УДК 534.2:532
ББК 22.361.2
К 66
А.В. Коржаков

Идентификация и синтез системы акусто-магнитной обработки жидкости

(Рецензирована)

Аннотация:

В статье рассматриваются вопросы идентификации и синтеза системы акусто-магнитной обработки жидкости.

Ключевые слова:

Критерий оптимальности, модель системы, акусто-магнитный аппарат, матрица планирования, ПРЕСС-процедура.

В последнее десятилетие появилась возможность провести исследования кратковременного воздействия относительно слабых акустических и магнитных полей на различные жидкие среды. Необычные в научном плане, эти исследования привели к практическому применению, значение которых трудно переоценить. Дешевая и просто осуществимая, акустическая и магнитная обработка, может принести большую пользу в хозяйственной деятельности человека. Подвергая акусто-магнитной обработке различные системы, можно достигнуть значительного повышения эффективности различных производств, улучшить качество выпускаемой продукции и уменьшить загрязнение окружающей среды.

Упорядочить исходную информацию в исследуемых областях позволит системный подход при анализе литературных источников: понизить уровень сложности, осуществить решение задач проектирования и управления исследуемыми системами.

При анализе были рассмотрены литературные источники как методологические, расчетно-методические, так и отражающие применение принципов и методов обработки жидких сред к решению сугубо практических задач.

Такой широкий спектр литературы был выбран потому, что исследования в этих областях проводятся различными организациями и частными лицами. Мы хотели выяснить возможность применения существующих разработок для обеспечения функционирования модели акустической и магнитной обработки жидких сред.

Исходя из этого, основные цели анализа литературных источников по магнитной и акустической обработке были сформулированы следующим образом:

- определить назначение и методические принципы;
- выявить структурно-функциональные характеристики и направленность использования;
- выявить и оценить имеющиеся сведения по технологии магнитной и акустической обработке.

На основе опыта и анализа функционирования объектов различного уровня и назначения были сформулированы общие структурно-содержательные признаки сравнения объектов, в данном случае литературных источников по рассматриваемым областям. Были приняты следующие признаки:

- цель (назначение) обработки жидкости;
- ее структурно-функциональная характеристика;
- методы проведения;
- этапы проведения, направления использования (или эксплуатационные характеристики);
- ожидание от внедрения (использования) и эффективность.

Как показал проведенный анализ, отсутствует единая точка зрения на существо акустической и магнитной обработки и ее место в научной методологии.

Результаты комплексного анализа литературных источников показал, что в литературе в основном содержатся сведения о расчете магнитных и электрических параметров устройств для магнитной и акустической водоподготовки, либо приведены результаты производственных испытаний. Теоретические, экспериментальные обоснования и методы расчета магнитных устройств в зависимости от качества жидкости даже не ставятся.

Анализируя имеющеюся информацию содержащуюся в литературных источниках, можно прийти к выводу о следующих основных направлениях в исследованиях проводившихся в данной области:

- магнитная обработка водных систем;
- акустическая обработка водных систем;
- магнитная обработка углеводородного топлива.

Рассмотрим направление – магнитная обработка углеводородного топлива. Для начала определимся с областью применения.

При магнитной обработке водных эмульсий в ряде случаев происходит их обезвоживание. Это, по-видимому, обусловлено составом эмульсий и режимом магнитной обработки. Ш.Н. Алиев, Д.М. Агаларов, А.М. Садыхов и В.Т. Аникина подвергали магнитной обработке водно-нефтяную эмульсию.

В нефтедобыче всегда остро стояла проблема разделения высокостойких водонефтяных эмульсий в связи с недостаточно эффективным воздействием деэмульгаторов. Для повышения эффективности деэмульгатора, в особенности на высоковязкие и высокопрочные водонефтяные эмульсии, применяются различные методы, среди которых особо выделяется обработка эмульсии магнитным полем.

Принимая во внимание высказывания различных авторов можно сформулировать следующие проблемы:

- для проведения исследований необходимо использовать приборы высокой точности;
- возникает необходимость в проведении большого числа опытов;
- отсутствие на данный момент объяснения эффектам;
- наличие множества не вскрытых факторов влияющих на систему;
- плохая воспроизводимость эффектов;
- нет надежных и оперативных методов контроля и оценки эффективности процесса;
- конструкции применяемых приборов не поддаются строгому расчету.

Проведем классификацию проблем. Выделим проблемы, относящиеся к области проведения эксперимента и обработки результатов измерений. К их числу относятся: применение приборов высокой точности, большое количество опытов, плохая воспроизводимость опытов.

Важной частью анализа проблемной ситуации является определение степени разрешимости проблемы. В данном случае необходимо хотя бы приблизительно оценить возможность разрешения проблемы, поскольку не имеет смысла заниматься поиском решений для неразрешимых в данный момент времени проблем. Учитывая сказанное можно оценить критически предложенные проблемы и выделить из них неразрешимые на данный момент времени. К ним относятся следующие проблемы: отсутствие на данный момент объяснения эффектам, отсутствие надежных методов контроля, наличие множества не вскрытых факторов влияющих на систему, конструкции применяемых приборов не поддаются строгому расчету.

Оставшиеся проблемы можно отнести к классу общих проблем. К общему классу проблем можно отнести такие проблемы, как: разделения высокостойких водонефтяных эмульсий в связи с недостаточно эффективным воздействием деэмульгаторов, депарафинизации мазутопроводов, активации жидких и газообразных углеводородов.

При анализе взаимосвязей проблем общих и проблем относящихся к области проведения эксперимента четко и глубоко прослеживается причинно-следственная зависимость. Решая проблемы исследовательские, можно говорить о решении проблем общих. При этом следует заметить, что проблемы не новы и имеют аналоги, причины их возникновения известны, ряд проблем тесно между собой взаимосвязаны, информационное описание проблем не вызывает трудностей и методы их решения известны. Решение проблем исследовательского характера возможно, если применить математические методы планирования эксперимента, представляя систему в виде эконометрической модели.

Введем ограничения на рассмотрения области применения магнитной обработки углеводородного топлива, выберем следующую область применения: автотранспорт. Данные ограничения поставлены исходя из возможностей исследователя и материальной базы.

Таким образом, рассмотрение проблемных ситуаций возникших в основных направлениях исследования, приводит к мысли, что объединяющим моментом в проведенной классификации являются проблемы, относящиеся к области проведения эксперимента и обработки результатов измерений, а так же построение аппаратного комплекса. Проблемная ситуация вырисовывается следующим образом: необходимость проведения большого количества опытов для увеличения их воспроизводимости и получения достоверных результатов измерения, а так же построение нового аппаратного комплекса.

Приступим к формированию системы под данную проблемную ситуацию. Следующим шагом в построении системы будет определение целей системы. Сначала необходимо сформулировать цели, достижение которых решает проблемную ситуацию. Поскольку проблемная ситуация разрешается за счет потребления средой конечных продуктов системы, то цели практически представляют собой информационный образ конечных продуктов системы. Основная трудность в формировании цели заключается в том, что цели являются антиподом проблем. Формируя проблему, говорится о том, что не нравится. Говоря о целях, надо сформулировать, что хотим. Для конкретизации цели необходимо задать критерий достижения целей и ограничения, в которых будет происходить поиск возможных вариантов решения. Критерий достижения цели отождествляем с показателем эффективности системы и выражаем его в количественной форме – как критерий оптимизации параметров процесса. Наряду с выбранным критерием большое значение имеет система ограничений. Требования системности при рассмотрении вопроса требуют учета всех возможных ограничений: количество проведенных опытов не более тридцати в каждой серии; количество серий не менее трех; не допускается использование очень точных приборов; не проводить работу с применением дорогих материалов; не использовать отдельно известные методы обработки жидкости (по причине незначительного проявления эффекта), т.е. применять акустическую и магнитную обработку одновременно.

Определив в качестве проблемы «необходимость проведения большого количества опытов для увеличения их воспроизводимости и получения достоверных результатов измерения» и сформулировав ограничения, можно сформулировать основные целевые установки:

- оптимизировать параметры процесса акусто-магнитной обработки жидкости;

- разработать и проанализировать математическую модель оптимизации на основе методов планирования эксперимента и обработки информации.

Теперь необходимо выбрать способ достижения целей. В нашем случае определить функцию системы, как способ достижения системой поставленных целей, можно сформулировать следующую задачу деятельности: проведение цикла экспериментов по выявлению функционала оптимизации процесса акусто-магнитной обработки жидкости с применением математических методов планирования экспериментов;

Обработка топлива производилась в акусто-магнитном аппарате, на устройство которого имеется авторское свидетельство на изобретение а.с. №1514726.

Исследования по аккусто-магнитной обработке топлива проводились на реальных физических объектах. Проверка измерения расхода топлива проводилась при движении полностью нагруженного автомобиля со скоростью 80 км/ч на участке, равном 3 км сухого ровного горизонтального участка автомобильной дороги с асфальтированным покрытием. Топливо подавалось в карбюратор из специально установленного на автомобиль – мерного бачка.

Построение модели системы акусто-магнитной обработки топлива. В качестве критерия оптимальности при построении модели черного ящика для системы акусто-магнитной обработки жидкого топлива двигателей автомобилей, принимаем такой показатель, как расход топлива на сто километров пути. Этот показатель является выходной переменной $\vec{Y}$.

Входными переменными для этой модели будут следующие управляемые факторы $\vec{X}$:

X_1 – скорость течения топлива V (м/мин);

X_2 – длина рабочего участка аппарата L (мм);

X_3 – частота трехфазного напряжения F (Гц);

X_4 – количество витков провода на одной секции G (витки провода);

X_5 – обороты двигателя U (об/мин).

Проведем факторный и корреляционный анализ, принимая за результирующий признак расход топлива на сто километров пути. Для того чтобы описать процесс акусто-магнитной обработки топлива, необходимо предварительно провести серию опытов на самом техническом объекте (автомобиле), на котором установлен акусто-магнитный аппарат.

На основе проведенных экспериментов построим экспериментальную факторную модель. Для получения адекватной математической модели необходимо обеспечить выполнение определенных условий проведения эксперимента. При проведении активного эксперимента необходимо задать план варьирования факторов. Опыты при выполнении эксперимента проводились в последовательности, предусмотренной матрицей плана.

Линейная математическая модель процесса. Чтобы получить линейную математическую модель процесса, была реализована 1/4 реплики факторного эксперимента 2^5 [2]. Основные уровни и интервалы варьирования факторов выбирались на основании априорной информации о процессе. Введем кодированные переменные.

$$x_1 = \frac{X_1 - 10{,}5}{2{,}5}, \qquad x_4 = \frac{X_4 - 220}{20},$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 30}{25}, \qquad x_5 = \frac{X_5 - 2000}{1150},$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 300}{100}, \qquad y = P.$$

Обозначим в таблицах условно верхний, нижний и основной уровни, соответственно знаками «+», «-» и «0». Матрица планирования и результаты реализации опытов приведены в таблице 1.

Опыты проводились рандомизированно.

Проведем статистическую обработку результатов, полученных в ходе проведения эксперимента. Для того, чтобы определить точечные оценки закона распределения, необходимо исключить грубые погрешности или промахи в результатах измерений.

Используем Критерий Шарлье, число наблюдений в ряду (10<n<20). Тогда, по теореме Бернулли, число результатов, превышающих по абсолютному значению среднее арифметическое значение на величину $K_ш S_x$, будет $n[1-\Phi(K_ш)]$ [5]. Используем критерий Шарлье $K_ш S_x$ =0,39*1,96=0,782, проверим результаты верхней и нижней границы ряда, на выполнение неравенства $|x_i - \bar{x}| > K_ш S_x$. Неравенство не выполняется, следовательно, грубых погрешностей в ряду наблюдений нет.

Таблица 1. Матрица планирования и результаты реализации опытов

Основной уровень	10,0	30	300	220	2000	
интервал варьирования	2,5	25	100	20	1150	
верхний уровень	12,5	55	400	240	3150	
нижний уровень	8,5	5	200	200	850	
кодированные обозначения	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
номер опытов						
1	-	-	-	-	-	5,89
2	+	+	-	-	+	6,90
3	+	-	+	-	+	5,72
4	-	+	+	-	-	6,60
5	+	-	-	+	-	6,74
6	-	+	-	+	+	7,20
7	-	-	+	+	+	5,82
8	+	+	+	+	-	6,30
9	-	+	-	-	-	5,90
10	+	-	-	-	+	6,54
11	+	+	+	-	+	6,71
12	-	-	+	-	-	6,69
13	+	+	-	+	-	5,81
14	-	-	-	+	+	6,20
15	-	+	+	+	+	6,77
16	+	-	+	+	-	6,70

Приступим к определению закона распределения результатов измерения.

Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону распределения, можно по специальному критерию χ^2 – Пирсона. Критерием Пирсона является случайная величина, распределённая по закону χ^2 («хи-квадрат»):

$$\chi_{теор}{}^2 = \sum \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i'} = 9{,}2 .$$

Вычислим наблюдаемое значение критерия Пирсона.

$$\chi^2_{набл} = \sum(n_i^2 / n_i') - n = 6{,}3 .$$

Так как $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$, то принимаем гипотезу о нормальном законе распределения генеральной совокупности. Расхождение между эмпирическими частотами и теоретическими частотами незначимо. Проверка по критерию Пирсона показывает, что распределение величин подчиняется нормальному закону Гаусса [5].

Таким образом,

$\hat{\beta}_0 = 6{,}3814$, $\quad\hat{\beta}_4 = 0{,}0611$,

$\hat{\beta}_1 = 0{,}0036$, $\quad\hat{\beta}_5 = 0{,}0242$,

$\hat{\beta}_2 = 0{,}1424$, $\quad\hat{\beta}_3 = 0{,}0324$.

Поскольку полученные значения коэффициентов регрессии $\hat{\beta}_j$, $j = \overline{0, N_B - 1}$ – случайные числа из-за случайной помехи в процессе эксперимента, то они являются оценками истинных значений коэффициентов регрессии β_j .

Таким образом, в рассматриваемой области процесс обработки топлива может быть аппроксимирован уравнением:

$$\begin{aligned} y &= 6{,}3814 + 0{,}0036x_1 + 0{,}1424x_2 + \\ &+ 0{,}0324x_3 + 0{,}0611x_4 + 0{,}0242x_5. \end{aligned} \qquad (1)$$

Прежде чем приступить к поиску экстремума функции отклика проведем проверку адекватности модели. Так как, планирование ненасыщенное, то, проведя повторные наблюдения в точках плана, можем приступить к рассмотрению гипотезы H_o, состоящей в том, что модель (1) адекватна.

Для дополнения плана было выполнено шесть параллельных опытов в точке с координатами, соответствующими основному уровню факторов. Результаты опытов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Шесть параллельных опытов

№	y_{iu}	$y_{iu} - \bar{y}_i$	$(y_{iu} - \bar{y}_i)^2$
1	6,68	0,54	0,2900
2	6,22	0,08	0,0064
3	6,30	0,16	0,0256
4	6,15	0,01	0,0001
5	5,82	-0,32	0,1024
6	5,72	-0,42	0,1764

Для матрицы плана (таблица 1), пополненной таблицей 2, имеем:

$$n_0 - 1 = 5;\ n - p = 9;\ n = 16;\ N = 22 .$$

В результате вычислений были получены следующие данные:

$$\hat{\beta}_0^0 = 6{,}365;\ \hat{\beta}_1^0 = 0{,}001;\ \hat{\beta}_2 = 0{,}139;$$

$$\hat{\beta}_3^0 = 0{,}029;\ \hat{\beta}_4^0 = 0{,}058;\ \hat{\beta}_5^0 = 0{,}792 .$$

Проверим гипотезу об адекватности модели при наличии повторных наблюдений в центре плана

$$F_{расч} = \frac{s_r^2}{s_e^2} = 160{,}25 > F_{табл} = 10{,}15 .$$

Так как расчетное значение больше табличного, то гипотеза отклоняется. Ее отклонение указывает на возможность нахождения исследователя вблизи области экстремума, так как при этом возрастают эффекты взаимодействия более высоких порядков. На основе априорных сведений исследователь полагает, что область экстремума функции отклика им не достигнута, и причиной неадекватности модели может быть неточность аппроксимации функции отклика в окрестности центра плана. В этой ситуации принимается решение продолжения крутого восхождения без проведения дополнительных наблюдений относительно центра плана.

Нахождение «почти стационарной» области. Для определения условий получения максимального значения, было использовано «крутое восхождение» по условному градиенту [2]. Обработка топлива производилась в акусто-магнитном аппарате с длиной зоны взаимодействия физических полей $X_2 = l_{akt}$ =30 мм.

Необходимо найти оценку градиента функции отклика в центре плана или в точке $(x_1^0,\ x_2^0,\ x_3^0,\ x_4^0,\ x_5^0)$, где $x_i^0 = 0$ $(i = 1,2,\ldots,5)$. Оценка градиента имеет вид

$$\begin{aligned} &\hat{g}radf_1\ (x_1^0,\ x_2^0,\ x_3^0,\ x_4^0,\ x_5^0) = \\ &= (\hat{\beta}_1,\ \hat{\beta}_2,\ \hat{\beta}_3,\ \hat{\beta}_4,\ \hat{\beta}_5), \end{aligned}$$

где $\hat{\beta}_i$ – оценка, полученная методом наименьших квадратов β_i. Поскольку планирование ортогональное, то окончательно

$$\hat{g}radf_1\ (x_1^0,\ x_2^0,\ x_3^0,\ x_4^0,\ x_5^0)=$$
$$= (0{,}0036;0{,}1424;0{,}0324;0{,}0611;0{,}0242)\ .$$

Для достижения максимального эффекта значения всех факторов должны находиться на верхнем уровне. Таким образом, движение к экстремуму предположительно осуществляется в направлении всех пяти факторов $x_1, x_2\ x_3, x_4, x_5$. Для подтверждения или опровержения данного выбора, проведем исследование важных точек в пространстве предикторов, используя ПРЕСС-процедуру.

«Наилучшей моделью» следует признать модель, включающую предикторы X_2, X_3, X_4. Этой модели соответствует одно из самых малых значений суммы квадратов предсказываемых расхождений, равное 3,328. Суммы, полученные для моделей, содержащих два предиктора X_2, X_3 и четыре предиктора X_2, X_3, X_4, X_5, незначительно отличаются от модели, содержащей три предиктора X_2, X_3, X_4. Теперь получим дополнительную информацию, исследуя слагаемые, входящие в сумму для модели с предикторами X_2, X_3, X_4, X_5. Эти результаты приведены в таблице 3. Из таблицы видно, что все модели, содержащие предикторы X_2, X_3, X_4, X_5 хорошо предсказываются. Для данного набора данных они все должны быть сохранены, поскольку содержат информацию о согласии модели с экспериментальными данными. Из таблицы 3 видно, что наблюдение №6 хуже всего предсказывается по модели, содержащей предикторы X_2, X_3, X_4, X_5 и построенной по остальным точкам.

Таблица 3. Наблюдения предсказываемые по модели

Индекс i отбрасываемого наблюдения, результат которого предсказывается	$(Y_i - Y_{ip})^2$	Индекс i отбрасываемого наблюдения, результат которого предсказывается	$(Y_i - Y_{ip})^2$
1	0,1604	9	0,1610
2	0,2319	10	0,0187
3	0,4339	11	0,0351
4	0,1000	12	0,2441
5	0,0360	13	0,4238
6	0,7187	14	0,0081
7	0,4392	15	0,2055
8	0,1416	16	0,0054

Наблюдения №№ 7, 3, 13 также плохо предсказываются. При одном наборе данных это может свидетельствовать о наличии выбросов. В других случаях это может служить указанием на то, что подобные точки чрезвычайно информативны. Для получения дополнительной информации, исследуем слагаемые, входящие в сумму для модели с предикторами X_2, X_3, X_4. Результаты исследования приведены в таблице 4.

Таблица 4. Предсказываемые модели

Индекс i отбрасываемого наблюдения, результат которого предсказывается	$(Y_i - Y_{ip})^2$	Индекс i отбрасываемого наблюдения, результат которого предсказывается	$(Y_i - Y_{ip})^2$
1	0,2209	9	0,1287
2	0,2258	10	0,0123
3	0,5516	11	0,0314
4	0,0716	12	0,1397
5	0,0683	13	0,4692
6	0,6944	14	0,0038
7	0,3383	15	0,2219
8	0,1284	16	0,0218

Из таблицы 4 видно, что наблюдение №6 хуже всего предсказывается по модели, содержащей предикторы X_2, X_3, X_4 и построенной по остальным точкам. Наблюдения №№7,13 также плохо предсказываются. При одном наборе данных это может свидетельствовать о наличии выбросов. В других случаях это может служить указанием на то, что подобные точки чрезвычайно информативны.

Сопоставляя шестое наблюдение с откликом 7,20 в точке (55;200;240) с тринадцатым наблюдением, где отклик равен 5,81 при значениях (55;200;240), можно предположить, что результат шестого опыта несколько завышен или существует влияние других факторов в этой точке. Сопоставление наблюдений при отбрасывании шестого наблюдения по моделям, содержащим предикторы X_2, X_3, X_4, X_5 и X_2, X_3, X_4 можно предположить, что данная точка может находиться в близи точки экстремума. Таким образом, модель, содержащая предикторы X_2, X_3, X_4, наилучшим образом подходит для дальнейших исследований. Сопоставляя предикторы, находящиеся в этих моделях, можно сделать вывод, что модель, содержащая предикторы X_2, X_3, X_4 подходит для проведения новой серии опытов для процедуры крутого восхождения. Поэтому, принимаем решение, использовать для дальнейших исследований модель, содержащую предикторы X_2, X_3, X_4. Матрица планирования и результатов крутого восхождения приведена в таблице 5.

Таблица 5. Матрица планирования и результатов крутого восхождения

Факторы	X_l^2	X_l^3	X_l^4	Y
β_i	0,1424	0,032	0,061	
Шаг	20	90	15	
1	2,848	2,88	0,915	8,90
2	5,696	5,76	1,83	7,48
3	8,544	8,64	2,745	8,20

Поскольку в опыте №3 значение параметра оптимизации увеличивается, можно предположить, что точка с коэффициентом опыта №2 находится в «почти стационарной области». Предварительное обследование при помощи ПРЕСС-процедуры указывало на данную точку. Следовательно, можно переходить к построению модели более высокого порядка.

Математическая модель второго порядка. Следующим этапом являлось получение модели второго порядка для «почти стационарной» области и исследование её. Построить модель второго порядка можно, используя данные, полученные при проведении ПРЕСС-процедуры.

Построим модель, включающую предикторы X_2, X_3, X_4, используя центральное композиционное ортогональное планирование второго порядка. Матрица планирования и результаты эксперимента по этому плану приведены в таблице 6.

Таблица 6.

№	x'_0	x'_1	x'_2	x'_3	$x'_1x'_2$	$x'_1x'_3$	$x'_2x'_3$	$x'_1x'_2x'_3$	x'_4	x'_5	x'_6	y'
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	6,3
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	5,9
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	6,2
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	5,98
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	7,10
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	7,30
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	6,50
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	6,30
9	+1	-1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	7,80
10	+1	+1,215	0	0	0	0	0	0	0,75	-0,73	-0,73	8,20
11	+1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	6,50
12	+1	0	+1,215	0	0	0	0	0	-0,73	0,75	-0,73	6,20
13	+1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	6,30
14	+1	0	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	0,75	6,10
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	7,48

Вычислим следующие значения коэффициентов уравнения:

$\hat{\beta}_0 = 6{,}677$, $\hat{\beta}'_0 = 7{,}309$,

$\hat{\beta}_1 = -0{,}101$,

$\hat{\beta}_2 = -0{,}115$,

$\hat{\beta}_3 = 0{,}280$,

$\hat{\beta}_{12} = -0{,}028$,

$\hat{\beta}_{13} = 0{,}077$,

$\hat{\beta}_{23} = -0{,}198$,

$\hat{\beta}_4 = 0{,}490$,

$\hat{\beta}_5 = -0{,}627$,

$\hat{\beta}_6 = -0{,}728$.

Таким образом, модель (содержащую предикторы X_2, X_3, X_4) процесса обработки жидкого топлива в «почти стационарной» области можно описать следующим уравнением:

$$y = 7{,}309 - 0{,}101x_1' - 0{,}115x_2' + 0{,}280x_3' - \\ - 0{,}028x_1'x_2' + 0{,}077x_1'x_3' - 0{,}198x_2'x_3' + \\ + 0{,}490x_1'^2 - 0{,}627x_2'^2 - 0{,}728x_3'^2, \quad (2)$$

где $x_1' = x_2 = \dfrac{X_2 - 30}{25}$, $x_2' = x_3 = \dfrac{X_3 - 300}{100}$, $x_3' = x_4 = \dfrac{X_4 - 220}{20}$.

Проверим на адекватность полученное уравнение.

Сформируем остаточную последовательность (ряд остатков), для чего из фактических значений уровней ряда вычтем соответствующие расчетные значения по модели (таблица 7).

Критерием случайности с α=5% уровнем значимости, является выполнение неравенства Р>$\left[\overline{p} - 1{,}96\sqrt{\sigma_p{}^2}\right]$. Это неравенство выполняется, поэтому проверяемая модель считается адекватной ($p = 7 > 3{,}5$).

Проверим соответствие распределения случайной компоненты нормальному закону распределения по RS-критерию[4].

При $\alpha = 0{,}05$ и $n = 15$, нижняя граница равна 2, 67 , а верхняя граница равна 3,685. Рассчитаем значение критерия:

$$R = 0{,}26 - (-0{,}32) = 0{,}58,\ S_{\hat{y}} = 0{,}185.$$

Таблица 7. Проверка модели на адекватность

№	Фактическое y_t	Расчетное $\bar{y}_t$	Отклонение ε_t	Точки пиков	$\varepsilon_t{}^2$	ε_t - ε_{t-1}	$(\varepsilon_t$ - $\varepsilon_{t-1})^2$	$\lvert\varepsilon_t\rvert : y_t$ *100
1	6,30	6,23	0,070	-	0,005	0,000	0,000	1,111
2	5,90	5,93	-0,030	0	0,001	-0,100	0,010	0,508
3	6,20	6,45	-0,250	1	0,063	-0,220	0,048	4,032
4	5,98	6,04	-0,060	0	0,004	0,190	0,036	1,003
5	7,10	7,03	0,070	0	0,005	0,130	0,017	0,986
6	7,30	7,04	0,260	1	0,068	0,190	0,036	3,562
7	6,50	6,46	0,040	0	0,002	-0,220	0,048	0,615
8	6,30	6,36	-0,060	0	0,004	-0,100	0,010	0,952
9	7,80	7,91	-0,110	1	0,012	-0,050	0,002	1,410
10	8,20	8,16	0,040	0	0,002	0,150	0,022	0,488
11	6,50	6,24	0,260	1	0,068	0,220	0,048	4,000
12	6,20	6,52	-0,320	1	0,102	-0,580	0,336	5,161
13	6,3	6,57	-0,270	0	0,073	0,050	0,003	4,286
14	6,10	5,89	0,210	1	0,044	0,48,	0,230	3,443
15	7,48	7,31	0,170	0	0,029	-0,040	0,002	2,273

Следовательно, $RS = 3{,}135$, что характеризует нормальное распределение, т.к. 2,76<3,135<3,685.

Проверка независимости значений уровней случайной компоненты, т.е. проверка отсутствия существенной автокорреляции в остаточной последовательности. Расчетное значение d-критерия Дарбина – Уотсона.

$$d = \frac{\sum_{t=2}^{n}(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^{n}\varepsilon_t{}^2} = 1{,}774.$$

Т.к. $1{,}774 < 2$, то автокорреляция не наблюдается, поэтому сравниваем с $d_1 = 0{,}82, d_2 = 1{,}75$; т.к. $1{,}774 > d_2$, то заключаем, что d не значимо и отбрасываем гипотезу H_0 на уровне α. Остаточная последовательность удовлетворяет всем свойствам случайной компоненты ряда, следовательно, **модель адекватна.**

Для характеристики точности модели применим среднюю относительную ошибку аппроксимации: $\bar{\varepsilon}_{откл}$ = 2,255%.

Полученное значение средней относительной ошибки говорит о достаточно высоком уровне точности построенной модели, ошибка менее 5% свидетельствует об удовлетворительном уровне точности.

Определение оптимальных значений параметров обработки топлива.

Согласно работе [1], приведем уравнение (2) к каноническому виду

$$y-7{,}337=0{,}492(x_1''')^2-\\ -0{,}563(x_2''')^2-0{,}794(x_3''')^2, \quad (3)$$

где

$$\begin{cases} x_1'' = -0{,}999x_1''' + 0{,}015x_2''' - 0{,}033x_3''', \\ x_2'' = -0{,}03x_1''' - 0{,}854x_2''' + 0{,}519x_3''', \\ x_3'' = -0{,}02x_1''' + 0{,}52x_2''' + 0{,}854x_3'''. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_1' = x_1'' + 0{,}083, \\ x_2' = x_2'' - 0{,}127, \\ x_3' = x_3'' + 0{,}214. \end{cases}$$

Получили следующие значения координат особой точки:

$X_2 = 32{,}075$; $X_3 = 312{,}7$; $X_4 = 224{,}28$.

В этой точке $y = 7{,}34$.

Переход от координатных значений факторов к натуральным, производился по следующим формулам:

$$X_2 = 30 + x_1' \cdot 25;$$

$$X_3 = 300 + x_2' \cdot 100;$$

$$X_4 = 220 + x_3' \cdot 20.$$

Координаты оптимального процесса обработки топлива соответствуют координатам особой точки поверхности. Переходя от координатных значений факторов к натуральным, получаем следующие расчетные значения параметров оптимального режима процесса обработки топлива: $L = 32{,}075$ *мм*; $F = 312{,}7$ *Гц*; $G = 224$ *Витка*.

Ожидаемое значение параметра оптимизации в этой точке: $P = 7{,}34$ *литр/км*.

Результаты исследований обработки топлива показали, что расход топлива автомобиля, на котором установлен акусто-магнитный аппарат меньше на 20% по сравнению с расходом топлива автомобиля, на котором акусто-магнитный аппарат не установлен.

Примечания:

1 Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, – 1971. – 280 с.

2 Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. – М.: Радио и связь. – 1983. – 246 с.

3 Ермаков С.М., Математическая теория оптимального эксперимента: Учеб. пособие / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.

4 Венецкий И.Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / И.Г. Венецкий, В.И. Венецкая. – М.: Статистика, 1979. – 447 с., ил. – (Мат. статистика для экономистов).

5 Сергеев А.Г. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие / А.Г. Сергеев, М.В. Латышев, В.В. Терегеря. – М.: Логос, 2003. – 536 с.: ил.