

УДК 004.072.4; 621.187.12

UDC 004.072.4; 621.187.12

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

4.3.1. Technologies, machines, and equipment for the agro-industrial complex

ОЦЕНКА ПРОТИВОНАКИПНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АКУСТИКО-МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СИСТЕМНО-КОГНИТИВНОГО АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

EVALUATION OF ANTI-SCALE EFFICIENCY OF ACOUSTIC-MAGNETIC TREATMENT OF TECHNICAL WATER BASED ON INTEGRATION OF SYSTEM-COGNITIVE ANALYSIS AND MATHEMATICAL STATISTICS

Коржаков Валерий Евгеньевич
к.т.н., доцент

*Адыгейский государственный университет,
Майкоп, Российская Федерация*

Korzhakov Valery Evgenievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Adyge State University, Maykop, Russian Federation

Коржаков Даниил Алексеевич
магистрант

*Адыгейский государственный университет,
Майкоп, Российская Федерация*

Korzhakov Daniil Alekseevich

Master's student

Adyge State University, Maykop, Russian Federation

В работе представлены результаты комплексной количественной оценки связи управляемых параметров акустико-магнитной обработки технической воды с бинаризованным противонакипным эффектом. Исследование выполнено на основе экспериментального массива данных ($N = 16$), полученных на циркуляционном стенде с использованием воды реки Кама (общая жёсткость 5,2 мг-экв/л). Варьировались семь факторов: произведение напряжённости магнитного поля на её градиент, теплонпряжение поверхности нагрева, скорость потока, длина рабочей зоны, исходная жёсткость, температура и интенсивность ультразвуковых колебаний. Для анализа применён комплекс методов: автоматизированный системно-когнитивный анализ (АСК-анализ) с расчётом дифференциальной силы влияния факторов, а также классические статистические процедуры — точный критерий Фишера, коррекция Холма на множественные сравнения, вычисление разности рисков, отношения шансов и коэффициента V Крамера. Установлено, что единственным статистически значимым фактором, определяющим высокую противонакипную эффективность, является интенсивность ультразвука ($p = 0,00055$, скорректированный $p = 0,00385$, $V = 1,000$). Остальные шесть факторов (магнитное поле, тепловая нагрузка, скорость, длина зоны, жёсткость и температура) в исследованных диапазонах не проявляют значимого влияния ($p = 1,000$). Опровергнута ранее выдвигавшаяся гипотеза об отрицательном влиянии длины рабочей зоны. Показано полное совпадение выводов АСК-анализа и строгой статистики, что подтверждает объективность когнитивных моделей при условии использования верифицированных данных. Сформулированы практические рекомендации по

The article presents the results of a comprehensive quantitative assessment of the relationship between controlled parameters of acoustic-magnetic treatment of technical water and the binarized anti-scale effect. The study is based on an experimental dataset ($N = 16$) obtained on a circulation test bench using water from the Kama River (total hardness 5.2 mg-eq/L). Seven factors were varied: the product of magnetic field strength and its gradient, heat flux density on the heating surface, flow velocity, length of the working zone, initial hardness, temperature, and ultrasonic intensity. A combination of methods was applied for analysis: automated system-cognitive analysis (ASC-analysis) with calculation of differential influence strength of factors, as well as classical statistical procedures — Fisher's exact test, Holm correction for multiple comparisons, calculation of risk difference, odds ratio, and Cramér's V coefficient. It was established that the only statistically significant factor determining high anti-scale efficiency is ultrasound intensity ($p = 0.00055$, adjusted $p = 0.00385$, $V = 1.000$). The remaining six factors (magnetic field, thermal load, velocity, zone length, hardness, and temperature) do not exhibit significant influence within the studied ranges ($p = 1.000$). The previously proposed hypothesis of a negative effect of the working zone length is refuted. Complete agreement between ASC-analysis and rigorous statistical methods is shown, confirming the objectivity of cognitive models provided that verified data are used. Practical recommendations are formulated for designing compact acoustic-magnetic devices with a working zone length of 0.3 m and priority setting of ultrasound intensity to 1.0 W/cm². The applicability limits of the models are established due to the small sample size and class imbalance, which defines directions for further full-factorial experiments

проектированию компактных акустико-магнитных аппаратов с длиной зоны 0,3 м и приоритетной настройкой ультразвука на интенсивность 1,0 Вт/см². Установлены границы применимости моделей, обусловленные малым объёмом выборки и дисбалансом классов, что определяет направления дальнейших полнофакторных экспериментов

Ключевые слова: ПРОТИВОНАКИПНАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ, АКУСТИКО-МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА, СИСТЕМНО-КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ, ТОЧНЫЙ КРИТЕРИЙ ФИШЕРА, КОРРЕКЦИЯ ХОЛМА, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИЯ, КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ, ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА, МАЛЫЕ ВЫБОРКИ, РЕГУЛЯРИЗОВАННАЯ РЕГРЕССИЯ

Keywords: ANTI-SCALE WATER TREATMENT, ACOUSTIC-MAGNETIC TREATMENT, SYSTEM-COGNITIVE ANALYSIS, FISHER'S EXACT TEST, HOLM CORRECTION, ULTRASONIC CAVITATION, CALCIUM CARBONATE CRYSTALLIZATION, HEAT EXCHANGE EQUIPMENT, MATHEMATICAL STATISTICS, SMALL SAMPLES, REGULARIZED REGRESSION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-221-011>

Введение

Интенсификация теплообменных процессов в энергетических установках, промышленном оборудовании и системах коммунального теплоснабжения напрямую связана с чистотой поверхностей нагрева. Образование плотных кристаллических отложений солей жесткости (преимущественно карбоната кальция CaCO_3) приводит к колоссальному падению коэффициента теплопередачи, термическому перегреву металлических стенок трубок, аварийным остановам и существенному перерасходу топлива.

Традиционные химические методы водоподготовки (ионный обмен, известкование, введение комплексонов) требуют регулярных затрат химических реагентов и создают экологически опасные сточные воды. В связи с этим в последние десятилетия особое внимание привлекают безреагентные (физические) методы обработки воды, основанные на применении постоянных и импульсных магнитных полей, ультразвуковых колебаний, электродинамических и акустических воздействий.

Несмотря на многочисленные данные о технологической эффективности физической водоподготовки, ключевой научной проблемой остается недостаточная воспроизводимость результатов при переходе от лабораторных стендов к промышленным объектам. Это обусловлено многофакторным характером процесса кристаллизации солей жесткости, при котором на конечный противонакипный эффект одновременно влияют гидродинамические параметры потока, тепловое напряжение поверхностей нагрева, химический состав воды и пространственно-временные характеристики физических полей.

Для выявления нелинейных факторных зависимостей в сложных технологических системах профессор Е. В. Луценко предложил метод автоматизированного системно-когнитивного анализа (АСК-анализа). АСК-анализ позволяет формировать когнитивные обобщенные образы классов и оценивать силу влияния отдельных уровней факторов на целевые состояния системы. Однако в практике применения АСК-анализа исследователи нередко упускают из виду необходимость независимой проверки выявленных закономерностей традиционными методами математической статистики, что может приводить к ложным выводам при работе с небольшими выборками и неполными факторными планами.

Научная гипотеза исследования состоит в том, что комплексное сочетание АСК-анализа и строгих методов классической математической статистики (точных критериев для малых выборок и процедур коррекции множественных сравнений) позволяет объективно выделить действительно управляющие физические факторы противонакипного эффекта и отсеять статистически неинформативные переменные.

Цель исследования — комплексная количественная оценка связи управляемых параметров акустико-магнитной обработки технической воды с бинаризованным противонакипным эффектом на основе совместного использования АСК-анализа и методов математической

статистики с явным установлением границ доказательной силы имеющегося экспериментального массива.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие конкретные задачи:

1. Выполнить полный аудит первичного экспериментального массива, зафиксированного в исходных лабораторных протоколах, установив фактическую структуру факторного плана и распределение отклика.
2. Провести независимый описательный и частотный статистический анализ с вычислением точных доверительных интервалов для пропорций.
3. Оценить статистическую значимость влияния каждого из семи факторов с помощью точного критерия Фишера и выполнить коррекцию на множественные сравнения по методу Холма.
4. Рассчитать академические показатели размера эффекта (разность рисков, отношение шансов, V Крамера).
5. Выполнить перерасчет показателей АСК-анализа на фактических данных и провести сопоставительный анализ результатов АСК-анализа с критериями классической статистики.
6. Сформулировать физически и статистически обоснованные практические рекомендации и ограничения применения полученных моделей.

Материалы и методы

Экспериментальный стенд и объект исследования

Эксперименты проводились на специализированном циркуляционном стенде. В качестве рабочей среды использовалась техническая вода реки Кама, характеризующаяся минерализацией (общее солесодержание) 1098 мг/л и общей жесткостью 5,2 мг-экв/л. Вода

подвергалась циркуляционной обработке в комбинированном акустико-магнитном аппарате. Продолжительность каждого экспериментального цикла составляла 48 часов.

Количественная оценка массы сформировавшейся накипи производилась объемным методом: образовавшийся на нагревательном элементе осадок растворялся в 0,2 н. растворе кальцинированной соды (Na_2CO_3), избыток которой затем оттитровывался 0,2 н. растворе соляной кислоты (HCl). Результаты титрования пересчитывались на эквивалентное содержание карбоната кальция (CaCO_3).

Факторы эксперимента и их кодирование

В ходе эксперимента варьировались семь управляемых факторов ($X_1 \dots X_7$), охватывающих геометро-магнитные, теплофизические, гидродинамические и акустические параметры процесса:

- X_1 ($H \cdot \Delta H/\text{Grad}$): произведение напряжённости магнитного поля H на его градиент ΔH , $\text{A}^2/\text{м}^3$;
- X_2 (Q/Heat): теплонапряжение поверхности нагрева Q , $\text{кВт}/\text{м}^2$;
- X_3 ($V_{\text{в}}/\text{Flow}$): скорость течения воды в рабочей зоне $V_{\text{в}}$, $\text{м}/\text{с}$;
- X_4 (l/Len): длина рабочего участка магнитного аппарата l , м ;
- X_5 ($J_0/\text{Hardness}$): общая жесткость исходной воды J_0 , $\text{мг-экв}/\text{л}$;
- X_6 (t/Temp): температура обрабатываемой воды t , $^{\circ}\text{C}$;
- X_7 ($I/\text{US/Int}$): интенсивность ультразвуковых колебаний I , $\text{Вт}/\text{см}^2$.

Каждый фактор варьировался на двух физических уровнях: нижнем (обозначаемом как -1) и верхнем (обозначаемом как $+1$). Параметры варьирования факторов приведены в таблице 1.

Физические уровни варьирования управляемых факторов

Фактор	Код	Единица изм.	Нижний (-1)	Верхний ($+1$)	Интервал
Произведение $H \cdot \Delta H$	X_1	A^2/m^3	7,25	7,35	0,10
Теплонапряжение Q	X_2	$кВт/м^2$	5,0	25,0	20,0
Скорость потока V_v	X_3	$м/с$	0,5	1,5	0,50
Длина зоны l	X_4	$м$	0,3	0,9	0,30
Жесткость воды $Ж_0$	X_5	$мг-экв/л$	0,5	5,5	2,50
Температура t	X_6	$^{\circ}C$	10	50	20,0
Интенсивность УЗ I	X_7	$Вт/см^2$	0,1	1,0	0,45

Формирование отклика и дихотомизация классов

Выходной параметр (противонакипный эффект y) подвергался процедуре дихотомизации по установленной границе $y = 0,40$. На основе этого правила формировалась бинарная целевая переменная $Y \in \{0,1\}$:

- Класс 0 («Низкая эффективность»): $y < 0,40$;
- Класс 1 («Высокая эффективность»): $y \geq 0,40$.

Вероятность априорного появления класса $k \in \{0,1\}$ определяется как относительная частота:

$$\hat{p}_k = \frac{n_k}{N} \quad (1)$$

где n_k — число наблюдений класса k , N — общий объем выборки ($N = 16$).

Методы статистического анализа

Автоматизированный системно-когнитивный анализ (АСК-анализ)

В рамках АСК-анализа для каждого уровня каждого фактора $X_i = x$ рассчитываются условные вероятности его наблюдения при условии принадлежности объекта к классу $Y = k$:

$$P(X_i = x | Y = k) = \frac{n(X_i = x, Y = k)}{n_k} \quad (2)$$

Основной мерой информационной силы влияния (дифференциальной силы связи) уровня фактора на переход системы в класс $Y = 1$ по сравнению с классом $Y = 0$ в АСК-анализе выступает разность условных вероятностей ΔP_i :

$$\Delta P_i = P(X_i = +1 | Y = 1) - P(X_i = +1 | Y = 0) \quad (3)$$

Знак ΔP_i указывает на направление ассоциированного смещения: $\Delta P_i > 0$ соответствует росту вероятности высокой эффективности при верхнем уровне фактора, а $\Delta P_i < 0$ — снижению вероятности.

Классические статистические методы

Для малых выборок оценкой доли успехов выступает точечная пропорция $\hat{p} = a/n$. Точечные оценки сопровождаются 95%-ными доверительными интервалами Уилсона (Wilson score interval), обладающими высокими характеристиками покрытия при малых N :

$$CI_{95\%}(p) = \frac{\hat{p} + \frac{z^2}{2N} \pm z \sqrt{\frac{\hat{p}(1 - \hat{p})}{N} + \frac{z^2}{4N^2}}}{1 + \frac{z^2}{N}} \quad (4)$$

где $z = 1,96$ для уровня надежности $\gamma = 0,95$.

Разность рисков (Risk Difference, RD) между верхним и нижним уровнями фактора определяется выражением:

$$RD = \hat{p}(+1) - \hat{p}(-1) \quad (5)$$

где $\hat{p}(+1)$ и $\hat{p}(-1)$ — доли исходов класса 1 при верхнем и нижнем уровнях фактора соответственно.

Отношение шансов (Odds Ratio, OR) рассчитывается по таблице сопряженности 2×2 . В случаях присутствия нулевых ячеек используется коррективная Хепберна–Холдейна (добавление 0,5 к каждой ячейке):

$$OR_{adj} = \frac{(a + 0,5)(d + 0,5)}{(b + 0,5)(c + 0,5)} \quad (6)$$

где a, b, c, d — частоты четырех ячеек таблицы сопряженности.

Проверка статистической значимости и коррекция на множественные сравнения

Для каждой таблицы сопряженности проверяется нулевая гипотеза H_0 : «Связь между фактором X_i и классом отклика Y отсутствует». Ввиду малого объема выборки ($N = 16$) и низких ожидаемых частот единственно корректным критерием проверки гипотез выступает двусторонний точный критерий Фишера (Fisher's exact test):

$$p = \frac{\binom{a+b}{a} \binom{c+d}{c}}{\binom{N}{a+c}} = \frac{(a+b)! (c+d)! (a+c)! (b+d)!}{a! b! c! d! N!} \quad (7)$$

Поскольку одновременно проверяются гипотезы по $m = 7$ факторам, для предотвращения ошибки I рода (ложноположительного обнаружения) применяется пошаговая процедура Холма (Holm step-down procedure). Исходные значения $p_{(1)} \leq p_{(2)} \leq \dots \leq p_{(m)}$ пересчитываются по правилу:

$$p_{\text{adj},(i)} = \min \left(1, \max_{k \leq i} ((m - k + 1) p_{(k)}) \right) \quad (8)$$

Мера тесноты связи оценивается коэффициентом фи-Пирсона или сопряженности Крамера:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{N \min(r-1, c-1)}} \quad (9)$$

где для таблиц 2×2 значение $V \in [0,1]$.

При попытке построения бинарной логистической регрессии вида (10):

$$\text{logit Pr}(Y = 1) = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i X_i \quad (10)$$

проверяется наличие явления полной или квазиполной сепарации данных (data separation).

Результаты

Аудит исходных экспериментальных данных и структура массива

Прямое считывание первично зафиксированного файла данных позволило установить строгие характеристики имеющегося массива:

- Полный объем наблюдений: $N = 16$ (строки с ID 1 по ID 16).
- Распределение целевого класса Y : класс 1 («Высокий») содержит $n_1 = 12$ наблюдений (75,0%), класс 0 («Низкий») содержит $n_0 = 4$ наблюдения (25,0%).
- Структура факторного плана: экспериментальный массив не является полным факторным экспериментом 2^7 (требующим 128 опытов). Он представляет собой специальную планово-однофакторную комбинацию (OFAT-схему), в которой вокруг базового технологического режима (ID 1–4: $X_1 \dots X_6$ на верхнем уровне) поочередно варьируются отдельные факторы с добавлением крайнего режима (ID 16, где все факторы на нижнем уровне).

Сводная структура фактического массива приведена в таблице 2.

Структура экспериментального массива и распределение факторов ($N = 16$)

ID	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	Класс Y
1	7,35	25	1,5	0,3	5,5	50	1,0	1
2	7,35	25	1,5	0,9	5,5	50	1,0	1
3	7,35	25	1,5	0,3	5,5	50	0,1	0
4	7,35	25	1,5	0,9	5,5	50	0,1	0
5	7,35	25	0,5	0,3	5,5	50	1,0	1
6	7,35	25	0,5	0,9	5,5	50	1,0	1
7	7,35	5	1,5	0,3	5,5	50	1,0	1
8	7,35	5	1,5	0,9	5,5	50	1,0	1
9	7,25	25	1,5	0,3	5,5	50	1,0	1
10	7,25	25	1,5	0,9	5,5	50	1,0	1
11	7,35	25	1,5	0,3	0,5	50	1,0	1
12	7,35	25	1,5	0,9	0,5	50	1,0	1
13	7,35	25	1,5	0,3	5,5	10	1,0	1
14	7,35	25	1,5	0,9	5,5	10	1,0	1
15	7,35	25	1,5	0,3	5,5	50	0,1	0
16	7,25	5	0,5	0,9	0,5	10	0,1	0

Описательная статистика факторов

Для каждого из семи факторов рассчитаны основные характеристики положения и рассеяния. Ввиду ограниченного объема выборки помимо среднего значения и стандартного отклонения приведены медианы и межквартильные размахи (таблица 3). Нулевые значения межквартильного размаха для факторов $X_1, X_2, X_3, X_5, X_6, X_7$ обусловлены двухуровневым планом эксперимента, при котором большинство наблюдений сосредоточено на верхнем уровне, что не свидетельствует об отсутствии вариативности данных, а является следствием структуры плана.

Описательная статистика управляемых факторов ($N = 16$)

Переменная	Среднее	Ст. откл.	Медиана	Мин.	Макс.	IQR
$X_1 (H \cdot \Delta H)$	7,331	0,035	7,35	7,25	7,35	0,00
$X_2 (Q)$	21,25	7,19	25,0	5,0	25,0	0,00
$X_3 (V_B)$	1,313	0,360	1,50	0,50	1,50	0,00
$X_4 (I)$	0,600	0,310	0,60	0,30	0,90	0,60
$X_5 (Ж_0)$	4,563	1,825	5,50	0,50	5,50	0,00
$X_6 (t)$	42,50	15,28	50,0	10,0	50,0	0,00
$X_7 (I)$	0,775	0,390	1,00	0,10	1,00	0,00

Анализ таблиц сопряженности и точные критерии

Для каждого фактора построены таблицы сопряженности размерностью 2×2 , связывающие уровень варьирования фактора с целевым классом Y . В таблице 4 сопоставлены частотные распределения и результаты проверки гипотез с помощью точного критерия Фишера.

Анализ таблиц сопряженности и точные критерии

Фактор	Уровень	Класс 0	Класс 1	Доля Кл. 1	p-value (Fisher)	p-value (Holm)
$X_1 (H \cdot \Delta H)$	-1 (7,25)	1	2	66,7%	1,000	1,000
	+1 (7,35)	3	10	76,9%		
$X_2 (Q)$	-1 (5,0)	1	2	66,7%	1,000	1,000
	+1 (25,0)	3	10	76,9%		
$X_3 (V_B)$	-1 (0,5)	1	2	66,7%	1,000	1,000
	+1 (1,5)	3	10	76,9%		
$X_4 (I)$	-1 (0,3)	2	6	75,0%	1,000	1,000
	+1 (0,9)	2	6	75,0%		
$X_5 (Ж_0)$	-1 (0,5)	1	2	66,7%	1,000	1,000
	+1 (5,5)	3	10	76,9%		
$X_6 (t)$	-1 (10)	1	2	66,7%	1,000	1,000
	+1 (50)	3	10	76,9%		
$X_7 (I)$	-1 (0,1)	4	0	0,0%	0,00055	0,00385
	+1 (1,0)	0	12	100,0%		

Из данных таблицы 4 следует фундаментальный результат: единственный фактор, демонстрирующий статистически значимую связь с противонакипным эффектом, — это интенсивность ультразвуковых колебаний X_7 ($p = 0,00055$). После проведения коррекции Холма на множественные сравнения значимость фактора X_7 полностью сохраняется ($p_{adj} = 0,00385 < 0,05$).

Все остальные факторы ($X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$) характеризуются значением $p = 1,000$, что указывает на отсутствие статистически значимых различий в эффективности при изменении их уровней в пределах исследованных диапазонов.

Оценка размеров эффектов

Для детального анализа силы связи вычислены академические показатели размера эффекта: разность рисков (RD), отношение шансов (OR_{adj}) и коэффициент V Крамера (таблица 5).

Оценки размеров эффектов и 95%-ные доверительные интервалы

Фактор	Разность рисков RD	95% ДИ для RD	Отношение шансов OR_{adj}	V Крамера
$X_1 (H \cdot \Delta H)$	+0,103	[-0,462; +0,668]	1,67	0,092
$X_2 (Q)$	+0,103	[-0,462; +0,668]	1,67	0,092
$X_3 (V_B)$	+0,103	[-0,462; +0,668]	1,67	0,092
$X_4 (I)$	0,000	[-0,432; +0,432]	1,00	0,000
$X_5 (Ж_0)$	+0,103	[-0,462; +0,668]	1,67	0,092
$X_6 (t)$	+0,103	[-0,462; +0,668]	1,67	0,092
$X_7 (I)$	+1,000	[+0, 663; +1, 000]	225,00	1,000

Для фактора X_7 наблюдается совершенное разделение классов ($V = 1,000$). При высоком уровне ультразвука ($X_7 = 1,0$) вероятность высокой эффективности составляет 100,0% (12/12), тогда как при низком уровне ($X_7 = 0,1$) вероятность высокой эффективности равна 0,0% (0/4). Разность рисков достигает максимально возможного значения $RD = +1,000$ (100%).

Для фактора X_4 (длина зоны l) значение $RD = 0,000$ и $OR = 1,00$, что указывает на абсолютное отсутствие эффекта варьирования длины в исследованном массиве наблюдений.

Визуализация силы влияния факторов

Для наглядного представления результатов в таблице 6 приведены значения дифференциальной силы влияния ΔP_i для всех семи факторов.

Дифференциальная сила влияния факторов ΔP_i

Фактор	ΔP_i
$X_1 (H \cdot \Delta H)$	0,083
$X_2 (Q)$	0,083
$X_3 (V_B)$	0,083
$X_4 (l)$	0,000
$X_5 (Ж_0)$	0,083
$X_6 (t)$	0,083
$X_7 (I)$	1,000

По этим данным наглядно прослеживается доминирующее положение фактора X_7 и близкие к нулю значения для остальных факторов.

Проверка логистической регрессии и сепарации данных

При попытке оценивания параметров бинарной логистической регрессии (10) алгоритм максимизации функции правдоподобия не сходится за конечное число итераций. Оценка коэффициента β_7 устремляется к $+\infty$, а стандартные ошибки $SE(\beta_7)$ превышают 10^3 . Это обусловлено тем, что фактор X_7 идеальным образом разделяет классы (при

$X_7 = 1,0$ нет ни одного случая $Y = 0$, а при $X_7 = 0,1$ нет ни одного случая $Y = 1$).

В условиях полной сепарации данных точечные оценки стандартной логистической регрессии становятся несостоятельными. Единственно надежным математическим основанием для выводов выступает точный критерий Фишера, результаты которого приведены выше.

Применение регуляризованной логистической регрессии с Firth-коррекцией позволило получить конечные оценки: $\beta_7 = 4,82$ ($SE = 2,14$, $p = 0,024$). Несмотря на ожидаемое уменьшение величины коэффициента, фактор X_7 остается статистически значимым ($p < 0,05$), что подтверждает устойчивость вывода о его доминирующей роли.

Результаты АСК-анализа

Перерасчет условных вероятностей (2) и дифференциальной силы влияния (3) на основе фактических данных $N = 16$ позволил сформировать объективные когнитивные образы классов (таблица 7).

Результаты АСК-анализа на фактическом массиве наблюдений ($N = 16$)

Фактор / Уровень	$P(X_i Y = 0)$	$P(X_i Y = 1)$	ΔP_i	Интерпретация АСК
$X_1(+1)$ (7,35)	0,750 (3/4)	0,833 (10/12)	+0,083	Слабое положительное
$X_2(+1)$ (25,0)	0,750 (3/4)	0,833 (10/12)	+0,083	Слабое положительное
$X_3(+1)$ (1,5)	0,750 (3/4)	0,833 (10/12)	+0,083	Слабое положительное
$X_4(+1)$ (0,9)	0,500 (2/4)	0,500 (6/12)	0,000	Нейтральное (отсутствует)
$X_5(+1)$ (5,5)	0,750 (3/4)	0,833 (10/12)	+0,083	Слабое положительное
$X_6(+1)$ (50)	0,750 (3/4)	0,833 (10/12)	+0,083	Слабое положительное
$X_7(+1)$ (1,0)	0,000 (0/4)	1,000 (12/12)	+1,000	Абсолютно доминирующее

Сопоставление АСК-анализа и классической статистики

В таблице 8 проведено парное сопоставление результатов, получаемых методами АСК-анализа и традиционной математической статистики.

Сопоставительный анализ результатов АСК-анализа и математической статистики

Фактор	Сила ΔP (АСК)	p -value (Fisher)	Стат. значимость ($\alpha = 0,05$)	Согласованность выводов
$X_1 (H \cdot \Delta H)$	+0,083	1,000	Не установлена	Полное совпадение
$X_2 (Q)$	+0,083	1,000	Не установлена	Полное совпадение
$X_3 (V_B)$	+0,083	1,000	Не установлена	Полное совпадение
$X_4 (I)$	0,000	1,000	Не установлена	Полное совпадение
$X_5 (Ж_0)$	+0,083	1,000	Не установлена	Полное совпадение
$X_6 (t)$	+0,083	1,000	Не установлена	Полное совпадение
$X_7 (I)$	+1,000	0,00055	Подтверждена	Полное совпадение

Как видно из таблицы 8, при выполнении расчетов на строгом первичном массиве данных методы АСК-анализа и классической математической статистики приходят к абсолютно идентичным выводам:

Ошибочное утверждение исходной работы о якобы отрицательном влиянии длины X_4 ($\Delta P = -0,24$) опровергнуто: фактическое значение $\Delta P = 0,000$, критерий Фишера $p = 1,000$.

Фактор интенсивности ультразвука X_7 признается единственным детерминирующим фактором ($\Delta P = +1,000$, $p = 0,00055$).

Факторы $X_1 \dots X_6$ демонстрируют ничтожно малую силу связи ($\Delta P = +0,083$), которая классической статистикой признается случайным шумом ($p = 1,000$).

Обсуждение и практические рекомендации

Физическая интерпретация доминирующей роли ультразвука

Полученный результат о доминирующей роли ультразвукового воздействия (X_7) полностью согласуется с современными представлениями о кинетике нуклеации в акустических полях. Акустическая кавитация, возникающая при интенсивности $1,0 \text{ Вт/см}^2$, создает в жидкости зоны экстремальных давлений (до 1000 атм) и температур (до 5000 К) [11]. Эти условия приводят к нескольким ключевым эффектам:

1. Гомогенная нуклеация. Микроскопические пузырьки, схлопываясь, генерируют ударные волны, которые разрушают ионы и комплексы в пристеночных слоях, способствуя образованию большого числа центров кристаллизации непосредственно в объеме жидкости, а не на нагревательной поверхности [12].

2. Микропотоки и перемешивание. Интенсивные акустические течения (микростримеры) обеспечивают высокоскоростной массоперенос, что препятствует росту крупных кристаллов на стенках и способствует их уносу потоком.

3. Дегазация. Ультразвук способствует удалению растворенных газов (CO_2), что сдвигает карбонатное равновесие и изменяет морфологию кристаллов CaCO_3 , делая их менее склонными к образованию плотных отложений.

Отсутствие эффекта от магнитного поля (X_1) не противоречит литературным данным, указывающим на сильную зависимость его эффективности от химического состава воды и гидродинамических условий [2].

Отрицательный результат по длине зоны и его инженерное значение

Впервые на основе объективных первичных данных опровергнута гипотеза об отрицательном влиянии длины рабочей зоны (X_4). Показано, что в диапазоне от 0,3 до 0,9 м изменение длины не оказывает влияния на результат ($p = 1,000$, $\Delta P = 0,000$). Это объясняется тем, что процессы кавитационного зарождения кристаллов происходят на начальном участке зоны воздействия. Как только достигнут порог кавитации, дальнейшее увеличение длины не дает прироста эффективности, а лишь увеличивает гидравлическое сопротивление и металлоемкость аппарата. Этот вывод имеет критическое значение для проектирования компактных и дешевых устройств.

Сопоставление полученных результатов с данными современной научной литературы позволяет дать физическую интерпретацию выявленным закономерностям.

Доминирующая роль ультразвукового воздействия (X_7) полностью согласуется с современными представлениями о кинетике нуклеации в акустических полях. Акустическая кавитация и микропотоки, создаваемые ультразвуком высокой интенсивности ($1,0 \text{ Вт/см}^2$), способствуют массовому гетерогенному зарождению кристаллов солей жесткости непосредственно в объеме жидкости, а не на нагревательных поверхностях трубок. Образовавшиеся объемные микрокристаллы выносятся потоком воды в виде легко удаляемого шлама, предотвращая формирование плотной первичной пленки накипи.

Отсутствие статистически значимого влияния геометрической длины рабочей зоны (X_4) в диапазоне от 0,3 до 0,9 м объясняется тем, что при достижении порога кавитации ключевые физико-химические процессы дегазации и формирования зародышей кристаллизации происходят на начальном участке облучения за доли секунды. Дальнейшее увеличение протяженности аппарата не оказывает дополнительного противонакипного действия.

Критически важным научным выводом данной работы является демонстрация опасности некорректной интерпретации первичных данных. В ранних публикациях по данной тематике из-за искажения статистических протоколов делался ложный вывод о наличии отрицательной корреляции фактора длины X_4 , что аргументировалось гипотезой о «затухании волнового фронта». Настоящее исследование, опирающееся на первичный массив данных, доказало, что фактор длины в исследованных границах индифферентен ($\Delta P = 0,000$, $p = 1,000$).

На основе проведенного анализа инженерам-теплоэнергетикам и специалистам по водоподготовке рекомендуются следующие технологические регламенты:

1. **Приоритет акустической активации** (основание: статистически подтвержденный результат, $p = 0,00055$): ключевым условием достижения высокого противонакипного эффекта является вывод ультразвуковых излучателей на верхний рабочий уровень интенсивности ($1,0 \text{ Вт/см}^2$). Снижение интенсивности до $0,1 \text{ Вт/см}^2$ приводит к обнулению эффективности во всем исследованном диапазоне других параметров.
2. **Оптимизация металлоемкости аппаратов** (основание: АСК-результат и доказанное отсутствие эффекта X_4): увеличение длины рабочей зоны аппарата свыше 0,3 м не приводит к росту противонакипного эффекта. В связи с этим целесообразно проектировать компактные акустико-магнитные блоки с длиной зоны воздействия 0,3 м, что снизит гидравлическое сопротивление и металлоемкость оборудования.
3. **Диапазоны для дальнейших экспериментов** (основание: физически обоснованная гипотеза): для факторов X_1, X_2, X_3, X_5, X_6 в представленном массиве более высокая вероятность класса 1 наблюдалась при верхних уровнях, однако для оптимизации их значений необходимо проведение полнофакторных экспериментов с большим объемом выборки.

Таким образом, полученные результаты позволяют провести содержательный анализ соответствия разработанной методологии акустико-магнитной обработки воды задачам агропромышленного комплекса и определить её место в системе технических средств для сельскохозяйственного производства.

Объект исследования — теплообменное оборудование — является критическим элементом инфраструктуры большинства

агропромышленных предприятий. Системы теплоснабжения тепличных комплексов, котельные установки животноводческих ферм, пастеризаторы в молочной промышленности, сушильные камеры для зерна и овощей — все эти аппараты в условиях эксплуатации на жёстких природных водах неизбежно сталкиваются с проблемой карбонатных отложений. Как показано в работе, образование накипи приводит к резкому падению коэффициента теплопередачи, перегреву металла, аварийным остановам и дополнительному расходу топлива. Для сельскохозяйственного производства, где сезонность работ часто не допускает длительных простоев, а энергетические затраты составляют значительную долю себестоимости, надёжность и энергоэффективность теплообменного оборудования приобретают стратегическое значение. Таким образом, выбор тематики исследования полностью отвечает приоритетам специальности 4.3.1, ориентированной на разработку и совершенствование технических средств для АПК.

Ключевым результатом работы является строгое количественное доказательство того, что определяющим фактором противонакипной эффективности выступает интенсивность ультразвуковых колебаний ($p = 0,00055$, скорректированный $p = 0,00385$, $V = 1,000$), в то время как остальные шесть исследованных параметров (произведение напряжённости магнитного поля на её градиент, теплонапряжение, скорость потока, длина рабочей зоны, исходная жёсткость и температура) в изученных диапазонах не проявляют статистически значимого влияния ($p = 1,000$). С физической точки зрения это объясняется тем, что акустическая кавитация и микропотоки, генерируемые ультразвуком высокой интенсивности ($1,0 \text{ Вт/см}^2$), обеспечивают массовое гетерогенное зарождение кристаллов карбоната кальция непосредственно в объёме жидкости, предотвращая их рост на нагревательных поверхностях. Этот механизм согласуется с современными представлениями, изложенными в

работах Zaidi и Fery (2023) и Wang и Zhang (2022), которые также подчёркивают доминирующую роль кавитационных эффектов по сравнению с магнитными полями. Отсутствие значимого вклада магнитной составляющей, в свою очередь, не противоречит данным Lu Lin и соавторов (2020), указывающим, что эффективность магнитной обработки сильно зависит от химического состава воды и может быть невоспроизводимой в широком диапазоне условий.

Особого внимания заслуживает опровержение ранее выдвигавшейся гипотезы об отрицательном влиянии длины рабочей зоны (X_4). В исходных публикациях предполагалось, что увеличение протяжённости аппарата свыше 0,3 м ведёт к затуханию волнового фронта и снижению эффективности. Однако настоящий анализ, выполненный на первичных экспериментальных данных, показал, что разность условных вероятностей ΔP для длины зоны равна нулю, а критерий Фишера даёт $p = 1,000$. Таким образом, в исследованном интервале (0,3–0,9 м) фактор длины полностью индифферентен. Этот вывод имеет прямое инженерное значение: проектирование компактных аппаратов с длиной зоны 0,3 м позволяет снизить металлоёмкость и гидравлическое сопротивление без потери противонакипного эффекта, что особенно актуально для мобильных и стационарных установок в сельском хозяйстве, где ограничения по габаритам и массе часто являются критическими.

С практической точки зрения, установленная доминирующая роль ультразвука позволяет сформулировать чёткие рекомендации для конструкторов и эксплуатационников: приоритетной настройкой акустико-магнитного аппарата должен быть вывод ультразвуковых излучателей на интенсивность 1,0 Вт/см²; снижение этого параметра до 0,1 Вт/см² полностью обнуляет эффективность. Это даёт возможность стандартизировать режимы обработки для широкого круга вод различной жёсткости (в работе использовалась вода с общей жёсткостью 5,2 мг-экв/л,

что характерно для многих регионов России). При этом магнитное поле, тепловая нагрузка и гидродинамика могут варьироваться в достаточно широких пределах без ущерба для результата, что упрощает интеграцию устройств в существующие технологические линии.

Сравнение с известными аналогами показывает, что предлагаемый подход выгодно отличается от химических методов водоподготовки отсутствием реагентов и сточных вод, что соответствует требованиям экологической безопасности, закреплённым в паспорте специальности 4.3.1. В отличие от электромагнитных устройств, эффективность которых сильно зависит от частоты и формы импульсов и часто невоспроизводима, акустический метод при достижении порога кавитации даёт стабильный результат, что подтверждается полным разделением классов в нашем эксперименте. Это делает его предпочтительным для внедрения в сельскохозяйственных предприятиях, где персонал не всегда имеет высокую квалификацию для тонкой настройки сложных электронных систем.

Таким образом, исследование органично вписывается в проблематику специальности 4.3.1, решая актуальную задачу повышения надёжности и энергоэффективности теплообменного оборудования АПК на основе научно обоснованных режимов безреагентной водоподготовки. Предложенные рекомендации по сокращению длины рабочей зоны и фиксации интенсивности ультразвука на верхнем уровне являются прямым вкладом в развитие конструктивных решений для сельскохозяйственной теплоэнергетики.

Ограничения исследования

Для обеспечения научной добросовестности необходимо четко зафиксировать следующие методологические и экспериментальные ограничения полученных результатов:

1. **Малый объем выборки** ($N = 16$): ограниченное число наблюдений снижает статистическую мощность критериев для обнаружения слабых и умеренных эффектов факторов $X_1 \dots X_6$.

2. **Структура экспериментального плана**: отсутствие полных комбинаций факторов (анализировалась планово-однофакторная схема вместо матрицы 2^7) не позволяет статистически оценить двухфакторные и многофакторные взаимодействия.

3. **Дисбаланс классов**: преобладание успешных исходов (75,0% класса 1) ограничивает вариабельность отклика.

4. **Сепарация данных**: полная сепарация по фактору X_7 делает невозможным построение классических логистических регрессионных моделей методом максимального правдоподобия.

5. **Лабораторные условия**: результаты получены на циркуляционном стенде для конкретного солевого состава воды реки Кама (5,2 мг-экв/л жесткости) и не могут автоматически экстраполироваться на высокоминерализованные пластовые или технологические воды без проведения дополнительных испытаний.

Пути преодоления ограничений исследования

Авторы осознают, что малый объем выборки и дисбаланс классов являются серьезными ограничениями. Для их преодоления в дальнейших исследованиях планируется:

- Проведение полнофакторного эксперимента 2^7 или дробного плана высокого разрешения (например, 2^{7-3}), что позволит не только увеличить объем данных, но и оценить двух- и трехфакторные взаимодействия.
- Целенаправленное проведение дополнительных опытов в областях с низкой эффективностью для балансировки классов.

- Использование байесовских методов статистического анализа, которые менее чувствительны к малым выборкам и позволяют формализовать априорные знания о физических процессах.

Инженерные рекомендации для агропромышленного комплекса

На основе проведенного анализа сформулированы следующие технологические регламенты, адаптированные для задач АПК:

1. Приоритет акустической активации. Для теплообменного оборудования (пастеризаторы в молочной промышленности, испарители в производстве соков, системы охлаждения в животноводстве) ключевым условием является вывод ультразвуковых излучателей на интенсивность $1,0 \text{ Вт/см}^2$. Это обеспечивает гарантированное снижение накипеобразования без применения реагентов.

2. Оптимизация металлоемкости. Проектирование компактных акустико-магнитных блоков с длиной зоны $0,3 \text{ м}$ снижает гидравлическое сопротивление и металлоемкость оборудования, что особенно актуально для мобильных сельхозустановок. Экономический эффект достигается за счет снижения эксплуатационных затрат (отсутствие реагентов) и увеличения межремонтного периода оборудования.

3. Стабильность процесса. Остальные параметры (скорость, температура, жесткость в исследованных диапазонах) не являются критическими, что упрощает интеграцию устройств в существующие технологические линии и делает технологию устойчивой к колебаниям качества исходной воды.

Заключение

По итогам проведенного исследования могут быть сформулированы следующие основные выводы:

1. Выполнен полный аудит первичного экспериментального массива данных ($N = 16$), установлена его планово-однофакторная структура и существенный дисбаланс классов (75% класса высокой эффективности). Это позволило корректно определить границы

применимости статистических методов и избежать ложных интерпретаций, имевших место в ранних публикациях.

2. С применением точного критерия Фишера и последующей коррекции Холма на множественные сравнения строго доказано, что единственным статистически значимым управляемым фактором, определяющим противонакипную эффективность акустико-магнитной обработки, является интенсивность ультразвуковых колебаний ($p = 0,00055$, скорректированный $p = 0,00385$, коэффициент Крамера $V = 1,000$). При интенсивности $1,0 \text{ Вт/см}^2$ вероятность достижения высокой эффективности составляет 100%, тогда как при $0,1 \text{ Вт/см}^2$ она равна 0%.
3. Впервые на основе объективных первичных данных опровергнута гипотеза об отрицательном влиянии длины рабочей зоны аппарата. Показано, что в диапазоне от 0,3 до 0,9 м изменение длины не оказывает влияния на результат ($p = 1,000$, $\Delta P = 0,000$). Это позволяет рекомендовать проектирование компактных устройств с длиной зоны 0,3 м, что снижает металлоёмкость и гидравлическое сопротивление оборудования без потери эффективности.
4. Установлено отсутствие статистически значимого эффекта для шести остальных факторов (произведение напряжённости магнитного поля на её градиент, теплонапряжение поверхности нагрева, скорость потока, исходная жёсткость воды и температура) в исследованных диапазонах ($p = 1,000$). Это указывает на то, что в рамках рассмотренных уровней эти параметры не являются лимитирующими, что даёт конструкторам свободу в их выборе при адаптации аппаратов к конкретным условиям АПК.
5. Подтверждена полная согласованность результатов автоматизированного системно-когнитивного анализа (АСК-анализ) и классических статистических процедур, что свидетельствует об

объективности когнитивных моделей при условии использования верифицированных экспериментальных данных. Продемонстрированная методика может быть рекомендована для решения широкого круга агроинженерных задач, связанных с анализом малых выборок и нелинейных зависимостей.

6. Определены границы применимости полученных моделей: малый объём выборки, дисбаланс классов и полная сепарация данных по ключевому фактору не позволяют строить регрессионные модели и оценивать взаимодействия. Для преодоления этих ограничений необходимо проведение полнофакторных экспериментов 2^7 или дробных планов с бóльшим числом наблюдений, а также испытания на воде различного солевого состава.
7. Сформулированы практические рекомендации для инженерно-технических служб агропромышленных предприятий: приоритетной настройкой аппаратов является интенсивность ультразвука $1,0 \text{ Вт/см}^2$; длина зоны может быть ограничена 0,3 м; остальные параметры выбираются исходя из технологических требований конкретной установки. Это позволит повысить надёжность теплообменного оборудования, снизить энергозатраты и эксплуатационные расходы, а также уменьшить экологическую нагрузку за счёт отказа от химических реагентов.

В целом, исследование вносит вклад в научно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса, предоставляя обоснованные инженерные решения для энергосберегающей и экологически безопасной водоподготовки, что полностью соответствует задачам специальности 4.3.1.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Исследование выполнено без спонсорской поддержки.

Литература

1. Коржаков В. Е., Коржаков А. В. Реализация метода оптимизации процесса Предварительной акусто-магнитной обработки технической воды теплоагрегатов // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2005. № 1. С. 12–19. EDN: JXTAAN.
2. Lu Lin, Zhang C., Zhao L., Wang Y. Mechanisms and standardization of electromagnetic water treatment for scale prevention: A critical review // Water Research. 2020. Vol. 185. Art. 116258. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116258.
3. Alimi F. Impact of initial water hydrochemistry on physical scale prevention efficiency: A meta-analysis // Desalination. 2024. Vol. 571. Art. 117088. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117088.
4. Boluda-Botella N., Gómez-Siurana A., Soriano-Mendoza I. Kinetics of calcium carbonate bulk nucleation under electromagnetic fields // Journal of Crystal Growth. 2024. Vol. 628. Art. 127530. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2023.127530.
5. Соколов И. Ю., Дарманиян А. П. Оценка противонакипного эффекта импульсного электромагнитного поля на проточной артезианской воде // Энергосбережение и водоподготовка. 2025. № 2. С. 34–41.
6. Авторское свидетельство № 1724594 А1 СССР, МПК C02F 1/48, C02F 1/36. Устройство для безреагентной обработки жидкости / В. Е. Коржаков, Н. П. Кириллов, А. В. Коржаков. Заявл. 14.07.1989; опубл. 07.04.1992.
7. Луценко Е. В., Коржаков В. Е. Некоторые проблемы классического кластерного анализа // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2011. № 2. С. 91–102. EDN: OQPBLH.
8. Луценко Е. В., Коржаков В. Е. Метод когнитивной кластеризации или кластеризация на основе знаний // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 71. С. 27–74. EDN: OIGYBV.
9. Луценко Е. В., Коржаков В. Е. Автоматизированный системно-когнитивный анализ: современная теория, технология и инструментарий управления знаниями // Региональный сектор экономики знаний: проблемы теории и практики. Краснодар: Кубанский ГУ, 2013. С. 14–18. EDN: RWHRKV.
10. Kobe S., Dražić G., Cefalas A. C. Nucleation and crystallization of calcium carbonate in static magnetic fields // Crystal Growth & Design. 2021. Vol. 21, No. 4. Pp. 2150–2159. DOI: 10.1021/acs.cgd.0c01550.
11. Zaidi S. H., Fery A. Acoustic cavitation and heterogeneous crystallization in aqueous solutions // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 94. Art. 106320. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106320.
12. Wang Y., Zhang B. Synergistic effects of magnetic and ultrasonic fields on scale inhibition in industrial cooling water // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2022. Vol. 61, No. 12. Pp. 4410–4420. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c00120.

References

1. Korzhakov V. E., Korzhakov A. V. Realizacija metoda optimizacii processa Predvaritel'noj akusto-magnitnoj obrabotki tehnicheckoj vody teploagregatov // Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija 4: Estestvenno-matematicheskie i tehnicheckie nauki. 2005. № 1. S. 12–19. EDN: JXTAAN.
2. Lu Lin, Zhang C., Zha o L., Wang Y. Mechanisms and standardization of electromagnetic water treatment for scale prevention: A critical review // Water Research. 2020. Vol. 185. Art. 116258. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116258.
3. Alimi F. Impact of initial water hydrochemistry on physical scale prevention efficiency: A meta-analysis // Desalination. 2024. Vol. 571. Art. 117088. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117088.
4. Boluda-Botella N., Gómez-Siurana A., Soriano-Mendoza I. Kinetics of calcium carbonate bulk nucleation under electromagnetic fields // Journal of Crystal Growth. 2024. Vol. 628. Art. 127530. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2023.127530.
5. Sokolov I. Ju., Darmanjan A. P. Ocenka protivonakipnogo jeffekta impul'snogo jelektromagnitnogo polja na protochnoj artezianskoj vode // Jenergosberezhenie i vodopodgotovka. 2025. № 2. S. 34–41.
6. Avtorskoe svidetel'stvo № 1724594 A1 SSSR, MPK C02F 1/48, C02F 1/36. Ustrojstvo dlja bezreagentnoj obrabotki zhidkosti / V. E. Korzhakov, N. P. Kirillov, A. V. Korzhakov. Zajavl. 14.07.1989; opubl. 07.04.1992.
7. Lucenko E. V., Korzhakov V. E. Nekotorye problemy klassičeskogo klaster'nogo analiza // Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija 4: Estestvenno-matematicheskie i tehnicheckie nauki. 2011. № 2. S. 91–102. EDN: OQPBLH.
8. Lucenko E. V., Korzhakov V. E. Metod kognitivnoj klasterizacii ili klasterizacija na osnove znaniy // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. № 71. S. 27–74. EDN: OIGYBB.
9. Lucenko E. V., Korzhakov V. E. Avtomatizirovannyj sistemno-kognitivnyj analiz: sovremennaja teorija, tehnologija i instrumentarij upravlenija znanijami // Regional'nyj sektor jekonomiki znaniy: problemy teorii i praktiki. Krasnodar: Kubanskij GU, 2013. S. 14–18. EDN: RWHRKV.
10. Kobe S., Dražić G., Cefalas A. C. Nucleation and crystallization of calcium carbonate in static magnetic fields // Crystal Growth & Design. 2021. Vol. 21, No. 4. Pp. 2150–2159. DOI: 10.1021/acs.cgd.0c01550.
11. Zaidi S. H., Fery A. Acoustic cavitation and heterogeneous crystallization in aqueous solutions // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 94. Art. 106320. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106320.
12. Wang Y., Zhang B. Synergistic effects of magnetic and ultrasonic fields on scale inhibition in industrial cooling water // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2022. Vol. 61, No. 12. Pp. 4410–4420. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c00120.

Приложение А. Полная матрица первичных экспериментальных данных

В таблице А1 приведена полная матрица первичных числовых данных из исходного файла протоколов ($N = 16$).

Первичный экспериментальный массив наблюдений (N = 16)

ID	Class/Code	H/Grad	Q/Heat	V/Flow	L/Len	Hardness	Temp	US/Int
1	1	7,35	25	1,5	0,3	5,5	50	1,0
2	1	7,35	25	1,5	0,9	5,5	50	1,0
3	0	7,35	25	1,5	0,3	5,5	50	0,1
4	0	7,35	25	1,5	0,9	5,5	50	0,1
5	1	7,35	25	0,5	0,3	5,5	50	1,0
6	1	7,35	25	0,5	0,9	5,5	50	1,0
7	1	7,35	5	1,5	0,3	5,5	50	1,0
8	1	7,35	5	1,5	0,9	5,5	50	1,0
9	1	7,25	25	1,5	0,3	5,5	50	1,0
10	1	7,25	25	1,5	0,9	5,5	50	1,0
11	1	7,35	25	1,5	0,3	0,5	50	1,0
12	1	7,35	25	1,5	0,9	0,5	50	1,0
13	1	7,35	25	1,5	0,3	5,5	10	1,0
14	1	7,35	25	1,5	0,9	5,5	10	1,0
15	0	7,35	25	1,5	0,3	5,5	50	0,1
16	0	7,25	5	0,5	0,9	0,5	10	0,1