

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДНЫХ СИСТЕМ

Коржаков А.В. – соискатель, ст. преподаватель

Адыгейский государственный университет

Лойко В.И. – д. т. н., профессор

Кубанский государственный аграрный университет

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

1. Описание экспериментальной установки

Исследования проведены на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рисунке 1.

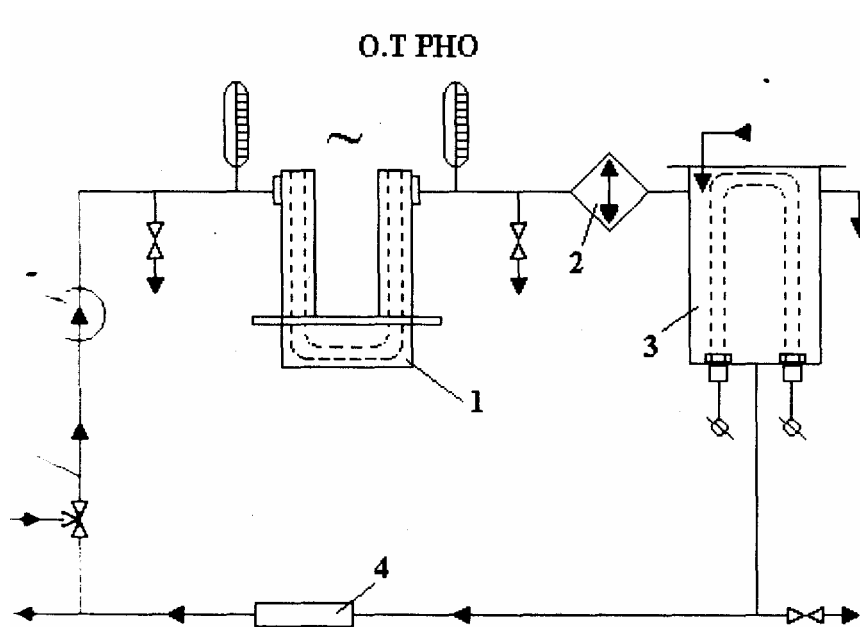


Рис.1. Схема экспериментального стенда

Опытный теплообменник 1 представляет собой трубчатый электронагреватель типа ТЭН-ОЗА, 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 на регуляторе напряжения типа РНО.

Для обеспечения постоянной температуры воды на выходе 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 использования опытного теплообменника были установлены термометры для контроля температуры воды и штуцера для отбора проб.

Циркуляционная вода подвергалась обработке в акустомагнитном аппарате 4.

Исследования были проведены на воде р. Кама, относящейся к гидрокарбонатному классу. Общее солесодержание – 1098 мг/л, общая жесткость воды – 5,2 мг-экв./л, карбонатная жесткость – 2,2 мг-экв./л. Продолжительность каждого цикла исследований составляла 48 ч. Количество накипи, образовавшейся на поверхности нагрева электронагревателя, определяли 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 объемом 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:

$$q = \frac{A_n - A_m}{A_m},$$

где A_n – количество накипи, образующейся из необработанной воды;

A_m – количество накипи, образующейся из обработанной воды.

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 рисунке 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, которая включает внешний магнитопровод, набранный из пластин 4 и 6, скрепленных 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.

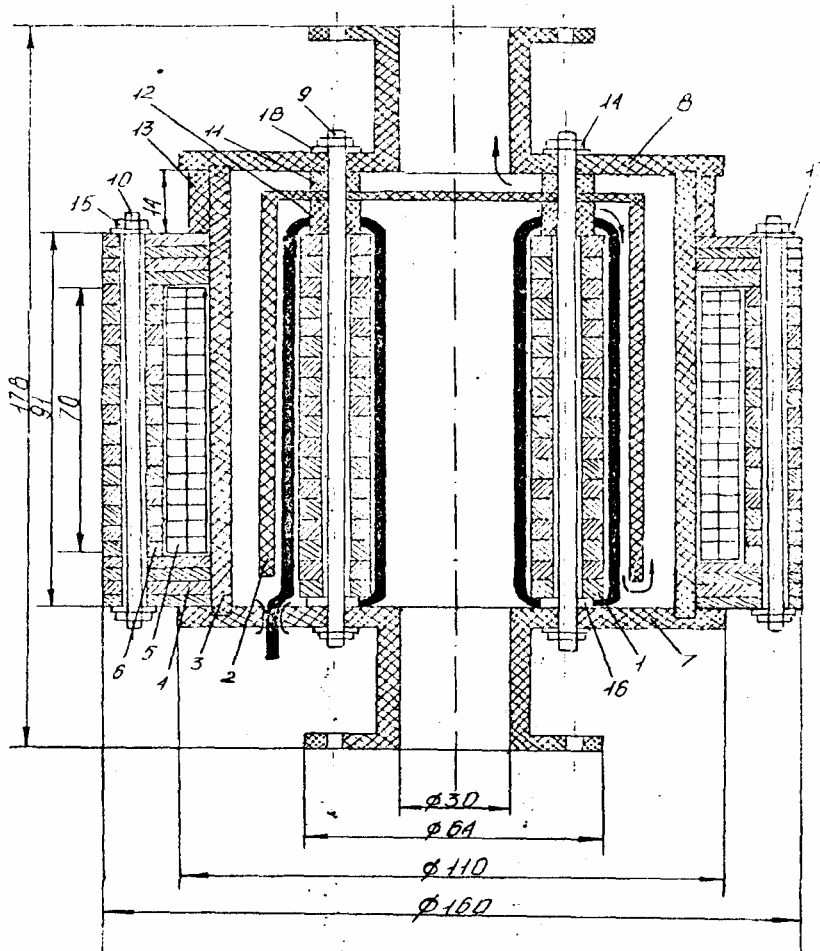


Рис.2. Акустомагнитный аппарат

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 поверхностями цилиндрического излучателя 1. Возбуждение радиальных колебаний в цилиндрическом излучателе осуществляется с помощью обмотки 19.

3. Описание метода оптимизации процесса акустомагнитной обработки воды

Накипеобразование 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 противонакипной эффект q безреагентной обработки воды, который является функцией большого числа факторов

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

Для того 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, и оптимизацией (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 (2) и их величина указывают направление движения к экстремуму исследуемой функции. После проведения некоторого количества опытов, позволяющих приблизиться к экстремальной точке, то есть попасть в так называемую «почти стационарную» область, снова ставилась серия опытов, дающих возможность аппроксимировать эту область уравнением гиперплоскости второго порядка:

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

где b_0, b_i, b_j – коэффициенты, вычисляемые по результатам опытов; x_i, x_j – факторы, включаемые в рассмотрение.

В ходе анализа уравнения (3) находим координаты оптимального режима протекания изучаемого процесса.

4. Исследование процесса накипобразования на теплообменной контрольной трубке

На лабораторной установке было изучено влияние на процесс накипобразования следующих управляемых факторов:

- произведения напряженности магнитного поля H и его градиента $\Delta H, x_1$;
- теплонапряжения поверхности нагрева Q, x_2 ;
- скорости течения воды V_e, 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 J_y, x_7 .

Противонакипной эффект определяется как отношение:

$$Q = \frac{M_H - M_0}{M_H},$$

где $M_{H,2}$ – маски накипи, осевшей на поверхности теплообмена за период t , без обработки воды, $M_{0,2}$ – то же после обработки.

4.1. Получение линейной математической модели процесса

Для того чтобы получить линейную математическую модель процесса, была реализована 1/8 реплики факторного эксперимента 2^7 [2].

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

Дисперсия оценки коэффициентов b_i может быть определена по следующей формуле:

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

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 (табл. 2).

Таблица 2. Результаты опытов

Номер опыта	y_g	$y_g - \bar{y}$	$(y_g - \bar{y}_p)$
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	0,04	0,0036
6	0,75	0,02	0,0004

Дисперсия параметра оптимизации:

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

В результате вычислений были получены следующие данные:

$$S(y) = 5,02 \cdot 10^{-2};$$

Коэффициент вариации

$$V = \frac{S(b_i)}{\bar{y}} \cdot 100 = \frac{5,02 \cdot 10^{-2}}{0,73} \cdot 100 \approx 6,88 \%.$$

Таким образом, $S(b_i) = 1,25 \cdot 10^{-2}$.

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

Доверительный интервал коэффициентов находим по формуле:

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

где t – табличное значение t -критерия при 5 % -м уровне значимости и числе степеней свободы N .

Тогда

$$\Delta b_i = \pm 2,12 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2}.$$

Коэффициент значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала. Таким образом, все найденные значения значимы, и в рассматриваемой области процесс накипеобразования может быть аппроксимирован уравнением:

$$y = (44,37 + 14,87x_1 - 3,94x_2 + 7,63x_3 + 6,25x_4 - 2,75x_5 - 2,88x_6 + 10,00x_7)10^{-2}, \quad (4)$$

где

$$x_1 = \frac{\Delta H \cdot H \cdot 10^{-3}}{7,2 \cdot 10^{-3}};$$

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

$$x_3 = \frac{V_b - 1,0}{0,5};$$

$$x_4 = \frac{l - 0,6}{0,3};$$

$$x_5 = \frac{Ж_0 - 3,0}{2,5};$$

$$x_6 = \frac{I_y - 0,5}{0,5};$$

$$y = c_2.$$

Проверка адекватности уравнения (4) выполнялась с помощью F-критерия [1]:

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}}, \quad (5)$$

где

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^n (y_э - y_p)}{n - k - 1}. \quad (6)$$

В формуле (6) $y_э$ – экспериментальное значение y (см. табл.1); y_p – расчетное значение y по уравнению (4); K – число факторов, включаемых в рассмотрение; n – число опытов (см. табл.1).

Результаты расчетов $\sum_1^n (y_э - y_p)^2$ сведены в таблицу 3.

$$S_{ад}^2 = \frac{0,0773}{8} \approx 96 \cdot 10^{-4};$$

$$F_{расч} = \frac{96 \cdot 10^{-4}}{25,2 \cdot 10^{-4}} = 3,81.$$

При 5 %-м уровне табличное значение $f_1 = N - k - 1 = 8$ и для знаменателя $f_2 = n - 1 = 5$, табличное значение F-критерия $F_{расч} < F_{табл}$, поэтому можно считать, что уравнение (4) адекватно.

Таблица 3. Результаты опытов

Номер опыта	y_s	y_p	$(y_s - y_p)$	$(y_s - y_p)^2$
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	0,09	0,0081

Анализ уравнения (4) позволяет 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.

4.2. 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 и наиболее распространенной на объектах.

Обработка технической воды совершалось в акустомагнитном аппарате с длиной зоны взаимодействия физических полей $l_{акт}=30$ см.

Для достижения максимального эффекта значения факторов x_1 , x_5 и x_6 находились на нижних уровнях, а значение фактора x_4 – на верхнем уровне. Таким образом, движение к экстремуму осуществлялось в направлении всего лишь трех факторов x_1 , x_3 и x_7 .

Матрица планирования и результатов крутого восхождения приведена в таблице 4.

Таблица 4. Матрица планирования и результатов крутого восхождения

Факторы	$x_1 * 10^{-3} \text{ км}^2/\text{м}^2$	$x_3 \text{ м/с}$	$x_7 * 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$
Основной уровень	7,2	1,0	0,6
Интервал варьирования	7,1	0,5	0,5
Коэффициент b_i	$14,87 * 10^{-2}$	$7,63 * 10^{-2}$	$10,00 * 10^{-2}$
Произведение $b_i \lambda_i$	λ_1	λ_2	λ_3
Шаг (округленно)	7,2	0,5	0,5
№ 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 № 3 значение параметра оптимизации начало уменьшается, можно предположить, что точка с коэффициентом опыта № 2 находится в «почти стационарной» области.

4.3. Получение математической модели второго порядка

Следующим этапом было получение модели второго порядка для этой области и ее исследование. Для построения модели использовалось цен-

тральное композиционное ротатабельное планирование второго порядка. Матрица планирования и результаты ее реализации приведены в таблице 5.

Таблица 5. Матрица планирования и результаты ее реализации

Факторы	$\Delta H * H * 10^{-3} \text{ кА}^2/\text{М}^2$	$V_b, \text{ м/с}$	$J_b, \text{ Вт/м}^2$	q
Основной уровень	14,4	1,5	1,0	
Интервал варьирования	7,2	0,5	0,5	
Верхний уровень	21,6	2,0	1,5	
Кодированное обозначение	x_1	x_2	x_3	y
Номер опыта				
1	+	+	+	0,89
2	-	+	-	0,41
3	+	-	-	0,71
4	-	-	+	0,60
5	+	+	-	0,74
6	-	+	+	0,59
7	+	-	+	0,82
8	-	-	-	0,40
9	+1,682	0	0	0,93
10	-1,682	0	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 вычислены коэффициенты уравнения регрессии, которые для ротатбельных планов определяются методом наименьших квадратов по следующим формулам [2]:

$$b_0 = \frac{A}{N} \left\{ 2\lambda_4^2 (n+2) \sum_{g=1}^n x_{g0} y_0 - 2\lambda_4 C \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^N x_{ig}^2 y_g \right\} \quad (7)$$

$$b_i = \frac{C}{N} \sum_{g=1}^N x_{ig} y_g; \quad (8)$$

$$b_{ij} = \frac{C^2}{N\lambda_4} \sum_{g=1}^N x_{ig} x_{jg} y_g; \quad (9)$$

$$b_{ij} = \frac{A}{N} \left\{ C^2 [(n+2)\lambda - n] \sum_{i=1}^n x_{ig}^2 y_g + C^2 (1 - \lambda_4) \sum_{i=1}^n \sum_{g=1}^N x_{ig}^2 y_g - 2\lambda_4 C \sum_{g=1}^N y_g \right\}, \quad (10)$$

где

$$\lambda_4 = \frac{N \sum_{g=1}^N x_{ig}^2 x_{jg}^2}{\sum_{g=1}^N x_{ig}^2}; \quad C = \frac{N}{\sum_{g=1}^N x_{ig}^2};$$

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

Вычислим следующие значения коэффициентов уравнения (7):

$$\begin{array}{ll}
b_0 = 0,72; & b_{33} = -1,95 \cdot 10^{-2}; \\
b_1 = 13 \cdot 10^{-2}; & b_{77} = 3,2 \cdot 10^{-2}; \\
b_3 = 1,09 \cdot 10^{-2}; & b_{14} = 3,2 \cdot 10^{-4}; \\
b_7 = 9,01 \cdot 10^{-2}; & b_{17} = 16,06 \cdot 10^{-4}; \\
b_{16} = -1,98 \cdot 10^{-2}; & b_{47} = 3,8 \cdot 10^{-4}.
\end{array}$$

Оценки дисперсии коэффициентов модели определяются по формулам

$$\begin{aligned}
S^2(b_0) &= \frac{2A\lambda_4^2(n+2)}{Nm} S^2(y); \\
S^2(b_i) &= \frac{C}{Nm} S^2(y); \\
S^2(b_{ij}) &= \frac{A[(n+1)\lambda_4 - (n-1)]C^2 S^2(y)}{Nm}; \\
S^2(b_{ij}) &= \frac{C^2 S^2(y)}{\lambda_4 Nm}.
\end{aligned}$$

Число степеней свободы при использовании t -критерия равно $V = N(m-1)$:

$$\begin{array}{lll}
S^2(b_0) = 0,22 \cdot 10^{-4} & S^2(b_0) = 0,46 \cdot 10^{-2} & \Delta(b_0) = 0,96 \cdot 10^{-4} \\
S^2(b_i) = 0,30 \cdot 10^{-4} & S^2(b_0) = 0,55 \cdot 10^{-2} & \Delta(b_0) = 1,14 \cdot 10^{-4} \\
S^2(b_{ij}) = 0,73 \cdot 10^{-4} & S^2(b_0) = 0,85 \cdot 10^{-2} & \Delta(b_0) = 1,77 \cdot 10^{-4} \\
S^2(b_{ij}) = 0,038 \cdot 10^{-4} & S^2(b_0) = 0,19 \cdot 10^{-2} & \Delta(b_0) = 0,40 \cdot 10^{-4}
\end{array}$$

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

$$\begin{aligned}
y = & 0,72 + 13 \cdot 10^{-2} x_1 - 1,09 \cdot 10^{-2} x_3 + 9,01 \cdot 10^{-2} x_7 - 1,98 \cdot 10^{-2} x_1^2 - 1,95 \cdot 10^{-2} x_3^2 \\
& - 1,1 \cdot 10^{-2} x_7^2 - 3,2 \cdot 10^{-4} x_1 x_3 - 16,06 \cdot 10^{-4} x_1 x_7 + 3,2 \cdot 10^{-4} x_3 x_7,
\end{aligned} \quad (11)$$

где

$$x_1 = \frac{\Delta H \cdot H - 14,4}{7,2}; \quad x_3 = \frac{V_g - 1,5}{0,5}; \quad x_7 = \frac{I_y - 1,0}{0,5}; \quad y = c_2.$$

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

$$F_{расч} = \frac{S_{LF}/f_{LF}}{S_E/f_E}, \quad (12)$$

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, $S_R = \sum_1^N (y_o - y_p)^2 = 29,4 \cdot 10^{-3}$, S_E – сумма квадратов, определяющих ошибку опыта $S_E = \sum_1^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2 = 8,9 \cdot 10^{-3}$.

Тогда

$$S_{LF} = 20,5 \cdot 10^{-3},$$

$$f_{LF} = N - \frac{(K+2)(K+1)}{2} - (n_0 - 1) = 5,$$

где N – число опытов, $N=20$; K – число факторов, $K=3$; n_0 – число опытов в нулевой точке, $n_0=6$;

Подставляем полученные значения в формулу для проверки адекватности:

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

При 5 %-м уровне значимости и числе степеней свобод для числителя $f_{LF} = 5$ и для знаменателя $f_E = 5$ находим табличное значение $F_{табл} = 5,1$.

Так как $F_{расч} < F_{табл}$, можно считать, что уравнение (11) адекватно.

Определение оптимальных значений параметров обработки воды

Согласно работам [1,4], приведем уравнение (11) к каноническому виду

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

где

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

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

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

Получили следующие значения координат особой точки:

$$x_{15} = 1,84; \quad x_{45} = -0,42; \quad x_{75} = 2,51.$$

В этой точке $y_3 = 0,95$.

Поскольку коэффициенты канонической формы (13) имеют одинаковые знаки (минус), можно сделать вывод о том, что поверхность отклика, описывающая процесс накипеобразования в «почти стационарной» области, представляет собой эллипсоид вращения. Из этого следует, что координаты оптимального режима процесса накипеобразования соответствуют координатам особой точки поверхности.

В результате перехода от координатных значений факторов к натуральным получаем следующие расчетные значения параметров оптимального режима процесса накипеобразования:

$$\Delta H \cdot H = 24,05; \quad V_B = 1,3; \quad I_y = 2,21.$$

Ожидаемое значение параметра оптимизации в точке $C_2 = 0,92$.

Выводы. Результаты исследований обработки технической воды показали, что противонакипная эффективность акустомагнитного аппарата выше, чем у существующих магнитных и акустических аппаратов, благодаря обработке воды одновременно магнитным полем и акустическими колебаниями.

Список литературы

1. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. М.: Радио и связь, 1983.
2. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1971.

3. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977.
4. Финаев В.И. и др. Практическое применение методов математического планирования экспериментов / В.И. Финаев, А.В. Егоров. Таганрог: ТРТИ, 1993.