

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДНЫХ СИСТЕМ

В. Е. Коржаков

Адыгейский государственный университет, Майкоп

Приведены результаты исследований влияния различных режимов обработки воды в акустомагнитном аппарате на процесс накипеобразования на стенках контрольной теплообменной трубки.

1. Описание экспериментальной установки.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рисунке 1.

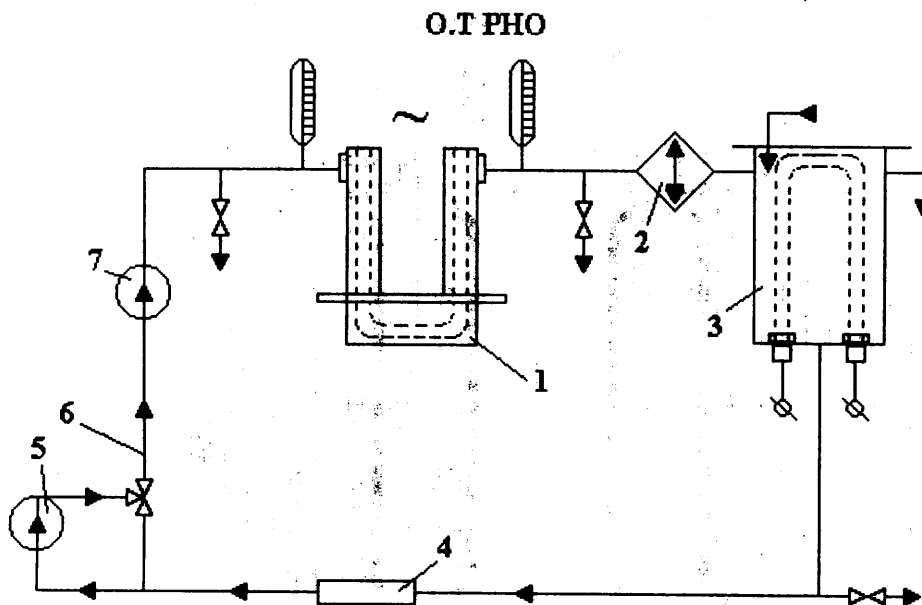


Рис.1.

Опытный теплообменник 1 представляет собой трубочный электронагреватель типа ТЕН-03А, заключенный в кожух. Зазор между стенками аппарата и кожухом по которому циркулирует вода, составляет 9.3 мм.

Теплонапряжение поверхности нагрева опытного теплообменника измеряли по напряжению, регулируемому регулятором напряжения тока РНО.

Для обеспечения постоянной температуры, воды на входе в опытный теплообменник ее пропускали через охладитель 2, устроенный по типу «труба в трубе»; через зазор между стенками труб пропускали холодную воду. Расход воды регулировали трехходовым краном 6. На трубопроводах до и после опытного теплообменника были установлены термометры для контроля температуры воды и штуцера для отбора проб.

Циркуляционная вода подвергалась обработке в акустимагнитном аппарате 4. Исследования были выполнены на воде гидрокарбонатного класса (общее соледержание 1098 мг/л, общая жесткость воды 5.2 мг-экв/л, карбонатная жесткость 2.2 мг-экв/л).

Продолжительность каждого хода исследований составляла 48 ч. Количество накипи, образовавшейся на поверхности нагрева электронагревателя, определили объемным способом. Для этого с поверхности нагрева удаляли накипь 0.2 н. раствором кальцинированной соды. Количество соды, оставшейся после нейтрализации, определяли обратным титрованием 0.2 н. раствором соляной кислоты. Разность между общим объемом 0.2 н. раствора соляной кислоты, израсходованной на растворение накипи и обратное титрование соды, и объем 0.2 н. раствора соды даст количество кислоты, израсходованной на растворение накипи. Это количество пересчитывали на содержание карбоната кальция CaCO_3 .

Эффективность безреагентной обработки определяли из соотношения:

$$\theta = \frac{A_{II} - A_{III}}{A_{III}}$$

где A_{II} количество накипи, образующейся из необработанной воды;
 A_{III} количество накипи, образующейся из обработанной воды.

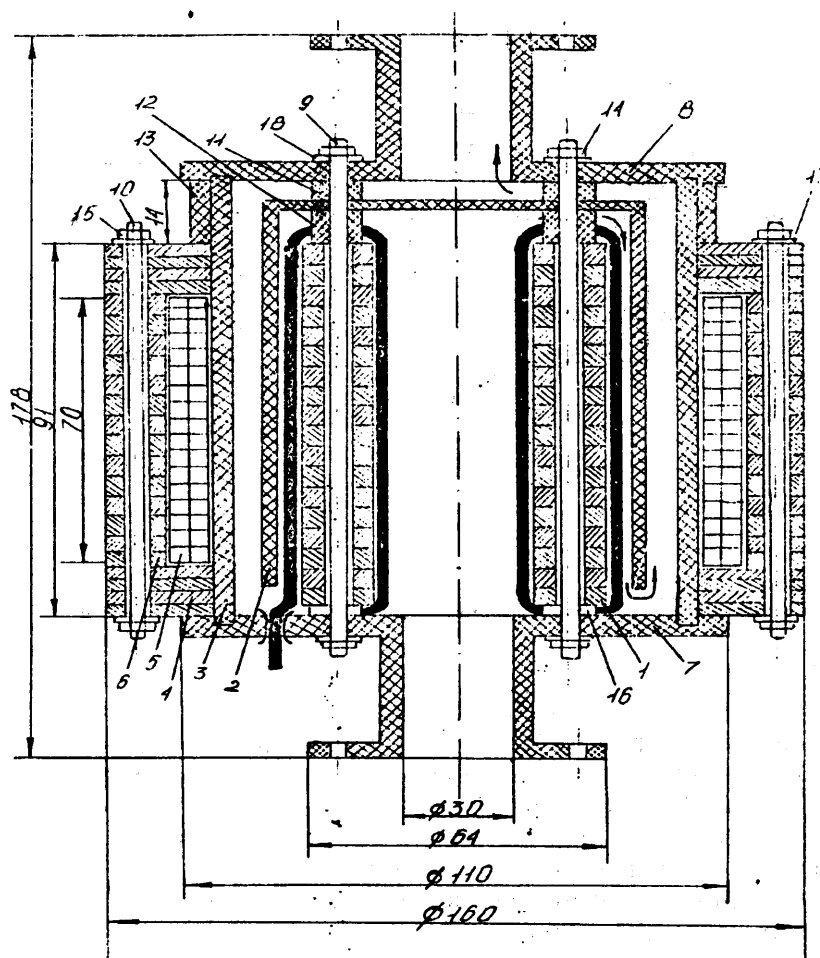


Рис.2.

2. Описание акустомагнитного аппарата.

Обработка воды производилась в акустомагнитном аппарате, на устройство которого имеется авторское свидетельство на изобретение а.с. №1514726. Схема аппарата изображена на рис. 2. Акустомагнитный аппарат состоит из цилиндрического акустического излучателя набранного из пластин 1 обладающих магнитострикцией, скрепленных шпильками 9 с гайками 14 и его обмотки 19, а так же электромагнитной системы, включающий внешний магнитопровод, набранный из пластин 4 и 6, скрепленные шпильками 10 с гайками 15, и обмотку электромагнита 5. Причем внешний магнитопровод крепится на цилиндрическом корпусе 3 с помощью крышек 7 и 8 и цилиндрической втулки 13. Для направления водного потока в рабочую зону аппарата предназначена цилиндрическая перегородка 2, установленная между цилиндрическим корпусом 3 и акустическим излучателем и крепящаяся с помощью цилиндрических втулок 11, 12 и шпилек 9 с гайками 14.

Устройство работает следующим образом. При подаче напряжения на катушку 19 создается вокруг нее магнитный поток, который магнитопроводами, состоящими из пластин 4 и 6, концентрируется в кольцевом зазоре между корпусом 3 и акустическим излучателем, где течет вода.

Одновременно с магнитным полем на текущую воду в рабочем зазоре аппарата воздействуют ультразвуковые колебания, излучаемые внутренней и внешней поверхностью цилиндрического излучателя 1. Возбуждение радиальных колебаний в цилиндрическом излучателе осуществляется с помощью обмотки 19.

3. Описание метода оптимизации процесса акустомагнитной обработки воды.

Процесс накипеобразования на стенках теплообменников является сложным процессом выделения солей из воды обработанной физическими полями.

Оптимизацию такого процесса можно вести в условиях когда неизвестен аналитический вид функции, связывающий параметр оптимизации с факторами определяющими процесс.

В качестве параметра оптимизации (отклика) выбран противонакипный эффект θ безреагентной обработки воды, который является функцией большого числа факторов

$$\theta = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Чтобы найти оптимальные условия безреагентной обработки воды использовался метод «крутого восхождения» [1].

При этом в исходной точке исследования ставилась небольшая серия опытов, результаты которых позволяли аппроксимировать связь между факторами, определяющими ход процесса, оптимизацию (характеристикой этого процесса) уравнением гиперплоскости:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (2)$$

где b_0, b_i — коэффициенты, вычисляемые по результатам опытов;

x_i — факторы, включаемые в рассмотрение;

k — число факторов.

Знаки коэффициентов уравнения (!) и их величина указывают направление движения к экстремуму исследуемой функции. После реализации некоторого количества опытов, позволяющих приблизиться к экстремальной точке, т.е. попасть в так называемую «почти стационарную» область, снова ставилась серия опытов, дающая возможность аппроксимировать эту область уравнением гиперповерхности второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \text{ при } i \neq j \quad (3)$$

$i \neq j$

где b_0, b_i, b_j — Коэффициенты, вычисляемые по результатам опытов;

x_i, x_j — факторы, включаемые в рассмотрение.

Анализируя уравнение (3), находили координаты оптимального режима протекания изучаемого процесса.

4. Исследование процесса накипеобразования на теплообменной контрольной трубке.

На лабораторной установке было изучено влияние на процесс накипеобразования следующих управляющих факторов:

произведения напряженности магнитного поля H и его градиента ΔH , x_1 ;

теплонпряжения поверхности нагрева Q , x_2 ;

скорости течения воды V_0 , x_3 ;

длины рабочего участка магнитного аппарата l , x_4 ;

общей жесткости воды J_0 , x_5 ;

температуры обрабатываемой воды t , x_6 ;

интенсивности ультразвуковых колебаний I_y , x_7 ;

Противонакипный эффект определяли как отношение:

$$\theta = \frac{M_0 - M_M}{M_0}, \quad (4)$$

где M_0 — масса накипи, осадившаяся на поверхности теплообмена за период τ без обработки воды;

M_M — то же, после обработки.

4.1. Получение линейной математической модели процесса.

Чтобы получить линейную математическую модель процесса была реализована 1/8 реплики от полного факторного эксперимента 2^7 [2]. Основные уровни и интервалы варьирования факторов выбирались на основании априорной информации о процессе [3].

Согласно работе [1], обозначим в таблицах условно верхний, нижний и основной уровни соответственно знаками «+», «-» и «0».

Матрица планирования и результаты реализации опытов приведены в табл.1.

Опыты проводились рандомизировано.

На основании результатов опытов приведенных в табл.1, коэффициенты линейного уравнения

$$b_i = \frac{\sum_{g=1}^N x_{ig} y_g}{N}, \quad (5)$$

где N — число опытов в матрице планирования (табл.1); g — номер опыта в матрице планирования; i — номер фактора.

Таблица 1								
Факторы								
основной уровень	7.2	15	1.0	0.6	3.0	30	0.5	
интервал варьирования	7.2	10	0.5	0.3	2.5	20	0.5	
верхний уровень	14.4	25	1.5	0.9	5.5	50	1	
нижний уровень	0.1	5	0.5	0.3	0.5	10	0.1	
кодированные обозначения	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	
номера опытов								
1	-	-	-	-	-	-	-	0.19
2	+	+	-	-	+	+	-	0.20
3	+	-	+	-	+	-	+	0.85
4	-	+	+	-	-	+	+	0.30
5	+	-	-	+	-	+	+	0.73
6	-	+	-	+	+	-	+	0.34
7	-	-	+	+	+	+	-	0.38
8	+	+	+	+	-	-	-	0.63
9	-	+	-	-	-	-	-	0.11
10	+	-	-	-	+	+	-	0.32
11	+	+	+	-	+	-	+	0.74
12	-	-	+	-	-	+	+	0.44
13	+	+	-	+	-	+	+	0.64
14	-	-	-	+	+	-	+	0.31
15	-	+	+	+	+	+	-	0.29
16	+	-	+	+	-	-	-	0.63

Таким образом,

$$b_0 = 44.37 \cdot 10^{-2};$$

$$b_1 = 14.87 \cdot 10^{-2};$$

$$b_2 = -3.94 \cdot 10^{-2};$$

$$b_3 = 7.63 \cdot 10^{-2};$$

$$b_4 = 6.25 \cdot 10^{-2};$$

$$b_5 = -2.75 \cdot 10^{-2};$$

$$b_6 = -2.88 \cdot 10^{-2};$$

$$b_7 = 10.00 \cdot 10^{-2}.$$

Дисперсии оценки коэффициентов b_i равны и могут быть определены по следующей формуле:

$$S^2(b_i) = \frac{S^2(y)}{N}, \quad (6)$$

где $S^2(y)$ — дисперсия параметра оптимизации (ошибка воспроизводимости опытов).

Для определения дисперсии $S^2(y)$ было выполнено шесть параллельных опытов в точке с координатами, соответствующими основному уровню факторов. Результаты опытов приведены в табл. 2.

Таблица 2			
Номер опыта	y_g	$(y_k - \bar{y})$	$(y_k - \bar{y})^2$
1	0.76	0.03	0.0009
2	0.79	0.06	0.0036
3	0.68	0.05	0.0025
4	0.77	0.04	0.0016
5	0.67	0.06	0.0036
6	0.75	0.02	0.0004

Дисперсия параметра оптимизации

$$S^2(y) = \frac{\sum_{g=1}^n y_g}{n-1} \quad (8)$$

В результате вычислений были получены следующие данные:
 $S(y) = 5.02 \cdot 10^{-2}$; коэффициент вариации

$$V = \frac{S(y)}{\bar{y}} \cdot 100 = \frac{5.02 \cdot 10^{-2}}{0.73} \cdot 100 \approx 6.88\%$$

Таким образом, $S(b_i) = 1.25 \cdot 10^{-2}$.

Значимость коэффициентов регрессии определялась с помощью t — критерия Стьюдента [2].

Доверительный интервал коэффициентов

$$\Delta b_i = \pm t S(b_i), \quad (9)$$

где t — табличное значение t — критерия при 5%-ном уровне значимости и числе степенной свободы N ,

$$\Delta b_i = \pm 2.12 \cdot 1.25 \cdot 10^{-2} = 2.66 \cdot 10^{-2}.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Таким образом, все вычисленные значения значимые, и в рассматриваемой области процесс накиеобразования может быть аппроксимирован уравнением

$$y = (44.37 + 14.87x_1 - 3.94x_2 + 7.63x_3 + 6.25x_4 - 2.75x_5 - 2.88x_6 + 10.00x_6) 10^{-2},$$

где

$$x_1 = \frac{\nabla H \cdot H \cdot 10^{-3}}{7.2 \cdot 10^{-3}};$$

$$x_2 = \frac{Q - 15}{10};$$

$$x_3 = \frac{V_b - 1.0}{0.5};$$

$$x_4 = \frac{l - 0.6}{0.3};$$

$$x_5 = \frac{Ж_0 - 3.0}{2.5};$$

$$x_6 = \frac{I_y - 0.5}{0.5};$$

$$y = c_2.$$

Проверка адекватности уравнения (10) выполнялась с помощью F — критерия [1]:

$$F_{расч} = \frac{S_{\omega}^2}{S^2\{y\}}, \quad (11)$$

где

$$S_{\omega}^2 = \frac{\sum_1^N (y_s - y_p)^2}{N - k - 1}. \quad (12)$$

В формуле (12) y_s — Экспериментальное значение y (по табл.1); y_p — расчетное значение y по уравнению (10);

K — число факторов, включаемых в рассмотрение; N — число опытов (по табл.1).

Результат расчетов $\sum_1^N (y_s - y_p)^2$ сведены в табл.3

$$S_{\omega}^2 = \frac{0.0773}{8} \approx 96 \cdot 10^{-4};$$

$$F_{расч} = \frac{96 \cdot 10^{-4}}{25.2 \cdot 10^{-4}} = 3.81.$$

Таблица 3					
Номер опыта	y_s	y_p	$(y_s - y_p)$	$(y_s - y_p)^2$	$\sum = 0.0773$ $S_{\omega}^2 = 0.009 = 96 \cdot 10^{-4}$
1	0.11	0.14	0.03	0.0009	
2	0.32	0.35	0.03	0.0009	
3	0.85	0.82	0.03	0.0009	
4	0.30	0.38	0.08	0.0064	
5	0.73	0.73	0	0	
6	0.34	0.33	0.01	0.0001	
7	0.38	0.38	0	0	
8	0.63	0.64	0.01	0.0001	
9	0.19	0.06	0.13	0.0169	
10	0.20	0.35	0.15	0.0225	
11	0.64	0.66	0.02	0.0004	
12	0.44	0.46	0.02	0.0004	
13	0.74	0.65	0.09	0.0081	
14	0.31	0.41	0.10	0.0100	
15	0.29	0.25	0.04	0.0016	
16	0.63	0.72	0.9	0.0081	

При 5%-ном уровне значимости $f_1 = N - k - 1 = 8$ и для знаменателя $f_2 = n - 1 = 5$ табличное значение F — критерия $F_{расч} < F_{табл}$, можно считать, что уравнение (10) адекватно.

Анализируя это уравнение, можно сделать следующие выводы. Росту противонакипного эффекта благоприятствует увеличение напряженности магнитного поля и его градиента, интенсивности ультразвуковых колебаний, длины рабочего зазора магнитного аппарата и скорости течения воды в нем, а также уменьшение

теплонапряжения поверхности нагрева, температуры и общей жесткости воды, что находится в согласии с ранее проведенными исследованиями.

Определение «почти стационарной» области.

Для определения условий получения максимального значения противонакипного эффекта, было использовано «крутое восхождение» по условному градиенту [4].

Оптимизация процесса противонакипной обработки производилась для воды, имеющей среднюю общую жесткость, наиболее распространенной на объектах.

Обработка технической воды производилась в акустическом аппарате с длинной активной зоной воздействия физических полей $l_{акт}=30$ см.

Для достижения максимального эффекта значения факторов x_2 , x_3 и x_6 находились на нижних уровнях, а значение фактора x_4 на верхнем уровне. Таким образом, движение к экстремуму осуществлялось в направлении всего трех факторов x_1 , x_3 и x_7 .

Матрица планирования и результаты крутого восхождения приведены в табл.4.

Факторы	$x_1 \cdot 10^{-3}$ kA^2/m^2	x_3 m/c	$x_7 \cdot 10^{-2}$ Bm/m^2	θ	
Основной уровень	7.2	1.0	0.5		
Интервал варьирования	7.2	0.5	0.5		
Коэффициент b_i	$14.87 \cdot 10^{-2}$	$7.63 \cdot 10^{-2}$	$10.00 \cdot 10^{-2}$		
Произведение $b_i \lambda_i$	λ_1	λ_2	λ_3		
Шаг (округленно)	7.2	0.5	0.5		
Номер опыта	1	7.2	1.0	0.5	0.71
	2	14.4	1.5	1.0	0.88
	3	21.6	2.0	1.5	0.85

Поскольку в опыте N3 значение параметра оптимизации начало уменьшаться, можно предположить, что точка с координатами опыта N2 находится в «почти стационарной» области.

Получение математической модели второго порядка.

Следующим этапом являлось получение модели второго порядка для этой области и исследования ее.

Для построения модели использовалось центральное композиционное ротатабельное планирование второго порядка. Матрица планирования и результаты реализации ее приведены в табл.5.

Факторы	$H \cdot \Delta H$, kA^2/m^2	V_a , m/c	I_y , Bm/m^2	θ
Основной уровень	14.4	1.5	1.0	
Интервал варьирования	7.2	0.5	0.5	
Верхний уровень	21.6	2.0	1.5	
Нижний уровень	7.2	1.0	0.5	
Кодированное обозначение	x_1	x_3	x_7	y
Номер опыта	1	+	+	0.89
	2	-	+	0.41
	3	+	-	0.72
	4	-	-	0.60
	5	+	+	0.74
	6	-	+	0.59
	7	+	-	0.82
	8	-	-	0.40
	9	+1.682	0	0.93
	10	-1.682	0	0.54

11	0	+1.682	0	0.71
12	0	-1.682	0	0.69
13	0	0	+1.682	0.81
14	0	0	-1.682	0.60
15	0	0	0	0.77
16	0	0	0	0.70
17	0	0	0	0.79
18	0	0	0	0.73
19	0	0	0	0.75
20	0	0	0	0.71

На основании результатов опытов вычисляем коэффициенты уравнения регрессии (3) которые для ротатбельных планов вычисляются методом наименьших квадратов по следующим формулам [2]:

$$b_0 = \frac{A}{N} \left\{ 2\lambda_4^2(n+2) \sum_{k=1}^N x_{k0} y_k - 2\lambda_4 C \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N x_{ik}^2 y_k \right\};$$

$$b_i = \frac{C}{N} \sum_{k=1}^N x_{ik} y_k; \quad (13)$$

$$b_{ij} = \frac{C^2}{N\lambda_4} \sum_{k=1}^N x_{ik} x_{jk} y_k; \quad (14)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} \left\{ C^2 \left[(n+2)\lambda - n \right] \sum_{k=1}^N x_{ik}^2 y_k + C^2 (1-\lambda_4) \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N x_{ik}^2 y_k - 2\lambda_4 C \sum_{k=1}^N y_k \right\}, \quad (15)$$

где

$$\lambda_4 = \frac{N \sum_{k=1}^N x_{ik}^2 x_{ik}^2}{\sum_{k=1}^N x_{ik}^2}; \quad C = \frac{N}{\sum_{k=1}^N x_{ik}^2};$$

$$A = \frac{1}{2\lambda_4[(n+2)\lambda - n]}.$$

Вычислим следующие значения коэффициентов уравнения (3):

$$\begin{aligned} b_0 &= 0.72; & b_{33} &= -1.95 \cdot 10^{-2}; & b_{17} &= 16.06 \cdot 10^{-4}; \\ b_{12} &= 13 \cdot 10^{-2}; & b_{77} &= -1.1 \cdot 10^{-2}; & b_{47} &= 3.8 \cdot 10^{-4}; \\ b_{13} &= 1.09 \cdot 10^{-2}; & b_{14} &= 3.2 \cdot 10^{-4}; \\ b_{15} &= 9.01 \cdot 10^{-2}; \\ b_{16} &= -1.98 \cdot 10^{-2}; \end{aligned}$$

Оценки дисперсии коэффициентов модели определяются по формулам

$$S^2(b_0) = \frac{2A\lambda_4^2(n+2)}{Nm} S^2(y); \quad (16)$$

$$S^2(b_i) = \frac{C}{Nm} S^2(y); \quad (17)$$

$$S^2(b_{ii}) = \frac{A[(n+1)\lambda_4 - (n-1)]C^2 S^2(y)}{Nm}; \quad (18)$$

$$S^2(b_{ij}) = \frac{C^2 S^2(y)}{\lambda_4 Nm}. \quad (19)$$

Число степеней свободы при использовании t — критерия равно $\nu = N(m-1)$.

$$\begin{aligned} S^2(b_0) &= 0.22 \cdot 10^{-4} \\ S^2(b_i) &= 0.30 \cdot 10^{-4} \\ S^2(b_{ii}) &= 0.73 \cdot 10^{-4} \\ S^2(b_{ij}) &= 0.038 \cdot 10^{-4} \\ \Delta(b_0) &= 0.96 \cdot 10^{-4} \\ \Delta(b_i) &= 1.14 \cdot 10^{-4} \\ \Delta(b_{ij}) &= 1.77 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S^2(b_0) &= 0.46 \cdot 10^{-2} \\ S^2(b_i) &= 0.55 \cdot 10^{-2} \\ S^2(b_{ii}) &= 0.85 \cdot 10^{-2} \\ S^2(b_{ij}) &= 0.19 \cdot 10^{-2} \\ \Delta(b_0) &= 0.40 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Таким образом, модель процесса накопобразования в «почти стационарной» области может быть описана следующим уравнением:

$$\begin{aligned} y = & 0.72 + 13 \cdot 10^{-2} x_1 - 1.09 \cdot 10^{-2} x_3 + 9.01 \cdot 10^{-2} x_7 - 1.98 \cdot 10^{-2} x_1^2 - 1.95 \cdot 10^{-2} x_3^2 - \\ & - 1.1 \cdot 10^{-2} x_7^2 - 3.2 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 - 16.06 \cdot 10^{-4} x_1 x_7 + 3.2 \cdot 10^{-4} x_3 x_7 \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$x_1 = \frac{\Delta H \cdot H - 14.4}{7.2}; \quad x_3 = \frac{V_a - 1.5}{0.5}; \quad x_7 = \frac{I_y - 1.0}{0.5}; \quad y = c_2.$$

Проверка адекватности полученного уравнения с помощью F — критерия по следующей формуле [1]:

$$F_{расч} = \frac{S_{LF} / f_{LF}}{S_E / f_E}, \quad (21)$$

где S_{LF} — сумма квадратов, связанная с дисперсией, определяющей адекватность представления результатов эксперимента, $S_{LF} = S_R - S_E$; S_R — сумма квадратов отклонений, определяющих остаточную дисперсию

$$S_R = \sum_1^N (y_p - y_p)^2 = 29,4 \cdot 10^{-3}$$

S_E — сумма квадратов, определяющих ошибку опыта

$$S_E = \sum_1^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2 = 8,94 \cdot 10^{-3}$$

Тогда $S_{LF} = 20,5 \cdot 10^{-3}$. $f_{FL} = N - \frac{(k+2)(k+1)}{2} - (n_0 - 1)$,

где N — число опытов, $N=20$; K — число факторов, $K=3$;
 n_0 — число атомов в нулевой точке, $n_0=6$; $f_{LF}=5$; $f_E=5$.

Таким образом,

$$F_{рас} = \frac{\frac{29,4 \cdot 10^{-3}}{5}}{\frac{8,9 \cdot 10^{-3}}{5}} \approx 3,3$$

При 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы для числителя $f_{LF}=5$ и для знаменателя $f_E=5$; $F_{табл.}=5,1$. Поскольку $F_{расч.} < F_{табл.}$, можно сказать, что уравнение (20) адекватно.

Определение оптимальных значений параметров обработки воды.

Согласно работам [1, 4], приведем уравнение (20) к каноническому виду

$$y - 0,92 = -1,21x_1^2 - 0,52x_2^2 - 0,13x_3^2; \quad (22)$$

где

$$x_1 = 0,54x_1 - 0,01x_3 + 0,85x_7 - 4,34;$$

$$x_2 = 0,21x_1 + 0,82x_3 + 0,35x_7 + 0,42;$$

$$x_3 = 0,12x_1 + 0,17x_3 - 0,98x_7 - 2,51.$$

Получили следующие значения координат особой точки:

$x_{15}=1,84$; $x_{45}=-0,42$; $x_{75}=2,51$; в этой же точке $y_3=0,95$.

Поскольку коэффициенты канонической формы (22) имеют одинаковые знаки (минус), можно сделать вывод, что поверхность отклика, описывающая процесс некипобразования, в «почти стационарной» области представляет собой эллипсоид

вращения. Из этого следует, что координаты оптимального режима процесса накипеобразования соответствуют координатам особой точки поверхности.

Переход от координатных значений факторов к натуральным, получаем следующие расчетные значения параметров оптимального режима процесса накипеобразования:

$$\Delta H \cdot H = 24.05; \quad V_0 = 1.3; \quad I_y = 2.21$$

Ожидаемое значение параметра оптимизации в этой точке

$$C_2 = 0.92.$$

Выводы

Результаты исследований обработки технической воды показали, что противонакипная эффективность акустимагнитного аппарата выше эффективности существующих магнитных и акустических аппаратов. Более высокая эффективность акустимагнитного аппарата объясняется обработкой воды в аппарате одновременно магнитным полем и акустическими колебаниями.

Литература

1. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. - М.: Радио и связь, -1983.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, -1971.
3. Хартман К. И др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. -М.: Мир, -1977.
4. Финаев В.И., Егоров А.В. Практическое применение методов математического планирования экспериментов. -Таганрог: ТРТИ, -1993.

The research of effectiveness of acoustic and magnetic processing of water system

V.E.Korzhakov

The author dwells upon influence of different conditions of water processing in acoustic and magnetic equipment on the process of formation of fur on the walls of the control heat-exchange tube.