

Проведенными исследованиями установлено:

- траектория движения управляемого полуприцепа путем торможения колес одного борта на неустановившемся повороте автопоезда всегда состоит из двух участков, разных по знаку кривизны, поэтому для коррекции траектории тележки необходимо изменять и колеса оси, которые необходимо тормозить;

- направление боковой силы на тележке полуприцепа по мере входа автопоезда в поворот изменяется на противоположное;

- дополнительная боковая сила на передней оси на всех участках криволинейной траектории движения полуприцепа всегда совпадает за направлением с боковой силой на тележке, а на задней оси – на входе в поворот направлена в сторону, противоположную направлению боковой силы на тележке.

- дополнительная боковая сила на средней осе на всех участках траектории определяется в зависимости от соотношения в углах увода колес передней и задней осей тележки.

Из этого следует, что для коррекции траектории тележки полуприцепа относительно траектории тягача целесообразным является торможение колес одной стороны его задней оси.

Результаты статьи могут быть использованы при выборе типа полуприцепа для комплектации автопоезда-контейнеровоза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АВТОМОБИЛЬНЫЙ ПОЕЗД, ГАБАРИТНАЯ ПОЛОСА ДВИЖЕНИЯ, ЦЕНТР ПОВОРОТА, ТРАЕКТОРИЯ, СКОРОСТЬ, МАНЕВРЕННОСТЬ, БОКОВАЯ СИЛА, УПРАВЛЕНИЕ.

УДК 628.00

КАЧЕСТВО ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

Посвятенко Н.И., кандидат технических наук
Демидова Ю.Е.

Постановка проблемы.

В работе [1] предложена методика выбора оптимальных значений параметров технологического процесса обеспечивающих максимальную степень очистки нефтесодержащих сточных вод (НСВ) от нефтепродуктов. Однако в условиях реальной эксплуатации всегда возможны отклонения от проектных характеристик – это вариации концентрации и расхода стока через электрокоагулятор, плотности анодного тока и как следствие изменение дозы гидроксида алюминия на единицу объема стока, изменение объема электролита в электродной камере вследствие растворения анода, а, следовательно, и времени растворения анода и многие другие факторы. В этой связи возникает вопрос, а как влияют на эффективность очистки НСВ изменения указанных параметров, сколь чувствительна степень очистки к таким отклонениям от проектных значений и с какой точностью необходимо их поддерживать в ходе технологического процесса. Для этой цели необходимо определить коэффициенты чувствительности, которые могут быть представлены как частные производные $(\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i})$ степени очистки по

параметрам α_i . Классический способ определения указанных производных, заключается в численном решении системы уравнений чувствительности для объектов математическая модель которых достаточно точно может быть представлена системой дифференциальных уравнений.

Методы и результаты исследований.

При активных экспериментах одновременно и целенаправленно изменяют факторы, являющиеся наиболее существенными и изучают реакцию объекта на них.

Активный эксперимент реализован на лабораторной установке колонного электрокоагулятора, оснащенной контрольно-измерительными приборами для поддержания необходимых значений указанных параметров. В качестве параметров (факторов) выбраны независимые параметры:

- $i_A, \text{A/cm}^2$ – плотность анодного тока;
- $K_n, \text{г/л}$ – концентрация нефтепродуктов в НСВ;
- $T_a, \text{с}$ – время растворения анода;
- рН стоков.

Плотность тока регулировали с помощью выпрямителя типа ВС-5, концентрацию нефтепродуктов в НСВ разбавлением водой, величину рН среды измеряли с помощью лабораторного рН-метра типа рН-261 и поддерживали путем дозирования соответствующих объемов соляной кислоты, время растворения анода изменяли расходом электролита через электродную камеру.

Эксперименты проведены методом полного факторного эксперимента, который позволяет с помощью минимума опытов определить уравнение регрессии, коэффициенты которого определяют влияние варьируемых параметров на критерий качества (в рассматриваемом случае степень очистки НСВ – (Φ, %).

Метод полного факторного эксперимента [2] предполагает проведение 2^n экспериментов, где n – количество варьируемых параметров. В каждом эксперименте одновременно изменяются все параметры и каждый из них принимает максимальное или минимальное значение в соответствии с матрицей планирования (табл. 1). В матрице планирования задаются физические и кодированные значения факторов и полученные значения критерия очистки Φ [%] (параметр У) в каждом эксперименте. Кодированные значения x_i ($i=1, 2, \dots, n$) принимают равными +1 (-1), что соответствует нахождению параметра на верхней (нижней) границе поля допуска.

Таблица 1. – Матрица планирования экспериментов

№ п/п	Физические значения параметров				Кодированные значения параметров					Значения критерия	
	$i_A, \text{A/cm}^2$	$K_n, \text{мг/л}$	рН	$T_a, \text{с}$	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	эксперимент	оценка
										У	\hat{y}
1	0.2	4.4	6.5	15	+1	+1	+1	+1	+1	95.32	96,04
2	0.12	4.4	6.5	15	+1	-1	+1	+1	+1	93,24	93.30
3	0.2	3.6	6.5	15	+1	+1	-1	+1	+1	98.18	97.90
4	0.12	3.6	6.5	15	+1	-1	-1	+1	+1	94.86	95.14
5	0.2	4.4	5.5	15	+1	+1	+1	-1	+1	95.88	94.69
6	0.12	4.4	5.5	15	+1	-1	+1	-1	+1	92,14	91.94
7	0.2	3.6	5.5	15	+1	+1	-1	-1	+1	96.02	96.54
8	0.12	3.6	5.5	15	+1	-1	-1	-1	+1	93.71	93.80
9	0.2	4.4	6.5	5	+1	+1	+1	+1	-1	97.06	97.22
10	0.12	4.4	6.5	5	+1	-1	+1	+1	-1	95.29	94.48
11	0.2	3.6	6.5	5	+1	+1	-1	+1	-1	99.92	99.08
12	0.12	3.6	6.5	5	+1	-1	-1	+1	-1	95.6	96.33
13	0.2	4.4	5.5	5	+1	+1	+1	-1	-1	94.9	95.87
14	0.12	4.4	5.5	5	+1	-1	+1	-1	-1	92.8	93.12
15	0.2	3.6	5.5	5	+1	+1	-1	-1	-1	97.76	97.72
16	0.12	3.6	5.5	5	+1	-1	-1	-1	-1	95.44	94.98
17	0.16	4.0	6.0	10	+1	0	0	0	0	95.26	95.5
18	0.16	4.0	6.0	10	+1	0	0	0	0	94.58	95.5
19	0.16	4.0	6.0	10	+1	0	0	0	0	95.46	95.5

В центре плана значения варьируемых параметров приняты номинальными и равными:

$$K_n=4 \text{ г/л}; i_A=0,16 \text{ A/cm}^2; T_a=15 \text{ с}; \text{pH}=6,0.$$

Вариации параметров составляют:

$$\Delta K_n=\pm 0,4 \text{ г/л}; \Delta i_A=0,04 \text{ A/cm}^2; \Delta T_a=\pm 5 \text{ с}; \Delta \text{pH}=\pm 0,5.$$

Кодированным значениям параметров x_i соответствуют:

- x_0 – фиктивный фактор,
- x_1 – плотность анодного тока,
- x_2 – концентрация нефтепродуктов,
- x_3 – рН,
- x_4 – время растворения анода.

Всего проведено 16 экспериментов (N=16) при вариациях параметров и 3 параллельных эксперимента в центре плана (m=3). Используя полученные в ходе эксперимента данные, на первом этапе вычислим коэффициенты линейной регрессии модели вида:

$$\hat{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4, \quad (1)$$

где $b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_0 y_i}{N}$, $b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}$, $(i = 1, 2, \dots, N)$.

Вычисленные значения коэффициентов b_i равны:

$$b_0 = 95,5075 \quad b_1 = 1,3725; \quad b_2 = -0,9275; \quad b_3 = 0,6775; \quad b_4 = -0,59.$$

Анализ полученных значений параметров b_i , которые по своей сути являются коэффициентами чувствительности степени очистки НСВ к вариациям параметров, показывает следующее.

Наиболее чувствительными, при выбранных номинальных значениях параметров i_A , K_n , pH , T_a , для степени очистки является изменение значения плотности анодного тока, т.к. значение $b_1 = \frac{\partial \Phi}{\partial i_A} = 1.3725$ – максимально. Причем положительная вариация $\Delta i_A > 0$, т.е. $x_1 = +1$ вызывает увеличение

степени очистки. Вторым по значимости является $b_2 = \frac{\partial \Phi}{\partial K_n} < 0$ – коэффициент чувствительности к изменению концентрации нефтепродуктов в НСВ водах и при уменьшении K_n степень очистки увеличивается. Увеличение pH приводит к увеличению степени очистки т.к. $b_3 = \frac{\partial \Phi}{\partial pH} > 0$.

И наконец, чувствительность к изменению времени растворения анода $b_4 = \frac{\partial \Phi}{\partial T_a} < 0$, наименьшая, а снижение T_a приводит к увеличению степени очистки. Тенденция влияния изменений параметров на степень очистки полностью согласуется с полученными ранее результатами. Знание коэффициентов чувствительности позволяет в условиях реальной эксплуатации проводить экспертные оценки по допустимости изменения того или иного параметра, о возможной величине его отклонения от номинала, с точки зрения обеспечения планируемого результата очистки.

Для оценки влияния нелинейных факторов – произведений 2-х, 3-х, 4-х факторов на степень очистки НСВ необходимо модифицировать матрицу планирования [2] и дополнить её смешанными произведениями факторов x_{ij} ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, N$) (табл. 2).

Таблица 2. – Смешанные произведения факторов

№ п/п	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ 3	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_4$ 4	$x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$ 4	$x_1 \cdot x_3 \cdot x_4$ 4	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$ 3 \cdot x4
1.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
3.	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
4.	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
5.	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
6.	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
7.	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
8.	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
9.	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
10.	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
11.	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
12.	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
13.	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
14.	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
15.	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1
16.	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1

Соответствующие коэффициенты регрессии вычисляются по аналогии с коэффициентами в (1).

Результаты вычислений дают:

$$b_{12} = -0,1625; b_{13} = 0,0625; b_{14} = 0,06; b_{23} = -0,0275;$$

$$b_{24} = 0,155; b_{34} = -0,195; b_{123} = -0,3125; b_{124} = 0,185;$$

$$b_{134} = -0,32; b_{134} = 0,1625; b_{1234} = -0,02.$$

После вычисления коэффициентов регрессии проведен статистический анализ уравнения регрессии, включающий оценку дисперсии воспроизводимости (ошибку опыта), значимости коэффициентов регрессии и адекватности модели [3].

Экспериментально установлено, что разброс критерия качества в каждом опыте не превышает полученных при проведении параллельных опытов в центре плана.

Дисперсия опыта (S_{on}^2) оценивается по соотношению:

$$S_{on}^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{u=1}^N \sum_{\kappa=1}^m (y_{u\kappa} - \bar{y}_u)^2, \quad (2)$$

где N – количество опытов, проведенных при вариации факторов;

m – количество параллельных опытов в каждом из N экспериментов;

\bar{y}_u – среднее значение критерия.

Распространяя результаты оценки дисперсии в центре плана на остальные опыты и принимая, что $S_u^2 |_{u=1} = \dots = S_u^2 |_{u=N} = S_0^2$,

где S_0^2 – дисперсия опыта, оцененная в центре плана, получим $S_{on}^2 = S_0^2$.

Дисперсия опыта по формуле (2) может быть вычислена при условии однородности дисперсий в каждой группе параллельных опытов. Заключение об однородной дисперсии делается в соответствии с критерием Кохрена:

$$G_{\max} \leq G_{kp}(f_1, f_2), \quad (3)$$

где G_{kp} – табличное значение критерия, $f_1 = (m-1)$, $f_2 = N$, $G_{\max} = \frac{S_0^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}$.

Вычисленные по данным табл. 1 значения указанных параметров равны:

$$\bar{y}_u = 94,67;$$

$$S_{on}^2 = 0,2057;$$

$$G_{\max} = 0,0625.$$

Критическое значение при уровне значимости $q=5\%$ и числе степеней свободы $f_1=2$ и $f_2=16$ равно $G_{kp} = 0,3346$. Т. о., неравенство (3) выполняется и гипотеза однородности принимается.

Оценка значимости коэффициентов регрессии проведена по t -критерию Стьюдента, в соответствии с которым:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{bi}} > t_T(q, f) \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4), \quad (4)$$

где $t_T(t_{ip})$ – табличное (расчетное) значение критерия Стьюдента;

q – уровень значимости; $f = (m-1)$; $S_{bi} = \sqrt{\frac{S_0^2}{N}}$.

S_0^2 – дисперсия опыта, полученная по результатам параллельных экспериментов в центре плана.

Вычисленные значения указанных параметров равны:

$$S_{bi} (i=1,2,3,4) = 0,1133; t_{1p} = 12,1; t_{2p} = 8,18; t_{3p} = 5,97; t_{4p} = 5,2.$$

$$t_{12p} = 1,43; t_{13p} = 0,551; t_{14p} = 0,529; t_{23p} = 0,242;$$

$$t_{24p} = 1,367; t_{34p} = 1,719; t_{123} = 2,755; t_{124} = 1,63;$$

$$t_{234p} = 2,82; t_{134p} = 1,278; t_{1234p} = 1,176;$$

Табличное значение t_T при числе степеней свободы $f = 2$ и уровне значимости $q = 5\%$ равно 4,3. Следовательно, неравенство (4) выполняется только для значений коэффициентов линейной регрессии. А это означает, что оценки всех коэффициентов регрессии при смешанных произведениях факторов незначимы и оценка степени очистки может проводиться по уравнению линейной регрессии.

Проверка адекватности уравнения линейной регрессии проведена по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ocm}^2}{S_0^2} < F_q (f_1, f_2), \quad (5)$$

где F – расчётное значение критерия.

$$S_{ocm}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{k=1}^N (y_p - y_k)^2,$$

где l – количество значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Вычисления дают: $S_{ocm}^2 = 0.509$, $F = 2.47$. Табличное значение критерия при $q = 5\%$, $f_1 = 11$, $f_2 = 2$, $F_q = 19.41$. Неравенство (5) выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает эксперимент.

Таким образом, на основе полного факторного эксперимента получена математическая модель влияния отклонений основных технологических параметров в колонном электрокоагуляторе на качество процесса очистки НСВ от эмульгированных нефтепродуктов. По этой модели в ходе технологического процесса могут быть спрогнозированы оценки как степени очистки НСВ, так и необходимые воздействия на него с целью достижения заданных показателей очистки стоков каждом конкретном случае.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Назарян М. М. Технология глубокой очистки нефтесодержащих сточных вод морского транспорта до экологически безопасного уровня / М.М. Назарян, В.И. Тошинский, Ю.Е. Демидова // Экология и промышленность. – Харьков: Укр ГНТЦ «Энергосталь». – 2012. – № 4.
2. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации экспериментов в химической промышленности: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп./ С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М. : Высш. шк, 1985. – 327с.
3. Бондарь А. Г. Математическое моделирование в химической технологии / А. Г. Бондарь. – Киев : Вища школа. – 1973. – 280 с.

РЕФЕРАТ

Посвятенко Н.І., Демидова Ю.Є. Якість очистки нафтовмісних стічних вод морського транспорту / Наталія Іванівна Посвятенко, Юлія Євгенівна Демидова // Вісник НТУ. – К.: НТУ. – 2012. – Вип. 26.

В статті запропоновано підхід побудови математичної моделі процесу очищення нафтовмісних стічних вод у колонному електрокоагуляторі.

Об'єкт дослідження – колонний електрокоагулятор для очистки нафтовмісних стічних вод.

Мета роботи – оцінка якості очистки стічних вод колонними електрокоагуляторами.

Метод дослідження – регресивний аналіз даних, отриманих в результаті планування багатофакторного експерименту.

Методи регресійного аналізу є зручним інструментом для отримання статистичних моделей процесів у вигляді поліномів на основі даних, зібраних в ході експерименту. З введенням в процес експериментування активного начала – планування, стало можливим створення якогось оптимального плану експерименту з метою визначення математичної моделі процесу. Пасивна позиція дослідника як спостерігача стала активною. Колонні електрокоагулятори мають складну структуру потоків і функціонують переважно в умовах постійно діючих неконтрольованих збурень. Їх дослідження та побудову математичного опису представляє складну наукову задачу. У подібній ситуації викорис-

тання математичних методів планування експерименту дозволяє визначити математичний опис процесів при неповному знанні деталей механізму явищ, що протікають в об'єкті. Сутність такого експерименту полягає в одночасному варіюванні усіх факторів при його проведенні за певним планом і поданні математичної моделі функції відгуку у вигляді лінійної або нелінійної регресії з подальшим її аналізом методами математичної статистики.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ОЧИСТКА НЕФТОВМІСНИХ ВОД МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ; ФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ; КОЛОННИЙ ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯТОР

ABSTRACT

Posviatenko N.I., Demidova Y.E. Quality of purification of petrocontaining sewage of sea transport / Natalia Ivanovna Posviatenko, Yulia Evgenivna Demidova // Visnyk NTU. – K.: NTU. – 2012. – Vol. 26.

In the article the approach used to construct a mathematical model of the process of oily waste water in the column electrocoagulators.

Object of research – a columned electrocoagulator for purification of petrocontaining sewage.

The work purpose – an assessment of quality of sewage treatment by columned electrocoagulators.

Research method – the regression analysis of the data received as a result of planning of multiple-factor experiment.

Regression analysis is a useful tool for statistical process models in the form of polynomials on the basis of data collected during the experiment. With the introduction of the experimentation process of the active principle – planning made possible the creation of a certain optimal experimental designs in order to determine a mathematical model of the process. Passive position of the researcher as an observer becomes active. Column electrocoagulators have complex flow patterns and function mainly in permanent uncontrolled disturbances. Their study and the construction of a mathematical description is a complex scientific task. In such a situation, the use of mathematical methods of experimental design, to determine the mathematical description of the processes of incomplete knowledge of the details of the mechanism of the phenomena occurring in the facility. The essence of this experiment is the simultaneous variation of all factors when carrying out a definite plan and present a mathematical model of the response function in the form of linear or non-linear regression, with subsequent analysis of the methods of mathematical statistics.

KEYWORDS: PURIFICATION OF PETROCONTAINING WATERS OF SEA TRANSPORT; FACTORIAL EXPERIMENT; COLUMNED ELECTROCOAGULATOR

РЕФЕРАТ

Посвятенко Н.И., Демидова Ю.Е. Качество очистки нефтесодержащих сточных вод морского транспорта / Наталия Ивановна Посвятенко, Юлия Евгеньевна Демидова // Вестник НТУ. – К.: НТУ. – 2012. – Вып. 26.

В статье предложен подход построения математической модели процесса очистки нефтесодержащих сточных вод в колонном электрокоагуляторе

Объект исследования – колонный электрокоагулятор для очистки нефтесодержащих сточных вод.

Цель работы – оценка качества очистки сточных вод колонными электрокоагуляторами.

Метод исследования – регрессионный анализ данных, полученных в результате планирования многофакторного эксперимента.

Методы регрессионного анализа являются удобным инструментом для получения статистических моделей процессов в виде полиномов на основе данных, собранных в ходе эксперимента. С введением в процесс экспериментирования активного начала – планирования, стало возможным создание некоего оптимального плана эксперимента с целью определения математической модели процесса. Пассивная позиция исследователя как наблюдателя стала активной. Колонные электрокоагуляторы имеют сложную структуру потоков и функционируют преимущественно в условиях постоянно действующих неконтролируемых возмущений. Их исследование и построение математического описания представляет сложную научную задачу. В подобной ситуации использование математических методов планирования эксперимента, позволяет определить математическое описание процессов при неполном знании деталей механизма явлений протекающих в объекте. Сущность такого эксперимента заключается в одновременном варьировании всех факторов при его проведении по определённом плану и представлении математической модели функции отклика в виде линейной или нелинейной регрессии с последующим её анализом методами математической статистики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОЧИСТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ВОД МОРСКОГО ТРАНСПОРТА; ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ; КОЛОННЫЙ ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯТОР