

# МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРИКЛАДНЫХ ПРОЦЕССОВ АКУСТОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖИДКОСТИ

Лойко В.И. – д. т. н., профессор

*Кубанский государственный аграрный университет*

Коржаков А.В. – преподаватель-стажер

Коржакова С.А. – к. э. н., доцент

*Адыгейский государственный университет*

Предложена методика, реализующая принципы системного анализа в конкретных условиях. Ее назначение – формализовать процесс исследования системы, процесс постановки и решения проблемы.

Методика системного анализа разрабатывается для того, чтобы выбрать адекватный метод формализованного представления системы, когда у исследователя нет достаточных сведений о какой-либо подсистеме. Основные этапы системного анализа прикладных процессов акустомагнитной обработки жидкости можно представить в виде структурной схемы (рис. 1).

## **1. Исследование концепции системы акустомагнитной обработки**

На первом этапе анализируется состояние системы акустомагнитной обработки жидкости в реальных условиях, определяются несоответствия условий существования системы, выявляются причинно-следственные связи возникновения проблемных ситуаций, определяется степень актуальности проблемы в научном и практическом смысле.

Большое количество различных связей системы акустомагнитной обработки жидкости с внешней средой представим в виде одной входной и одной выходной связей, выделив их по принципу существенности в заданном отношении. По входным и выходным связям происходит обмен системы со средой путем передачи материальных, энергетических или

информационных элементов.

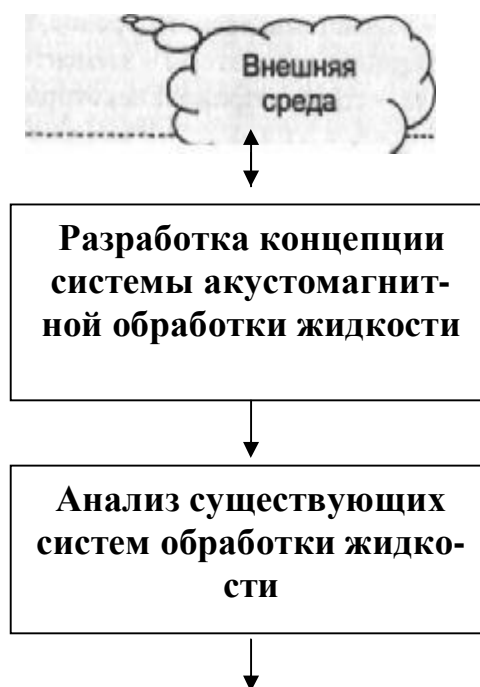
Важной частью анализа проблемной ситуации является определение степени разрешимости проблемы. В данном случае необходимо хотя бы приблизительно оценить возможность решения проблемы.

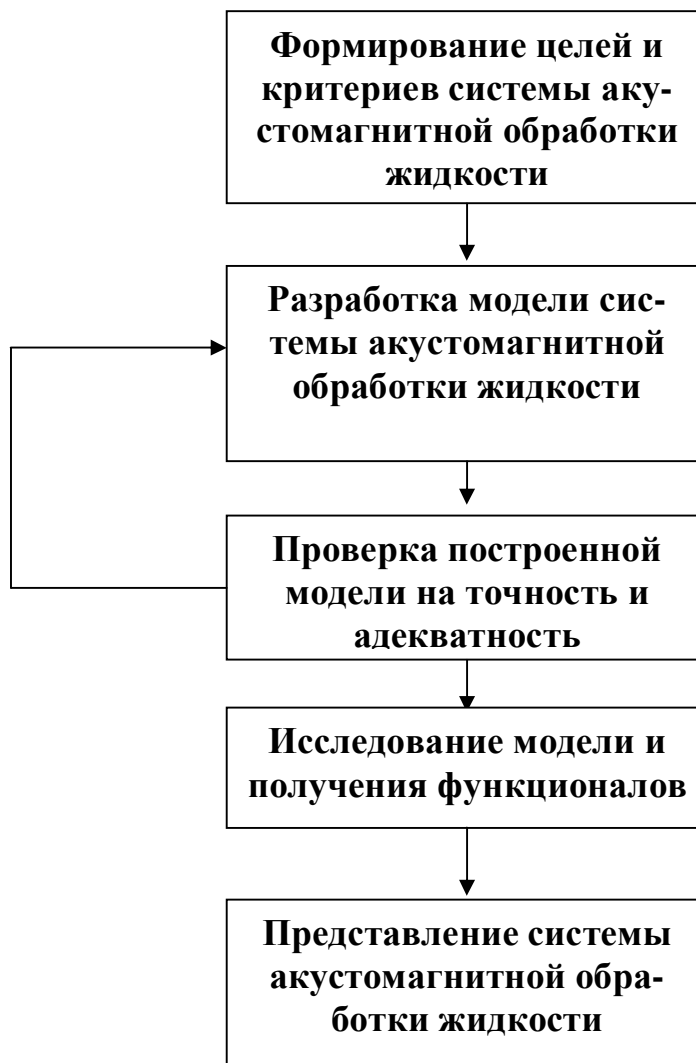
## **2. Анализ существующих систем обработки жидкости**

Упорядочить исходную информацию о существующих системах позволит системный подход при анализе литературных источников.

При анализе систем 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.





**Рисунок 1 – Структурная схема методики системного анализа системы акустомагнитной обработки жидкости**

В.И. Миненко [9] выдвигает гипотезу, также сводящуюся к образованию структурных единиц. Автор представляет роль магнитного поля следующим образом: под влиянием внешнего магнитного поля изменяется плотность электронных облаков ионов с молекулами воды, составляющими непосредственное окружение ионов и изменение поляризации ионами близлежащих объемов воды, т.е. изменение структуры раствора. Эта гипотеза базируется на наблюдениях исследователем изменения физических свойств электролита в магнитном поле, а именно: поверхностного натяжения, вязкости и электросопротивления. Но эти изменения, по мнению

самих же авторов, не могут быть использованы для расчета параметров магнитных аппаратов.

Н.П.Лапотышкина [8] считает, что магнитное поле влияет на степень гидратации ионов накипеобразователей, растворенных в воде. Это обуславливает в конечном итоге образование многочисленных зародышей кристаллов и стабилизирует выделяющуюся при нагревании твердую фазу в дисперсном состоянии.

А.Н. Киргинцев и В.М. Соколов [5] считают, что приобретение водой особых свойств при действии магнитного поля связано с железом, обычно присутствующим в большем или меньшем количестве в природной воде.

А.И. Шахов, С.С. Душкин [16] объясняют роль магнитного поля "коагуляцией органических и минеральных коллоидов за счет дегидратации двойного электрического слоя ионов и снижения дзета-потенциала что в свою очередь нарушает агрегативную устойчивость коллоидов и ускоряет их "слипание".

Таким образом, соображения и гипотезы различных авторов в основном базируются на поляризующем действии магнитного поля на ионы и молекулы воды.

Незначительное изменение отдельных свойств жидкой фазы обуславливает необходимость высокой точности их измерений и устранения возможного влияния побочных факторов (некоторые из них, по видимому, еще не выявлены). Это далеко не всегда удается сделать: обычно приходится проводить большое число опытов и получать статистически достоверные данные [6].

Большой сложностью является строгая идентификация условий магнитной обработки в отдельных опытах.

Для решения актуальных проблем охраны окружающей среды большое значение приобретают вопросы наиболее рационального использования природных ресурсов и снижения количества механических и растворенных загрязнений в промышленных сточных водах [4]. По мнению С.С.

Душкина [4], "известно много методов и способов улучшения и интенсификации физико-химических условий процессов водоподготовки. Наиболее распространенные методы, связанные с использованием рациональных технологически обоснованных схем, модернизацией существующих и разработкой новых конструкций ионообменных аппаратов, внедрение которых в практику водоподготовки не всегда возможно по техническим, экономическим или другим причинам (для приготовления и дозирования химических реагентов требуется специальное оборудование, необходимы дополнительные площади, а иногда и дополнительные обслуживающий персонал и т.д.)".

Е.Ф. Тебенихин определяет ряд причин, которые препятствуют расширению использования магнитного поля в водоподготовке следующим образом [12]: "... не полностью раскрытая физическая сущность явлений и плохая воспроизводимость эффектов свидетельствуют о недостаточном знании основных факторов, влияющих на этот процесс; нет надежных и оперативных методов контроля и оценки эффективности процесса; конструкции применяемых приборов не поддаются строгому расчету".

В.Е. Терновцев, рассматривая проблемы защиты водоемов от загрязнений, предлагает применять оборотные системы водоснабжения. Затруднения в работе оборотных систем вызваны в основном образованием накипи в трубопроводах. Предотвратить образование накипи можно различными методами: реагентными (реагентная схема водообработки) и безреагентными (применение магнитного поля, ионный обмен и др.) [13].

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

Комплексный анализ 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, а теорети-

ческие, экспериментальные обоснования и методы расчета магнитных устройств в зависимости от качества воды даже не приводятся.

Анализируя 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.

Выделим первое из имеющихся направлений – магнитная обработка – и проведем границы выделенной системы. Исходной характеристикой системы является ее противопоставление среде. Между системой и средой существует большое множество взаимных связей, с их помощью происходит взаимодействие системы со средой. Объективно, с точки зрения внешней среды, любая система существует как источник удовлетворения ее потребностей, следовательно, среда представляет собой совокупность различных водных систем. Область применения водных систем обширна: производство бетона, кирпича, керамики, обогащение полезных ископаемых, сельское хозяйство, медицина, теплоэнергетика, автотранспорт.

Введем ограничения на рассмотрение области применения магнитной обработки и выберем следующие области применения: теплоэнергетика, автотранспорт. Данные ограничения поставлены исходя из возможностей исследователя и материальной базы.

Рассмотрим другое направление – акустическую обработку и проведем границы выделенной системы. Среда представляет собой совокупность систем, рассмотренных ранее. Введем ограничения на рассмотрения области применения акустической обработки. Выберем следующие области применения: теплоэнергетика, автотранспорт. Эти области выбраны не случайно, так как основное практическое применение акустических преобразователей – это предотвращение процесса образования накипи.

Несмотря на то, что ультразвуковые аппараты в течение ряда лет на-

ходят практическое применение, механизм ультразвукового воздействия на накипь считать окончательно установленным нельзя [12].

Все ультразвуковые аппараты, предназначенные для предотвращения накипи в котлах, идентичны по принципу действия и состоят из конструктивно обособленных блоков импульсного генератора и преобразователя [12].

Перейдем к рассмотрению магнитной обработки 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 [7].

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 [17].

Магнитные активаторы топлива – гидромультиполи – используются для активации жидких и газообразных углеводородов. Автомобильные магнитные активаторы успешно используются на всех типах транспортных средств, независимо от типа двигателя и топлива (бензин, дизель, сжиженный газ). Гидромультиполи – устройства, уменьшающие потребление топлива и ядовитые выхлопы и увеличивающие мощность машин [15].

### **3. Формирование целей и критериев системы акустомагнитной обработки жидкости**

Приступим к формированию системы, адекватно отражающей проблемную ситуацию. Следующим шагом в построении системы будет определение целей системы.

Принципы системности при рассмотрении вопроса требуют учета всех возможных ограничений: количество проведенных опытов не должно быть большим; используемые приборы могут быть не очень большой точности; не следует проводить работу с применением дорогих материалов; нежелательно использовать отдельно известные методы обработки жидкости (по причине незначительного проявления эффекта), т.е. следует применять акустическую и магнитную обработку одновременно.

Говоря о целях, сформулируем желаемое. Очевидно, что при определении цели надо исходить из общественных интересов системы. При этом формулировка цели будет четкой и компактной.

Определив проблему и оговорив ограничения, можно сформулировать основную целевую установку: идентификация и синтез системы акустомагнитной обработки жидкости на основе разработки математической модели системы с применением методов системного анализа, планирования эксперимента и обработки информации.

Теперь необходимо выбрать способ достижения цели. В нашем случае способом достижения цели является решение следующих задач:

- разработка методики системного анализа системы акустомагнитной обработки жидкости;
- разработка методики проведения эксперимента на реальных объектах с применением методов планирования эксперимента;
- создание системы автоматизации обработки результатов эксперимента, построение математической модели, проверка ее на точность и адекватность;
- на основе обработки эмпирической информации получение модели, связывающей параметры систем акустомагнитной обработки жидкости (воды, углеводородного топлива);
- на основе созданных моделей системы получение функционалов оптимизации параметров систем акустомагнитной обработки водных и углеводородных сред.



Критерием достижения цели является получение минимума накипеобразования на трубах и максимума сгорания топлива в двигателях.

#### **4. Разработка модели системы акустомагнитной обработки жидкости**

##### **4.1. Содержательное описание моделируемого объекта**

Система акустомагнитной обработки описывается с позиций системного подхода. В соответствии с целью исследования устанавливается совокупность элементов, взаимосвязи между элементами, возможные состояния каждого элемента, существенные характеристики состояний и соотношения между ними. Например, фиксируется, что если значение одного параметра возрастает, то значение другого – убывает и т.п. Вопросы, связанные с полнотой и единственностью набора характеристик, не рассматриваются. Естественно, в таком словесном описании возможны логические противоречия, неопределенности. Это исходная естественно-научная концепция исследуемого объекта. Для того чтобы содержательное описание служило хорошей основой для последующей формализации, требуется обстоятельно изучить моделируемый объект.

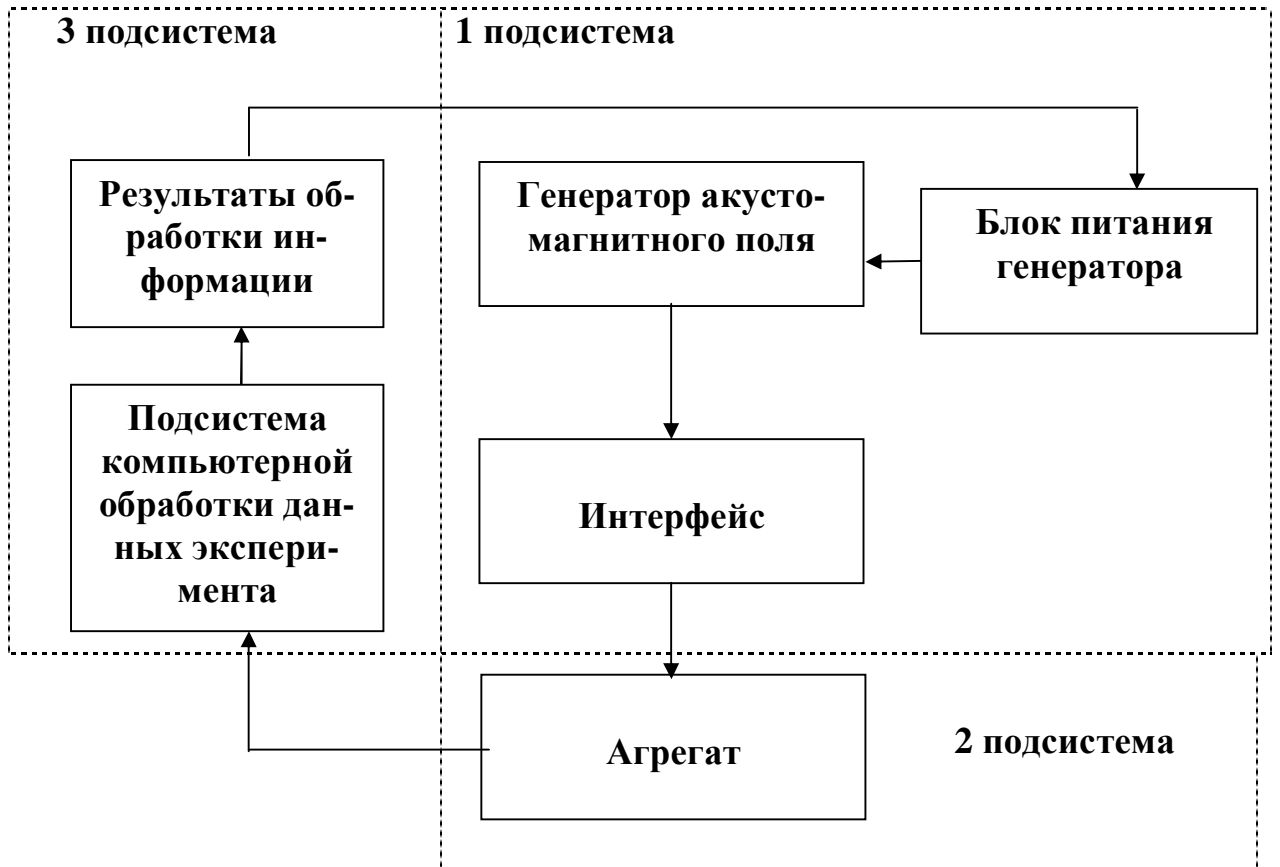
На этом этапе моделирования применяются методы регрессионного анализа модели.

##### **4.2. Формализация операций**

На основе содержательного описания определяется исходное множество характеристик системы. Для выделения существенных характеристик необходим хотя бы приближенный анализ каждой из них. При проведении анализа опираемся на постановку задачи и понимание природы исследуемой системы. После исключения несущественных характеристик выделяем управляемые и неуправляемые параметры и производим символизацию. Затем определяется система ограничений на значения управляемых параметров. Если ограничения не носят принципиальный характер, то ими пренебрегают.

### 4.3. Разработка системы проведения эксперимента

Взаимодействия в системе проведения эксперимента представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема системы проведения эксперимента**

В структуре системы можно выделить три подсистемы. Первая подсистема представляет собой генератор акустомагнитного поля с блоком питания и изменяемый интерфейс. Блок питания генератора предназначен для подачи на генератор акустомагнитного поля сигналов различной формы в зависимости от результатов, полученных при компьютерной обработке выходной информации от агрегата.

Генератор акустомагнитного поля представляет устройство для акустомагнитной обработки жидкости, отличающееся от других устройств тем, что с целью повышения эффективности в работе устройства при од-

новременном улучшении его массогабаритных характеристик, в рабочем зазоре происходит воздействие на протекающую жидкость двумя полями – акустическим и магнитным одновременно.

Вторая подсистема представляет собой различные агрегатные установки, в которых используется жидкость, прошедшая предварительную обработку. Например, в промышленности широко применяются две системы водяного охлаждения: прямоточная и обратная. В этих системах аппарат располагают в том месте, где анализом установлено отсутствие агрессивной углекислоты.

Осведомляющая информация формируется на основе анализа хода технологического процесса, состояния оборудования и обрабатывается в третьей подсистеме.

Третья подсистема представляет собой аппаратный комплекс, позволяющий обрабатывать информацию, полученную в ходе анализа технологического процесса на ЭВМ. Обработанная информация представляется в виде модели изучаемого процесса. Полученный вид отношения позволяет определить оптимальные параметры, необходимые для работы первой подсистемы, в зависимости от того, какая агрегатная установка подключена к интерфейсу.

Из сказанного можно сделать вывод, что синтез системы проведения эксперимента заключается в формировании системы из представленных подсистем.

#### **4.4. Разработка плана проведения эксперимента**

В соответствии с системой проведения эксперимента необходимо осуществлять планирование активного эксперимента. При проведении активного эксперимента задается определенный план варьирования факторов, т. е. эксперимент заранее планируется.

В активном эксперименте факторы могут принимать только фиксированные значения (*уровень фактора*). Количество принимаемых уровней факторов зависит от выбранной структуры факторной модели и принятого

плана эксперимента. Минимальный  $X_{j\min}$  и максимальный –  $X_{j\max}$ ,  $j = \overline{1, n}$  ( $n$  – число факторов) уровни всех факторов выделяют в факторном пространстве некоторый гиперпараллелепипед, представляющий собой *область планирования*. В области планирования находятся все возможные значения факторов, используемые в эксперименте.

Вектор  $\mathbf{X}^0 = (X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0)$  задает точку центра области планирования. Координаты этой точки  $X_j^0$  обычно выбирают из соотношения:

$$X_j^0 = \frac{X_{j\max} + X_{j\min}}{2}. \quad (1)$$

Точку  $X_j^0$  называют *центром эксперимента*. Она определяет основной уровень факторов  $X_j^0$ ,  $j = \overline{1, n}$ . Центр эксперимента стремятся выбрать как можно ближе к точке, которая соответствует искомым оптимальным значениям факторов. Для этого используется априорная информация об объекте.

*Интервалом* (или *шагом*) *варьирования фактора*  $X_j$  называют величину, вычисляемую по формуле:

$$\Delta X_j = \frac{X_{j\max} - X_{j\min}}{2}. \quad (2)$$

Факторы нормируют, а их уровни кодируют. В кодированном виде верхний уровень обозначают +1, нижний -1, а основной – 0. Нормирование факторов осуществляют на основе соотношения:

$$x_j = \frac{(X_j - X_j^0)}{\Delta X_j}, j = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Для переменных  $x_j$  начало координат совмещено с центром эксперимента, а в качестве единиц измерения используются интервалы варьирования факторов. В планах активных экспериментов факторы нормированы.

План эксперимента удобно представлять в матричной форме. План

эксперимента задается либо матрицей плана, либо матрицей спектра плана в совокупности с матрицей дублирования.

*Матрица плана* представляет собой прямоугольную таблицу, содержащую информацию о количестве и условиях проведения опытов. Строки матрицы плана соответствуют опытам, а столбцы – факторам. Размерность матрицы плана  $L \times n$ , где  $L$  – число опытов,  $n$  – число факторов. При проведении повторных (дублирующих) опытов в одних и тех же точках плана матрица плана содержит ряд совпадающих строк.

*Матрица спектра плана* – это матрица, в которую входят только различающиеся между собой строки матрицы плана. Размерность матрицы спектра плана  $N \times n$ , где  $N$  – число точек плана, различающихся между собой хотя бы одной координатой  $X_{ij}$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, n}$ ,  $j = 1 \dots n$ .

Матрица спектра плана имеет вид:

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ X_1 \\ \mathbf{r} \\ X_2 \\ \dots \\ \mathbf{r} \\ X_i \\ \dots \\ \mathbf{r} \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{Nj} & \dots & X_{Nn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $X_i$  – вектор, определяющий нормированные значения координат точки плана в  $i$ -ом опыте;  $X_{ij}$  – нормированное значение  $j$ -го фактора в  $i$ -ом опыте.

*Матрица дублирования* – квадратная диагональная матрица  $m$ , диагональные элементы которой равны числам параллельных опытов в соответствующих точках спектра плана:

$$m = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Опыты при выполнении экспериментов проводятся в после-

довательности, предусмотренной матрицей плана. Эту матрицу предполагается использовать при рандомизации опытов, когда в результатах эксперимента можно ожидать наличие систематических ошибок. Спектр плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) содержит все возможные комбинации значений факторов на всех уровнях их изменения. Число точек  $N$  спектра плана определяется по формуле:

$$N = U^n, \quad (6)$$

где  $U$  – число уровней варьирования факторов;  $n$  – количество факторов.

Рассмотрим особенности и свойства ПФЭ, применяемых при построении линейных регрессий вида

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n b_{j,k} x_j x_k + \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n \sum_{l=k+1}^n b_{k,k,l} x_j x_k x_l + b_{1,2,\dots,n} x_1 x_2 \dots x_n . \quad (7)$$

Для получения линейной регрессии достаточно варьировать факторы на двух уровнях, т. е.  $U = 2$ , тогда число точек спектра плана будет:

$$N = 2^n. \quad (8)$$

Такой план принято обозначать ПФЭ $2^n$ . Рассмотрим матрицу спектра плана, полагая, что факторы нормированы и, следовательно, могут принимать значения только либо +1, либо -1. Применяя правило чередования знаков, составим матрицы спектров планов для  $n = 3$ .

При  $n = 3$ ,  $N = 2^3 = 8$ , а матрица  $X$  принимает вид:

$$X = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Спектры планов можно изобразить в привычной для экспе-

риментатора табличной форме. В таблице приведен спектр плана ПФЭ<sup>3</sup>.

**Таблица 1 – спектр плана ПФЭ<sup>2</sup><sup>3</sup>**

$i$	Факторы			$i$	Факторы		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$		$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1	-1	-1	5	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1	6	+1	-1	+1
3	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1
4	+1	+1	-1	8	+1	+1	+1

В таблице буквой  $i$  обозначен номер точки спектра плана. Точки плана ПФЭ<sup>2 $n$</sup>  располагаются в вершинах  $n$ -мерного гиперкуба. Посредством ПФЭ можно построить как простейшую линейную модель технической системы вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (10)$$

так и нелинейную.

В общем случае в полиномиальную модель могут входить факторы в любой степени и различные комбинации из их произведений. Так как при нормированных факторах их значения равны +1 или -1, а в качестве показателей степеней факторов принимаются целые числа, то при четных показателях степеней вектор-столбец базисной функции состоит только из +1 и совпадает с вектором-столбцом функции  $f_0(\mathbf{X})$ , а векторы-столбцы всех базисных функций, соответствующих одним и тем же факторам  $x_j$ , возведенным в любые нечетные степени, будут совпадающими. Вместе с тем любые комбинации произведений факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$  могут быть в числе базисных функций.

Так как при использовании всех возможных сочетаний факторов в уравнении регрессии число определяемых коэффициентов  $N_B$  равно числу точек  $N$  спектра плана ПФЭ<sup>2 $n$</sup> , то такой план является насыщенным.

ПФЭ<sup>2 $n$</sup>  относятся к классу *ортогональных планов*.

Для линейной модели вида (10) план ПФЭ<sup>n</sup> является *A*- и *E*-оптимальным.

*Если описание системы планом первого порядка не позволяет создать истинную модель системы, то переходят к построению планов второго порядка.*

Они позволяют сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, который содержит большее число членов, чем неполный квадратичный полином, сформированный по планам первого порядка, и поэтому требуют большего числа выполняемых опытов. Полный квадратичный полином при  $n = 2$  содержит 6 членов [14]:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2,$$

при  $n = 3 - 11$  членов:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2.$$

Известно, что для получения квадратичной зависимости каждый фактор должен фиксироваться как минимум на трех уровнях.

Для планов второго порядка область планирования может быть естественной, то есть включать область планирования планов первого порядка и дополнительные точки (такие планы называются композиционными). Дополнительные точки могут выходить за область плана первого порядка – единичного гиперкуба. В этом случае опыты в них реализуются при установлении факторов за пределами варьирования. Это надо учитывать при определении области совместимости факторов:

- не выходить за пределы единичного гиперкуба, то есть для всех точек плана выполняется условие  $|X_{iw}| \leq 1$ ;

- не выходить за пределы единичного гипершара, определяемого соотношением таких значений факторов в плане, что  $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \leq 1$ .

План с одной областью планирования можно перестроить в план с другой областью планирования. Если уже был ранее сформирован план ПФЭ, но точность его функции отклика не удовлетворяет, то мы можем



достроить этот план до плана второго порядка (композиционный план) и сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома без потери информации о ранее сделанных опытах.

#### **4.5. Проведение эксперимента**

Основной целью проведения исследования системы акустомагнитной обработки топлива является получение оптимальных параметров процесса сжигания топлива. Для решения поставленной цели исследования проводятся на реальных физических объектах – автомобилях. Перед испытаниями следует убедиться в исправности ходовой части автомобиля и при необходимости отрегулировать развал и сходжение передних колес, давление воздуха в шинах и свободный ход педали сцепления и тормоза [3].

Пригодный для испытаний автомобиль должен иметь путь свободного качения (выбег) с установленной скоростью 80 км/ч до полной остановки не менее 800 м.

Выбег проверяется на горизонтальном участке сухого и ровного асфальтированного шоссе при отсутствии сильного ветра и закрытых окнах. В кузове должны находиться водитель и один пассажир. Величина выбега определяется как среднее арифметическое результатов, полученных при двух заездах в противоположных направлениях [3].

Проверка параметров процесса сжигания топлива проводится путем измерения расхода топлива 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 подается в карбюратор из специально установленного на автомобиль мерного бачка.

В процессе функционирования системы акустомагнитной обработки топлива возникает необходимость управления параметрами акустомагнитного аппарата в зависимости от концентрации углекислого газа в выхлопной трубе автомобиля. Данный показатель характеризует степень сгораемости топлива и, следовательно, влияет на расход топлива.

#### 4.6. Статистическая обработка результатов, полученных в ходе проведения эксперимента

Прежде чем определять оценки коэффициентов регрессии, необходимо выполнить статистический анализ результатов эксперимента с целью оценки их качества и пригодности для построения регрессионной модели. Статистический анализ включает оценку ошибок параллельных опытов, отсеивание грубых ошибок, проверку однородности дисперсии опытов и определение дисперсии воспроизводимости эксперимента.

**Ошибки параллельных опытов.** В условиях наличия случайных помех с целью уменьшения случайных погрешностей эксперимента и повышения точности получаемой регрессионной модели осуществляется дублирование опытов, т. е. проведение параллельных опытов. Каждый опыт, предусмотренный матрицей спектра плана, повторяется  $m = 2...5$  раз. Рекомендуется число  $m$  принимать одинаковым для всех  $N$  точек плана. В результате проводится  $L = Nm$  опытов в соответствии с матрицей плана, предусматривающей при этом рандомизацию опытов.

Повторные опыты в одной и той же точке плана при наличии помехи дают различные результаты при определении функции отклика. Разброс результатов относительно оценки математического ожидания функции отклика называют *ошибкой воспроизводимости опыта*. Эту ошибку надо оценить.

Для каждой точки плана по результатам параллельных опытов находят *выборочное среднее*  $\overline{y}_i$  равное среднему арифметическому полученных опытных значений функции отклика:

$$\overline{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m y_{iu}, i = \overline{1, N}, \quad (13)$$

где  $u$  – номер параллельного опыта;  $y_{iu}$  – значение функции отклика в  $u$ -м параллельном опыте  $i$ -ой точки спектра плана.

Для оценки отклонения функции отклика от ее среднего значения  $\overline{y}_i$

вычисляется *дисперсия воспроизводимости* опыта по данным  $m$  параллельных опытов в каждой  $i$ -ой точке спектра плана:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2, i = \overline{1, N}. \quad (14)$$

При вычислении  $S_i^2$  принимают число степеней свободы  $k$  на единицу меньше, чем число параллельных опытов, т. е.  $k = m - 1$ , так как одна степень свободы уже использована для вычисления  $\bar{y}_i$ . Это обеспечивает несмещенность оценки дисперсии воспроизводимости опыта  $S_i^2$ .

**Отсевание грубых ошибок.** Формула (13) справедлива лишь при нормальном распределении случайной величины  $y$ . При наличии грубых ошибок опыта распределение  $y$  отклоняется от нормального, поэтому сначала надо исключить грубые ошибки, а затем определять  $\bar{y}_i$  и  $S_i^2$  [11].

При однократных измерениях обнаружить промах не представляется возможным. Для уменьшения вероятности появления промахов измерения проводят два-три раза и за результат принимают среднее арифметическое полученных расчетов. При многократных измерениях для обнаружения промахов используют статистические критерии, предварительно определив, какому виду распределения соответствует результат измерений.

Для выявления грубых погрешностей задаются вероятностью  $q$  (уровнем значимости) того, что сомнительный результат действительно мог иметь место в данной совокупности результатов измерений.

В общем случае границы  $t_{гр} S_x$  выборки зависят не только от объема  $n$ , но и от вида распределения.

**Проверка однородности дисперсий.** Однородность дисперсии означает, что среди всех дисперсий  $S_i^2$  нет таких, которые бы значительно превышали все остальные. Для проверки однородности дисперсий во всех точках спектра плана используется либо критерий Кохрена  $G$ , либо критерий Фишера  $F$  [2].

Критерий Кохрена основан на распределении отношения максимальной дисперсии  $S_{i_{\max}}^2$  к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{S_{i_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (15)$$

Критерий Кохрена применяется, если количество сравниваемых дисперсий больше двух, а число повторных опытов во всех точках плана одинаково. Определив число степеней свободы  $k_1 = m - 1$  и  $k_2 = N$  ( $N$  – число точек спектра плана,  $m$  – количество повторных опытов в каждой точке плана), находят табличное значение критерия Кохрена  $G_T$ . Если  $G < G_T$ , гипотеза об однородности дисперсий и воспроизводимости результатов принимается. Это означает, что предпосылки 1 и 2, положенные в основу регрессионного анализа, выполняются. В этом случае каждая из дисперсий  $S_i^2$  оценивает одну и ту же дисперсию помехи  $S_e^2$ . Следовательно, полученные результаты эксперимента – качественные, и могут быть использованы для построения регрессионной модели. В противном случае следует увеличить число параллельных опытов или повторить эксперимент при строгом соблюдении методики и схемы проведения опытов, предприняв необходимые меры для исключения грубых ошибок.

Если выяснится, что непостоянство дисперсии помехи  $S_e^2$  обусловлено внутренними свойствами объекта, то необходимы более сложные способы обработки результатов эксперимента.

**Дисперсия воспроизводимости эксперимента.** Если дисперсии  $S_i^2$  однородны, то их усредняют и находят *дисперсию воспроизводимости эксперимента*:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (18)$$

Дисперсия  $S_y^2$  представляет собой оценку дисперсии помехи  $S_e^2$ . Так

как число степеней свободы при определении дисперсий  $S_i^2$  равно  $k = m - 1$ , то число степеней свободы, связанное с оценкой  $S_y^2$ , вычисляется по формуле:

$$k = N(m - 1). \quad (19)$$

Формула (19) годится, если число повторных опытов во всех точках спектра плана одинаково. Если число опытов различно, используют формулу:

$$S_y^2 = \frac{S_1^2 k_1 + S_2^2 k_2 + \dots + S_N^2 k_N}{k_1 + k_2 + \dots + k_N} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2 k_i}{\sum_{i=1}^N k_i}, \quad (20)$$

где  $k_i$  – число степеней свободы в  $i$ -ой точке спектра плана;  $k_i = m_i - 1$ ;  $m_i$  – число параллельных опытов в этой точке.

#### 4.7. Оценка коэффициентов регрессии

Оценка коэффициентов уравнения регрессии происходит в соответствии с ПРЕСС-процедурой. ПРЕСС-процедура выбора предикторных переменных была предложена в работе Аллена [18].

Это комбинация метода всех возможных регрессий, анализа остатков и метода перепроверки. Предположим, что модель содержит  $p$  параметров, включая  $b_0$ , и имеется всего  $n$  измерений. Вычисления сводятся к следующему:

1. Вычеркнем условия и результаты первого опыта, т. е. соответствующие значения предикторных переменных и значение отклика. Построим все возможные регрессионные модели, используя условия и результаты оставшихся  $n-1$  опытов.
3. По каждой модели подсчитаем предсказываемое значение отклика  $\hat{Y}_{1p}$  в условиях первого опыта и вычислим предсказываемое расхождение  $(Y_1 - \hat{Y}_{1p})$ .
4. Повторим шаги 1, 2 и 3, исключив из обработки условия и

результаты второго опыта, чтобы получить значения  $(Y_2 - \hat{Y}_{2p})$ . Затем исключается третий опыт и находятся значения  $(Y_3 - \hat{Y}_{3p})$  для каждой модели. И так вплоть до исключения последнего n-го опыта.

5. Для каждой регрессионной модели вычислим сумму квадратов предсказываемых расхождений:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{ip})^2.$$

6. Выберем "наилучшую" регрессионную модель. Она должна иметь сравнительно малую сумму квадратов предсказываемых расхождений, но не включать слишком много предикторов.

ПРЕСС-процедура имеет преимущество: она дает массу детальной информации об устойчивости различных построенных в пространстве моделей и позволяет сконцентрировать внимание на наиболее важных точках в пространстве предикторов.

## **5. Проверка построенной модели на точность и адекватность**

Требование адекватности находится в противоречии с требованием простоты, и это нужно учитывать при проверке модели на адекватность. Исходный вариант модели предварительно проверяется по следующим основным аспектам:

- все ли существенные параметры включены в модель;
- нет ли в модели несущественных параметров;
- правильно ли отражены функциональные связи между параметрами;
- правильно ли определены ограничения на значения параметров.

Для проверки рекомендуется привлекать специалистов, которые не принимали участия в разработке модели. Они могут более объективно рассмотреть модель и заметить ее слабые стороны, чем ее разработчики. Такая предварительная проверка модели позволяет выявить грубые ошибки.

В созданной модели задается произвольное значение параметров из заданной области значений. Производится проверка модели по различным критериям и возникающим погрешностям. По результатам проверки модели на адекватность принимается решение о возможности ее практического применения и корректировки.

**Проверка независимости значений уровней случайной компоненты**, т.е. проверка отсутствия существенной автокорреляции в остаточной последовательности может осуществляться по ряду критериев, наиболее распространенным из которых является d-критерий Дарбина – Уотсона. Расчетное значение этого критерия определяется по формуле:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}, \quad (21)$$

Заметим, что расчетное значение критерия Дарбина – Уотсона в интервале от 2 до 4 свидетельствует об отрицательной связи; в этом случае его надо преобразовать по формуле  $d^c = 4 - d$  и в дальнейшем использовать значение  $d^c$ .

Расчетное значение критерия  $d$  (или  $d^c$ ) сравнивается с верхним  $d_2$  и нижним  $d_1$  критическими значениями статистики Дарбина – Уотсона.

Если расчетное значение критерия  $d$  больше верхнего табличного значения  $d_2$ , то гипотеза о независимости уровней остаточной последовательности, т. е. об отсутствии в ней автокорреляции, принимается. Если значение  $d$  меньше нижнего табличного значения  $d_1$ , то эта гипотеза отвергается, и модель неадекватна. Если значение  $d$  находится между значениями  $d_1$  и  $d_2$ , включая сами эти значения, то считается, что нет достаточных оснований сделать тот или иной вывод, и необходимы дальнейшие исследования, например, по большему числу наблюдений.

Вывод об адекватности модели делается, если все указанные выше четыре проверки свойств остаточной последовательности дают положи-

тельный результат. Для адекватных моделей имеет смысл ставить задачу оценки и точности. Точность модели характеризуется величиной отклонения выхода модели от реального значения моделируемой переменной. Для показателя, представленного рядом, точность определяется как разность между значением фактического уровня ряда и его оценкой, полученной расчетным путем с использованием модели, при этом в качестве статистических показателей точности применяются следующие:

среднее квадратическое отклонение

$$s_e = \sqrt{\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}, \quad (22)$$

средняя относительная ошибка аппроксимации

$$\bar{e}_{\text{оми}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| \times 100\%, \quad (23)$$

коэффициент сходимости

$$j^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad (24)$$

коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - j^2 \quad (25)$$

и другие показатели. В приведенных формулах  $n$  – количество уровней ряда,  $k$  – число определяемых параметров модели,  $\hat{y}_t$  – оценка уровней ряда по модели,  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение уровней ряда.

Модель считается работоспособной при  $R \geq 0,75$ . В этом случае обеспечивается уменьшение ошибки предсказания, полученного по уравнению регрессии, по крайней мере, в 2 раза в сравнении с предсказанием по среднему значению отклика  $\bar{y}$  без учета влияния факторов  $\hat{X}$  на функцию отклика  $y$ .

На основании указанных показателей можно сделать выбор из нескольких адекватных регрессионных моделей наиболее точной, хотя мо-



жет встретиться случай, когда по некоторому показателю более точна одна модель, а по другому – другая. Данные показатели точности моделей рассчитываются на основе всех уровней ряда, и поэтому отражают лишь точность аппроксимации.

**Проверка гипотезы адекватности модели при наличии повторных наблюдений в центре плана.**

При оценке градиента функция отклика имеет вид:

$$y = \sum_{i=1}^N f_j(\mathbf{X}_i) b_i. \quad (26)$$

Рассмотрим проверку гипотезы  $H_0$ , состоящую в том, что модель 26 адекватна. Обозначим через  $y_1, y_2, \dots, y_N$  наблюдения в точках плана. Тогда  $y_{n+l} = y_l^0 (l = 1, \dots, n)$ .

Несмещенная оценка дисперсии наблюдений  $s^2$  равна

$$s_e^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{l=1}^{n_0} (y_l^0 - \bar{y}_0)^2. \quad (27)$$

Оценка параметра  $\sigma^2$ , обусловленная неадекватностью модели, равна

$$s_r^2 = Q / (n + 1 - r),$$

где  $r$  – ранг матрицы  $X$ .

Поскольку планирование ортогональное, то

$$Q = \sum_{u=1}^n y_u^2 + n_0 \bar{y}_0^2 - n \sum_{j=1}^{p_0} \hat{b}_j^{02} - N \hat{b}_0^{02}, \quad (28)$$

где

$$\hat{b}_j^0 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{ju} y_u, \quad j = 1, 2, 3, \dots, p_0, \quad (29)$$

$$\hat{b}_0^0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^n x_{0u} y_u.$$

Гипотеза  $H_0$  отклоняется, если

$$s_r^2 / s_e^2 > F_{a; n-p_0, n_0-1}.$$

Порог  $F_{a; n-p_0, n_0-1}$  определяется из условия:

$$P\{F_{n-p_0, n_0-1} > F_{a; n-p_0, n_0-1}\} = a,$$

где  $\alpha$  – заданный уровень значимости, а  $F_{n-p_0, n_0-1}$  – случайная величина, имеющая распределение Фишера с  $n - p_0$  и  $n_0 - 1$  степенями свободы.

*Однако главным путем проверки адекватности модели исследуемому объекту выступает практика. По результатам проверки модели на адекватность принимается решение о возможности ее практического использования или о проведении корректировки.*

## **6. Исследование модели и получение функционала оптимизации**

В настоящее время при решении задач планирования эксперимента наибольшее распространение получили алгоритмы поиска экстремума функции отклика, использующие градиентные методы. Их особенность состоит в том, что движение при поиске происходит в направлении не самого градиента, который нам неизвестен, а его оценки. Одним из наиболее известных в классе градиентных методов – поиск экстремума функции отклика в практике планирования эксперимента можно считать метод, разработанный Боксом и Уильсоном [1].

В общем виде метод Бокса и Уильсона состоит в повторении процедуры:

- построение факторного эксперимента в окрестности некоторой точки;
- вычисление оценки градиента в этой точке по результатам эксперимента;
- крутое восхождение в направлении оценки градиента;
- нахождение оценки максимума (минимума) функции отклика по этому направлению.

## **7. Построение систем акустомагнитной обработки жидкости**

При заданной области исследования необходима разработка систем акустомагнитной обработки жидкости, применяемых для уменьшения накипеобразования в водных агрегатах и увеличения степени сгорания углеводородного топлива в двигателях внутреннего сгорания.

### 7.1. Система акустимагнитной обработки воды

Основной целью исследования системы акустимагнитной обработки воды является получение оптимальных параметров процесса накипеобразования. Решение задачи управления этим процессом заключается в построении сначала идеализированной модели функционирования объекта, а затем в получении модели его фактического состояния, и на основе их сравнения определяется управляющее воздействие. Таким образом, в процессе функционирования системы акустимагнитной обработки воды возникает взаимодействие с объектом управления.

Система акустимагнитной обработки воды представлена на рисунке 4.

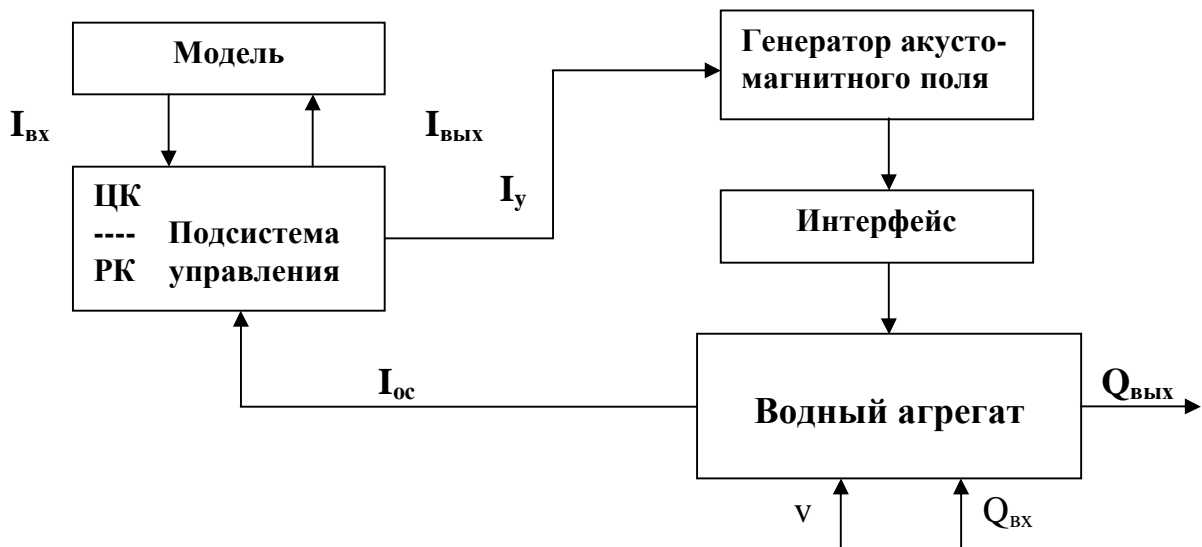


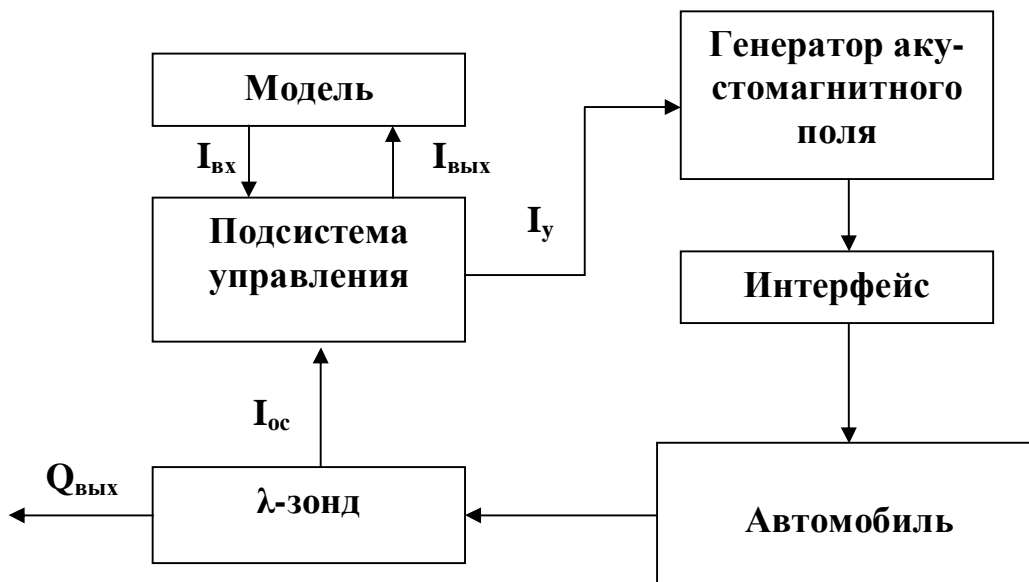
Рисунок 4 – Система акустимагнитной обработки воды

В структуре представленной системы можно выделить целевой канал (ЦК) и рабочий канал (РК). Целевой канал на основе модели осуществляет принятие решения по управляющему воздействию. Для этого используется входная информация  $I_{вх}$ , получаемая из модели и задающая оптимальные параметры процесса акустимагнитной обработки воды. Соответственно в модель возвращается выходная информация  $I_{вых}$ , которая преобразует модель и позволяет корректировать характеристики генера-

тора акустомагнитного поля. В целевом канале формируется преобразующая информация и информация принятия решения. В рабочий канал поступает осведомляющая информация  $I_{oc}$  от водной среды. Осведомляющая информация формируется на основе анализа процесса накипеобразования, происходящего в агрегатах применяющих водную среду. Генератор акустомагнитного поля формирует на основе управляющей информации  $I_y$  управляющее воздействие на воду, циркулирующую в агрегатах с водной средой. Объектом управления является водный агрегат, в котором изменение физико-химической структуры воды, поступающей в систему  $Q_{вх}$ , приводит к изменению выходных параметров системы  $Q_{вых}$ . Это преобразование в объекте управления происходит при наличии случайных внешних возмущений  $v$  за счет целенаправленного управления. Рассмотренная структура дает лишь общее представление об информационном обмене в процессе управления системой акустомагнитной обработки воды.

## 7.2. Система акустомагнитной обработки топлива

Система акустомагнитной обработки топлива представлена на рисунке 5.





### Рисунок 5 – Система акустомагнитной обработки топлива

Осведомляющая информация  $I_{oc}$  поступает от датчика концентрации углекислого газа в отработанных газах автомобиля ( $\lambda$ -зонд). А подсистема управления акустомагнитной обработкой топлива взаимосвязана с бортовой системой управления подачей топлива для тех автомобилей, где она есть и работает самостоятельно, если бортовой системы управления подачей топлива нет. Объектом управления является автомобиль, в котором изменение физико-химических свойств топлива приводит к изменению выходных параметров системы  $Q_{вых}$ , а именно: более полному сгоранию топлива, т.е. уменьшению содержания углекислого газа, и, как следствие, снижению расхода топлива.

### Список литературы

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971.
2. Веницкий И.Г., Веницкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1979. – 447 с., ил. – (Мат. статистика для экономистов).
3. Вершигора В.А. Автомобили ВАЗ / В.А. Вершигора, В.И. Зельцер, К.Б. Пятков. – М.: Изд-во "Транспорт", 1974. – С.73–75.
4. Душкин С.С. Магнитная водоподготовка на химических предприятиях / С.С. Душкин, В.Н. Евстратов. – М.: Химия, 1986. – 144 с.: ил.
5. Киргинцев А.Н., Соколов В.М. Коллоидный журнал АН СССР. – 1965. – №5. – С. 24.
6. Классен В.И. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных смесей. – М.: Наука, 1971.
7. Классен В.И. Омагничивание водных систем. – 2-е изд. – М.: Химия, 1982.

8. Лапотышкина Н.П. Магнитная обработка воды, перспективы применения ее на тепловых электростанциях: сб. "Водоподготовка, водный режим и химконтроль на паросиловых установках". – Вып. 2. – Изд-во "Энергия", 1966. – С. 117–124.

9. Миненко В.И. Магнитная обработка вводно-дисперсных систем. – Киев: Техника, 1970. – 168 с.

10. Ремпель С.И. ГОСИНТИ "Передовой научно-технический опыт". – 1963, №25-63-884/15, №3.

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

12. Тебенихин Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках. – М.: Энергоиздат, 1985.

13. Терновцен В.Е. Магнитные установки в системах оборотного водоснабжения. – Киев: Будівельник, 1976. – 88 с.

14. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977.

15. Чумаевский Н.Б. Магнитный активатор воды – гидромультиполь. – Н.Б.НПП "АТЛИС".

16. Шахов А.И., Душкин С.С. Коммунальное хозяйство. – Киев.: Будівельник, 1964. – С. 102–106.

17. Патент России 2047566, МКП С02Р 1/36, В01 И 19/10 Способ снижения концентрации эмульгированных в воде нефтепродуктов / С.П. Зубрилов, А.С. Зубрилов (ВЦ), №5021710/28; Заявл. 27.06.91. Оpubл. 10.11.95; Бюл. М 31.

18. Allen D.M. The prediction sum of squares as a criterion for selecting predictor variables. – University of Kentucky, Department of Statistics, Technical Report 1971, 23.