Для исследования процесса очистки нефтесодержащих вод в объеме гранулированной загрузки запишем уравнение движения капли нефтепродукта в объеме гранул:

$$m \frac{d\bar{U}}{dt} = \bar{F}_\Pi + \bar{F}_c + \bar{F}_y + \bar{F}_{ад} + \bar{F}_M + \bar{F}_3 + \bar{F}_B, \quad (1)$$

где m – масса частицы дисперсной фазы нефтеводяной эмульсии;

$\bar{U}$ – скорость движения частицы дисперсной фазы нефтеводяной эмульсии;

$\bar{F}_\Pi$ – подъемная сила;

$\bar{F}_c$ – сила гидравлического сопротивления движению частицы дисперсной фазы нефтеводяной эмульсии;

$\bar{F}_y$ – сила гидравлического увлечения капли нефтепродукта потоком эмульсии;

$\bar{F}_{ад}$ – сила адгезионного воздействия капель нефтепродукта с гранулами загрузки;

$\bar{F}_M$ – сила межмолекулярного притяжения;

$\bar{F}_3$ – сила электростатического отталкивания;

$\bar{F}_B$ – сила взаимодействия капель нефтепродукта с гранулами.

На процесс очистки нефтесодержащих вод в объеме гранулированной загрузки существенное влияние оказывают физико-химические свойства нефтеводяной эмульсии, гранулированной загрузки, условия движения эмульсии. Для учета этого влияния в выражение (1) введена сила взаимодействия гранул загрузки с частицами дисперсной фазы нефтеводяной эмульсии $\bar{F}_B$, которая является функцией следующих величин:

$$F_B = -k \frac{\sigma_{нв} \cdot U \cdot d^3}{\nu_n \cdot d_\Gamma} K_{вх}, \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности;

ν_n – кинематическая вязкость нефтепродукта в эмульсии;

$\sigma_{нв}$ – поверхностное натяжение на границе нефть-вода;

U – скорость нефтеводяной эмульсии;

d – диаметр частиц дисперсной фазы нефтеводяной эмульсии;

d_r – диаметр гранул;

$K_{\text{вх}}$ – объемная концентрация нефтепродуктов в исходной эмульсии.

На основании всестороннего анализа сил [3], действующих на частицы дисперсной фазы нефтеводяной эмульсии в поровых каналах гранулированной коалесцирующей загрузки, можно записать уравнение равновесия сил в следующем виде:

$$\frac{1}{6} \pi d^3 \rho_n \frac{d^2 \bar{h}}{dt^2} = \frac{1}{6} \pi d^3 \Delta \rho \bar{q} + 3 \pi \mu_v d \frac{d\bar{h}}{dt} j(x) + k \lambda \frac{\pi \cdot l \cdot \bar{q}^2 \rho_n d_r}{8 \cdot S^2} + 2 \pi \bar{\sigma}_{\text{нв}} d + k \frac{\bar{\sigma}_{\text{нв}} d^3 K_{\text{вх}}}{v_n \cdot d_r} \frac{d\bar{h}}{dt}, \quad (3)$$

где ρ_n – плотность нефтепродуктов;

h – расстояние между каплями нефтепродукта и гранулой;

$\Delta \rho$ – разность плотностей воды и нефтепродукта;

μ_v – динамическая вязкость воды;

λ – коэффициент Дарси, устанавливает потери на трение по длине;

l – высота слоя гранул;

q – удельный расход эмульсии;

S – пористость гранулированной загрузки;

$$j(x) = 3 + \frac{3}{2x} - \frac{1}{2x(x+1)} - 3(x+1) \ln \left(1 + \frac{1}{x} \right);$$

$$x = 2h / d.$$

Полученное уравнение (3) – нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка. Найти его точное решение только аналитическим методом не представляется возможным ввиду сложности и многофакторности процессов, происходящих в двухкомпонентной неоднородной жидкости, поэтому используем уравнение (3) для определения факторов, влияющих на эффективность очистки нефтесодержащих вод. За параметр оптимизации принимаем концентрацию нефтепродуктов в очищенной воде после слоя гранул $K_{\text{вых}}$, которая будет функцией следующих факторов:

$$K_{\text{вых}} = f(d, \rho_n, \Delta \rho, \mu_v, \lambda, l, q, d_r, S, v_n, \sigma_{\text{нв}}, U, K_{\text{вх}}). \quad (4)$$

Исходя из требований регрессионного анализа, а также с целью упрощения математической модели, исключены линейно зависимые факторы. Тогда уравнение (4) можно записать в следующем виде:

$$K_{\text{вых}} = f(l, q, d_r, K_{\text{вх}}). \quad (5)$$

После проведения экспериментальных исследований процесса очистки нефтесодержащих вод в объеме гранулированной коалесцирующей загрузки в соответствии с планом экспериментов получена математическая модель на основе уравнения регрессии:

$$K_{\text{вых}} = 139,7 - 91,5x_1 + 84,7x_2 + 78,6x_3 + 51,0x_4 + 50,3x_1^2 + 24,8x_2^2 + 29,3x_3^2 + 4,3x_4^2 - 1,2x_1x_2 - 4,1x_1x_3 - 2,3x_1x_4 + 34,3x_2x_3 + 11,6x_2x_4 + 7,9x_3x_4. \quad (6)$$

Значение факторов в точках плана экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения факторов в точках плана экспериментов

Переменные	Значения факторов в кодированной системе координат	(x_1) l, м	(x_2) q, м/ч	(x_3) $d_r \cdot 10^3$, м	(x_4) $K_{\text{вх}} \cdot 10^{-3}$, млн ⁻¹
Верхний уровень	+	1,0	4,0	4,0	250
Основной уровень	0	0,6	2,5	2,5	130
Нижний уровень	-	0,2	1,0	1,0	10
Интервал варьирования		0,4	1,5	1,5	120

Проверку полученной математической модели на адекватность производим по критерию Фишера [4], которая показала, что полученное уравнение регрессии (6) адекватно описывает процесс очистки нефтесодержащих вод в объеме гранулированной коалесцирующей загрузки. Необходимость учитывать двойные и квадратичные взаимодействия факторов свидетельствует о сложности процессов, протекающих в неоднородной двухкомпонентной жидкости.

Из анализа уравнения регрессии видно, что наиболее существенное влияние на процесс очистки нефтесодержащих вод в объеме гранулированной загрузки оказывает высота слоя гранул, с увеличением которой

качество очистки повышается. Причем при увеличении высоты слоя гранул от 0,2 до 0,6 м концентрация нефтепродуктов в очищенной воде уменьшается на 160 млн^{-1} , а при таком же увеличении высота слоя гранул от 0,6 до 1,0 м концентрация нефтепродуктов в очищенной воде уменьшается только на 40 млн^{-1} , то есть увеличении высоты слоя гранул более 0,6 м снижение концентрации нефтепродуктов в очищенной воде замедляется. Отсюда можно сделать вывод о том, что для оптимизации процесса очистки целесообразно использовать фильтроэлементы с высотой слоя гранул не более 0,6 м. Для достижения более глубокой степени очистки нефтесодержащих вод необходимо применять последовательное соединение нескольких фильтроэлементов с высотой слоя гранул не более 0,6 м, а не один фильтроэлемент с большой высотой, так как в первом случае производится промежуточное удаление отсепарированных нефтепродуктов, что повышает качество очистки.

Вторым, по значимости, фактором, влияющим на качество очистки нефтесодержащих вод, является удельный расход нефтесодержащих вод через слой гранул, с увеличением которого очистная способность фильтроэлементов с гранулированной загрузкой падает. При увеличении удельного расхода более $2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ наблюдается более резкое падение очистной способности, что необходимо учитывать при проектировании нового фильтрующего оборудования.

Третьим, по значимости, фактором (уравнение 6), влияющим на качество очистки нефтесодержащих вод в фильтроэлементах с гранулированной загрузкой, является диаметр гранул, с увеличением которого качество очистки нефтесодержащих вод падает. Причем, если при увеличении диаметра гранул загрузки с 1,0 до 2,5 мм наблюдается увеличение концентрации нефтепродуктов в очищенной воде на 40 млн^{-1} , то при таком же увеличении диаметра гранул 2,5 до 4,0 мм наблюдается увеличение $K_{\text{вых}}$ уже на 100 млн^{-1} . В связи с этим при проектировании нового фильтрующего оборудования является нецелесообразным применение гранул диаметром более 2,5 мм.

Также существенное значение на качество очистки нефтесодержащих вод оказывает концентрация нефтепродуктов в исходной эмульсии, с увеличением которой наблюдается падение качества очистки нефтесодержащих вод практически по прямолинейному закону.

Перспективы дальнейших исследований. Результаты исследований можно также применить для повышения эффективности очистки нефтесодержащих вод судов, предприятий нефтеперерабатывающего комплекса.

Выводы. На основе теоретического и экспериментального исследования процесса очистки нефтесодержащих вод энергетических установок разработана математическая модель исследуемого процесса, которая позволяет эксплуатировать сепарационные установки в оптимальном режиме и повысить качество очистки нефтесодержащих вод.

Литература

1. Нунупаров С.М. Предотвращение загрязнения моря судами.— М.: Транспорт, 1979.— 336 с.
2. Роев Г.А., Юфин В.А. Очистка сточных вод и вторичное использование нефтепродуктов.— М.: Недра, 1987.— 224 с.
3. Истомин В.И. Моделирование процесса коалесценции нефтеводяной эмульсии // Моделирование и исследование сложных систем: Тр. Междунар. науч.-тех. конф.— М., 2001.— Т. 1.— С. 92-96.
4. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов.— М.: Мир, 1977.— 552 с.

Поступила в редакцию 08.06.03

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент каф. ЭМСС О.В. Владецкий, СевНТУ, г. Севастополь; д-р физ.-мат. наук, зам. директора по НР А.М. Суворов, Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь.