

УДК 629.12.03

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТЕВОДЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Истомин В.И.

Приведена краткая характеристика судовых нефтесодержащих вод, их физико-химических свойств, влияющих на качество очистки. Произведен анализ методов очистки нефтесодержащих вод, по результатам которого выполнены исследования оптимизации процесса разделения нефтесодержащих вод.

К судовым нефтесодержащим водам относят, как правило, балластные, промывочные воды танкеров и, так называемые, льяльные воды машинно-котельных отделений (МКО) судов.

Наиболее весомым в области загрязнения от судоходства является сброс нефти с балластными и промывочными водами танкеров. С целью уменьшения этого вида загрязнений танкеры оборудуют емкостями изолированного балласта, применяют погрузку поверх остатков, мойку сырой нефтью и другие мероприятия [1-3].

Другим существенным источником загрязнения моря являются нефтесодержащие воды МКО [1, 2], которые характеризуются более сложным составом по сравнению с балластными и промывочными водами вследствие наличия в них поверхностно активных веществ (ПАВ), механических примесей органического и неорганического происхождения. Образующаяся нефтесодержащая вода подлежит регулярному удалению из МКО. Согласно требованиям Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов MARPOL 73/78, содержание нефтепродуктов в сбрасываемых за борт очищенных льяльных водах не должно превышать 15 млн^{-1} , что и на сегодняшний день представляет серьезную проблему. Нефтепродукты могут находиться в следующих состояниях: свободная нефть, нестабилизированные дисперсии, стабилизированные дисперсии, растворенная нефть. Наличие ПАВ в нефтесодержащих водах способствует образованию стойких трудноразделимых эмульсий, что существенно снижает эффективность очистки. Механические примеси, находящиеся в нефтесодержащих водах, закупоривают фильтрующие элементы, что существенно снижает ресурс их работы.

Сепараторы, применяемые в настоящее время на судах для очистки нефтесодержащих вод, подразделяются на следующие основные типы: фильтрующие, гравитационные, флотационные, центробежные, коалесцирующие.

Фильтрующие сепараторы обладают высокой очистной способностью, но имеют малый ресурс работы, требуют периодической промывки и смены фильтроэлемента.

Гравитационные сепараторы просты конструктивно, не требуют дорогостоящего оборудования, однако имеют недостаточную по современным требованиям очистную способность.

Флотационные сепараторы, хотя и обладают более высокой очистной способностью, чем гравитационные сепараторы, однако не могут обеспечить очистку нефтесодержащих вод до концентрации 15 млн^{-1} , имеют большие габариты и требуют применения флотореагента.

Центробежные сепараторы обладают высокой очистной способностью, имеют малые удельные габариты, однако вследствие наличия в нефтесодержащих водах большого количества механических примесей происходит быстрый износ резиновых уплотнений, подшипников, других трущихся деталей.

Коалесцирующие сепараторы обладают высокой очистной способностью, однако имеют малый ресурс работы из-за загрязнения пор коалесцирующего элемента, для которого невозможна эффективная регенерация. Вместе с тем, сепараторы коалесцирующего типа имеют значительные возможности повышения эффективности работы при условии увеличения ресурса фильтроэлемента и возможности его регенерации.

С целью оптимизации процесса очистки нефтесодержащих вод в коалесцирующих сепараторах рассмотрим факторы, влияющие на эффективность этого процесса.

Для повышения ресурса работы коалесцирующего элемента необходимо, чтобы он имел нежесткую структуру для возможности регенерации, можно также увеличить размер пор за счет увеличения толщины фильтрующего слоя. Это достигается путем применения в качестве коалесцирующего элемента слоя гладких сферических гранул.

В фильтрах с гранулированной загрузкой для оптимизации процесса очистки используются следующие дополнительные факторы: уменьшение пути капелек нефти до поверхности сепарации; периодическое изменение направления потока; промежуточное выделение укрупненных капель нефти. Отмывка гранулированной загрузки осуществляется обратным током водо-воздушной смеси.

Для выбора оптимальных параметров слоя гранул и повышения эффективности очистки нефтесодержащих вод необходимо построить математическую модель процесса. В качестве параметра оптимизации, определяющего эффективность разделения нефтеводяной эмульсии в объеме гранулированной загрузки, принята концентрация нефтепродуктов в эмульсии после слоя гранул ($K_{\text{вых}}$), которая является функцией следующих факторов

$$K_{\text{вых}} = f(K_{\text{вх}}, q, t, d_r, \Delta \rho, \nu, H_c, d_o), \quad (1)$$

где $K_{\text{вх}}$ – концентрация нефтепродуктов в исходной эмульсии, млн^{-1} ; q – удельный расход эмульсии, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; t – температура нефтеводяной эмуль-

сии, °C; d_r – диаметр гранул загрузки, м; $\Delta\rho$ – разность плотностей воды и нефти, кг/м³; ν – кинематический коэффициент вязкости эмульсии, сСт; H_c – высота слоя гранулированной загрузки, м; d_o – диаметр частиц дисперсной фазы нефтеводяной эмульсии, м.

Исходя из требований к регрессионному анализу, исключены линейно-зависимые факторы, а высота слоя гранул принята оптимальной и равной 500 мм. Тогда уравнение (1) примет вид:

$$K_{\text{вых}} = f(q, t, d_r).$$

Значения факторов в точках ортогонального центрального композиционного плана второго порядка представлены в таблице 1

Таблица 1 – Значения факторов в точках центрального композиционного плана

X_i	+1,215	+1	0	-1	-1,215	Интервал варьирования
$q, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч} (x_1)$	3,2	3,0	2,0	1,0	0,8	1,0
$t, ^\circ\text{C} (x_2)$	58	54	37	20	16	17
$d_r, \text{ м} (x_3)$	4,5	4,2	3,0	1,8	1,5	1,2

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса разделения нефтеводяной эмульсии в объеме гранулированной загрузки и определения значимых факторов получена математическая модель процесса на основе уравнения регрессии:

$$K_{\text{вых}} = 80 + 77x_1 - 82x_2 + 91x_3 - 45x_1x_2 + 55x_1x_3 - 63x_2x_3 - 30x_1x_2x_3 + 13x_1^2 + 21x_2^2 + 21x_3^2. \quad (2)$$

Из анализа уравнения (2) видно, что наибольшее влияние на процесс очистки нефтесодержащих вод в объеме гранулированной загрузки оказывает диаметр гранул. Чем меньше диаметр гранул, тем меньше концентрация нефтепродуктов в очищенной воде. Уменьшение диаметра гранул с 4,5 до 3 мм приводит к снижению $K_{\text{вых}}$ в 2,4...2,6 раза, а соответствующее уменьшение диаметра гранул с 3 до 1,5 мм снижает $K_{\text{вых}}$ в 4,5...6 раз. Поэтому применение гранул более 3 мм не рекомендуется. С другой стороны, значительное уменьшение диаметра гранул приводит к росту гидравлического сопротивления и необходимости применения ограничительных сеток с мелкой ячейкой, что снижает ресурс сепарационной установки. Поэтому в судовых условиях для очистки воды от нефтепродуктов также нецелесообразно применение гранул диаметром менее 1 мм.

В процессе исследования установлено, что влияние расхода и температуры разделяемой эмульсии на очистную способность гранулированной загрузки менее существенно при уменьшении диаметра гранул. Тогда, применяя более мелкие гранулы (1...2 мм), можно добиться значительного повышения удельного расхода эмульсии через слой гранул без существенного

увеличения $K_{вых}$, что приводит к снижению массогабаритных показателей сепарационной установки.

Для определения оптимального соотношения факторов, при котором концентрация нефтепродуктов в очищенной воде $K_{вых}$ будет минимальной, произведем оптимизацию процесса с помощью уравнения регрессии (3) методом Бокса-Уилсона [4]. За величину базового фактора принимаем диаметр гранул наполнителя d_n , а величину шага по этой переменной – равной 0,3 мм. Температуру разделяемой эмульсии целесообразно поддерживать равной 40°C, так как с дальнейшим ее ростом повышение эффективности очистки воды несколько замедляется, а энергозатраты существенно возрастают. Расчет значений $K_{вых}$ по направлению градиента и три дополнительных опыта в том же направлении показывают достаточно высокую точность предсказания точки оптимума. Значения факторов, соответствующие этой области принимаются за оптимальные и равны:

удельный расход нефтеводяной эмульсии	-1,0 м ³ /м ² ·ч,
температура нефтеводяной эмульсии	-40 °С,
диаметр гранул загрузки	-1,8 мм.

Таким образом, с помощью полученной математической модели процесса разделения нефтеводяной эмульсии в слое гранулированной загрузки произведена оптимизация процесса с целью определения оптимальных значений факторов.

Библиография

- 1 Бережных О.А. Основные источники загрязнения Мирового океана нефтью / О.А. Бережных // Судостроение. — 1978. — № 4. — С. 14–15.
- 2 Брусельницкий Ю.М. Судовые устройства очистки трюмно-балластных вод от нефтепродуктов/ Ю.М. Брусельницкий. — Л.: Судостроение, 1966. — 203 с.
- 3 Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года. — Л.: Транспорт, 1979. — 324 с.
- 4 Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов/ К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер. — М.: Мир, 1977. — 552 с.

Поступила в редакцию 17.04.2000 г.