

Критериальное моделирование в виртуализации квалификационных испытаний

Рассмотрены методы виртуализации квалификационных испытаний на основе применения критериальных моделей. Эффективность указанных методов продемонстрирована на примерах моделирования химической стабильности жидкости в гидростатических условиях в целях определения параметров поверочного эксперимента, процедуры оптимизации состава жидкофазной смеси по критерию достижения наилучших характеристик, а также использования результатов прогнозирования фрикционного износа для формирования соответствующих квалификационных норм.

Ключевые слова: квалификационные испытания, полунатурный эксперимент, виртуализация, физическая модель, критериальная модель, квалификационные нормы, химическая трансформация, уравнение Аррениуса, линейная регрессия

Главной особенностью квалификационных испытаний является то, что их основным методом является лабораторное исследование объекта, который, в принципе, ничем не отличается или не будет отличаться от эксплуатируемого [1]. Лабораторную установку при этом можно интерпретировать как реализацию некоторой физической модели системы, включающей исследуемый объект. В этом смысле квалификационные испытания являются частным случаем более широкого понятия полунатурных экспериментов. В рамках этих экспериментов не накладываются ограничения ни на характер модели, которая может быть как физической, так и математической, ни на характер объекта исследования, который может быть как реальным, так и виртуальным. В частности, тестирование программного обеспечения также может осуществляться в рамках полунатурного эксперимента. А поскольку основное свойство исследуемого объекта — неотличимость от эксплуатируемого имеет место и здесь, указанное тестирование также можно интерпретировать как своеобразные квалификационные испытания.

Таким образом, адекватные математические модели системы и объекта можно интерпретировать как виртуальную реальность, а численный эксперимент с их использованием — как виртуальную квалификацию. При этом натурные эксперименты, проводимые в рамках обычных квалификационных испытаний, могут выступать как средство идентификации создаваемых математических моделей. В частности, при наличии физической модели исследуемого процесса в виде лабораторной установки возможной базой для виртуализации являются критериальные модели, базирующиеся на использовании методов теории подобия [2, 3]. Эти методы традиционно применяют в исследованиях физических процессов в ситуации недостаточной проработанности теории последних. Моделирование физических процессов сводится в этом случае к построению их безразмерных инвариантов — критериев подобия, а также соотношений между ними. Как правило, указанные инварианты формируют либо

путем нормализации точных уравнений физических процессов, либо по результатам априорного анализа параметров, влияющих на процесс, с использованием методов теории размерности.

В дальнейшем построенные критериальные модели могут быть использованы для экстраполяции лабораторных результатов на штатные условия эксплуатации объекта, а обратный пересчет, осуществляемый с их помощью, позволяет сформировать условия лабораторного эксперимента, адекватные прогнозируемым эксплуатационным условиям. Отсюда вытекают основные цели виртуализации квалификационных испытаний:

- прогнозирование эксплуатационных характеристик исследуемого объекта по результатам квалификационных испытаний;
- обратный пересчет эксплуатационных условий в адекватные параметры квалификационных испытаний, а эксплуатационных требований — в соответствующие квалификационные нормы.

Моделирование химической стабильности

Цель проведенного моделирования — определение параметров поверочного эксперимента по оценке химической стабильности жидкости в гидростатическом случае [4]. Актуальность сформулированной цели была обусловлена тем, что эксперимент проводили при повышенной температуре для сокращения срока испытаний. Поэтому в число оцениваемых параметров эксперимента была включена его длительность. Таким образом, в ходе проведенного рассмотрения решали обратную задачу виртуализации.

Моделирование осуществляли путем построения следующих критериев подобия:

- геометрического подобия экспериментального и натурального сосудов вида $S/V^{2/3}$, где S , V — поверхность и объем сосуда;
- термодинамического подобия температур и давлений вида $\frac{P}{\rho T}$, где P , T — гидростатическое

давление и температура жидкости, а c , ρ — ее удельная теплоемкость и плотность;

- кинетического подобия протекания химической трансформации в натуральных и экспериментальных условиях вида $\ln \frac{k_0 t}{\mu \rho V \cdot dgr} - \frac{E_0}{RT}$, где

k_0 , t , E_0 , dgr — скорость, длительность, энергия активации и достигнутая степень трансформации соответственно, а μ , T — молярная масса и температура жидкости.

Данные критерии определяют параметры квалификационных испытаний, обеспечивающие подобие реальным условиям химической трансформации жидкости, а также длительность этих испытаний. В частности, они позволили рассчитать значение и условия достижения повышенной температуры в испытаниях, обеспечивающей подобие по термодинамическому критерию, а также оценить на основе кинетического критерия длительность этих испытаний, адекватную гарантийному сроку.

Оптимизация состава смеси

Факторный эксперимент в настоящее время используется повсеместно, в том числе в области химической технологии. Наряду с экспериментальным и измерительным оборудованием его существенными составными частями являются методики планирования эксперимента и обработки его результатов. Первая методика подробно рассматривается в специальной литературе [5]. Поэтому здесь мы в основном будем рассматривать методику обработки экспериментальных результатов.

Использование факторной модели предполагает линейно-регрессионную аппроксимацию результатов квалификационного эксперимента. После проведения идентификации модели по результатам калибровочных экспериментов она может быть использована для прогнозирования результатов и планирования контрольных экспериментов. Примером применения факторной модели является оптимизация состава смеси при заданных ограничениях на ее отдельные характеристики. Оптимизация состава смеси осуществлялась с использованием численных методов, работоспособность которых была продемонстрирована в ходе проведенного рассмотрения.

Характеристики смеси определялись долями входящих в нее компонентов, каждый из которых также представляет собой смесь некоторых базовых составляющих. Поскольку в конечном итоге свойства смеси определяются процентным содержанием этих составляющих, целью исследования являлся выбор состава, обеспечивающего оптимальность отдельных характеристик смеси при заданных ограничениях на прочие характеристики.

Предположим, что процентные доли базовых составляющих в составе смеси равны x_1 , x_2 , x_3 , а величины z_1 , z_2 , z_3 представляют собой доли смеси-

ваемых компонентов. Эти доли приведены к допустимым диапазонам содержания составляющих в составе компонентов и связаны с процентным содержанием x_1 , x_2 , x_3 базовых составляющих в составе смеси соотношениями вида:

$$\min_1 + z_1(\max_1 - \min_1) = x_1 \in (\min_1, \max_1);$$

$$\min_2 + z_2(\max_2 - \min_2) = x_2 \in (\min_2, \max_2);$$

$$\min_3 + z_3(\max_3 - \min_3) = x_3 \in (\min_3, \max_3).$$

Пусть результаты измерений характеристик смеси составляют y_1 , y_2 , y_3 . Примем в соответствии с [1], что влияние процентного состава на каждую характеристику описывается регрессионным соотношением вида:

$$\begin{aligned} y_i &= K_i X = k_{i1}x_1 + k_{i2}x_2 + k_{i3}x_3 + \\ &+ k_{i4}x_1x_2 + k_{i5}x_1x_3 + k_{i6}x_2x_3; \\ X &= (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6) = \\ &= (x_1, x_2, x_3, x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3); \\ K_i &= (k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}, k_{i5}, k_{i6}), \\ &i = 1, \dots, 3. \end{aligned}$$

Расчет вектора факторов X , входящих в состав линейной регрессии, осуществляется по z_1 , z_2 , z_3 в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Наряду с линейными факторами регрессии включает их произведения, отображающие взаимное влияние факторов. Коэффициенты линейной регрессии рассчитывают методом неопределенных коэффициентов. С этой целью факторы X_1 — X_6 , сформированные для различных комбинаций z_1 , z_2 , z_3 и транспонированные, трансформируются в матрицу в соответствии с рис. 2. Эта матрица представляет собой матрицу систем линейных уравнений относительно коэффициентов регрессии. Правые части этих систем образуются векторами y_1 , y_2 и y_3 , а их решениями являются наборы коэффициентов

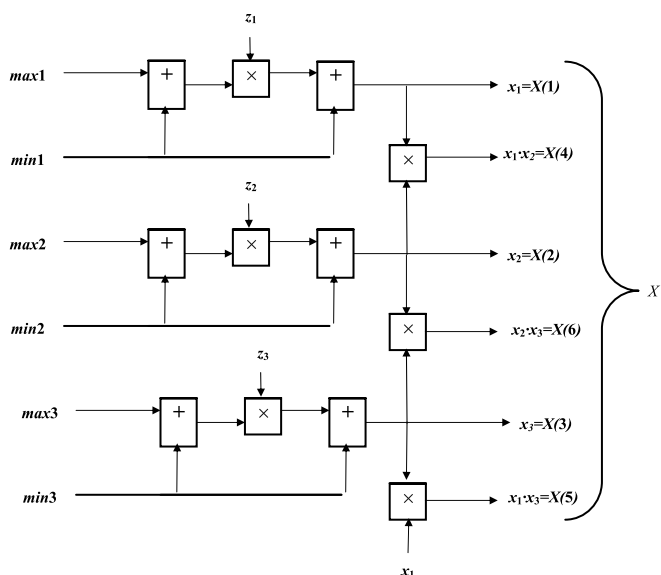


Рис. 1. Расчет регрессионных переменных $R(z_1, z_2, z_3)$

K_1 , K_2 , и K_3 , используемые в дальнейшем для пересчета процентного состава в характеристики смеси.

Задача оптимизации состава, таким образом, сводится к оптимальному выбору приведенных долей z_1 , z_2 , z_3 . В качестве критерия оптимальности в дальнейшем принимается максимум y_1 при условии, что y_2 и y_3 не превышают заданных значений y_{2lim} и y_{3lim} . Реализация соответствующей процедуры условной максимизации приведена на рис. 3. Выбранные значения z_1 , z_2 , z_3 трансформируются в вектор X факторов в модуле $R(z_1, z_2, z_3)$, отображенном на рис. 1. Перемножая этот вектор с векторами коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 , формируем текущие характеристики y_1 , y_2 , y_3 . В качестве исходной точки условного максимума принята $(z_1, z_2, z_3) = (1, 0, 0)$. Обновление координат этой точки происходило в ходе перебора z_1 , z_2 , z_3 при выполнении следующего условия C :

$$y_1 > y_{1max};$$

$$y_2 < y_{2lim};$$

$$y_3 < y_{3lim};$$

где y_{1max} — текущая оценка максимума y_1 .

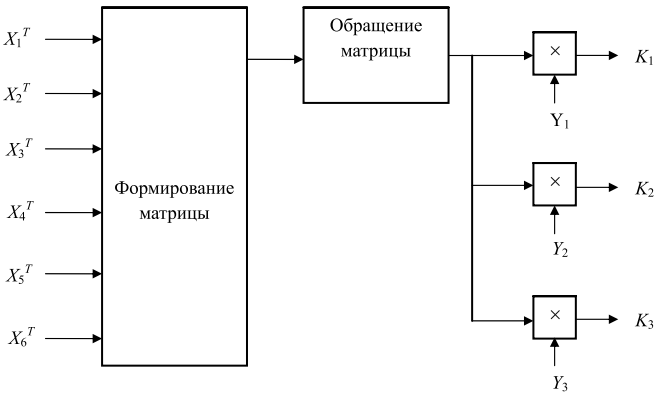


Рис. 2. Формирование регрессионных коэффициентов

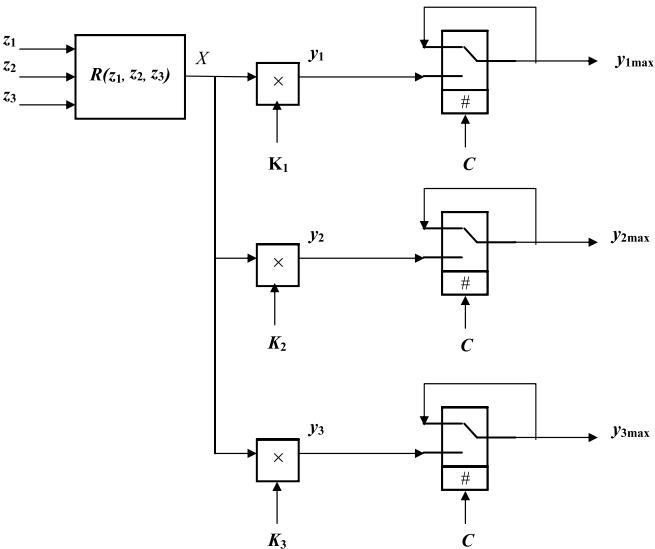


Рис. 3. Оптимизация состава смеси

В рамках реализуемой процедуры рассматривали два метода перебора z_1 , z_2 , z_3 . Первый из них — метод статистического перебора — представляет собой реализацию метода Монте-Карло и отображен на рис. 4. Переменная z_1 представляет собой случайную величину, равномерно распределенную в диапазоне $(0, 1)$, а переменная z_2 — случайную величину, равномерно распределенную в диапазоне $(0, 1 - z_1)$. Переменная z_3 определяется из условия полноты состава смеси $z_1 + z_2 + z_3 = 1$. В случае прямого перебора, отображенном на рис. 5, целочис-

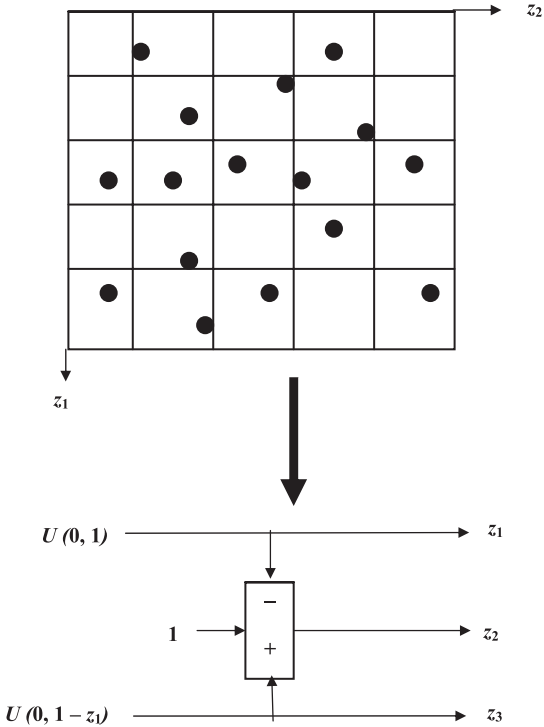


Рис. 4. Статистический перебор

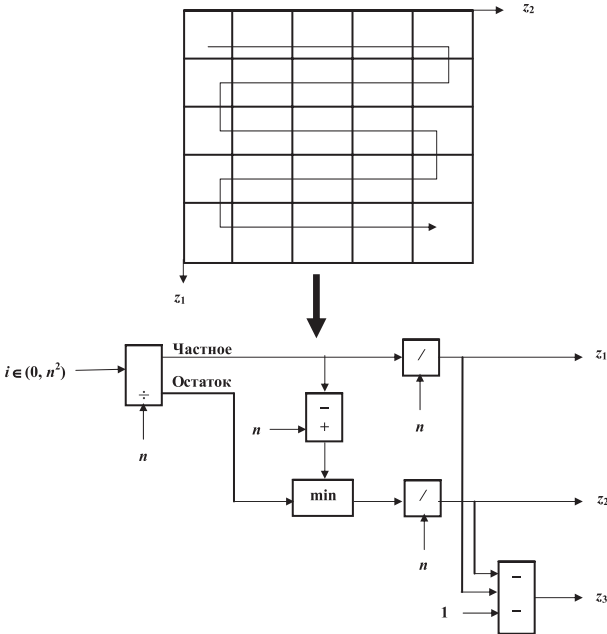


Рис. 5. Прямой перебор

ленная переменная I изменяется в диапазоне $(1, n^2)$. При его делении нацело на n получаем частное и остаток. Частное пересчитывается в z_1 путем деления на n , а остаток сравнивается с величиной n минус частное. Минимальное из этих значений пересчитывается в z_2 путем деления на n . Значение z_3 , как и ранее, находим из условия полноты. В ходе численного расчета, проведенного в соответствии с построенной процедурой, значение n принималось равным 1000. Этому соответствует число вариантов прямого перебора, равное 10^6 . Аналогичное число вариантов было использовано при статистическом переборе. Данный расчет показал, что предложенные процедуры оптимизации состава смеси являются приблизительно равноценными и представляют собой работоспособные средства оптимизации состава смеси в предложенных условиях.

Критериальная модель фрикционного износа

Еще одним примером критериальной модели, используемой для прогнозирования характеристик исследуемого объекта, является модель фрикционного износа плунжерной пары в аксиально-поршневом насосе. На основе анализа основных конструктивных особенностей данного насоса и с учетом противоизносных свойств смазывающего топлива в качестве критерия подобия между лабораторной установкой и исследуемым объектом был выбран критерий объемного износа следующего вида [6]:

$$V_w = \frac{\rho v \Delta V}{\mu N t}. \quad (1)$$

Здесь ρ , ΔV — плотность и дефект объема изнашиваемого материала; μ , N — коэффициент трения и нормальная нагрузка во фрикционной паре; t — длительность износа. Физический смысл данного критерия — отношение импульса увлекаемого износного материала к импульсу силы трения. Он используется для решения следующих задач:

- оптимальный выбор параметров критериальной модели путем минимизации вариации критерия износа;
- формирование уравнения связи между значением износа и параметрами в составе критерия, в частности параметром времени;
- прогнозирование значения эксплуатационного износа при заданных характеристиках пары трения и смазывающего топлива, а также заданной длительности износа;
- расчет параметров квалификационных испытаний и квалификационных норм.
- В работе [6] исследовали схему износа шарообразного измерительного элемента, приведенную на рис. 6. Его объемный износ ΔV соответствует объему шарового сегмента AEB (CFD), равного

$$\Delta V = V_1 - V_2, \quad (2)$$

где V_1 — объем плоского шарового слоя $AEBCFD$, а V_2 — объем усеченного конуса $ABCD$. Рассчитанный объем шарового слоя составил

$$V_1 = \pi R_0^2 (x_2 - x_1) + \frac{\pi}{3} (x_2^3 - x_1^3),$$

$$\text{где } x_1 = \sqrt{R_0^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad x_2 = \sqrt{R_0^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}.$$

Расчетное значение глубины износа ΔL составляет

$$\Delta L = \frac{D_0}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{g}{D_0}\right)^2} \right), \quad (3)$$

где ширина полосы износа g соответствует хорде CD и находится из прямоугольного треугольника CDG :

$$g = \frac{D - d}{2 \cos \alpha}. \quad (4)$$

Здесь α — угол наклона оси измерительного шарика ко второму элементу фрикционной пары — конической или цилиндрической шайбе в точке касания.

Критериальная модель износа была реализована в виде рабочего файла в программной среде **Microsoft Excel 7**. Этот файл дополнялся вспомогательным файлом надстройки, который представлял собой библиотеку функций **Visual Basic**, разработанных для расчета показателей износа и используемых для обработки результатов калибровочного эксперимента и прогнозирования характеристик износа моделируемого прототипа в различных условиях. В число данных функций входят:

- функция dV , предназначенная для расчета объемного износа по измерениям максимального и минимального диаметров полосы износа в соответствии с (2);

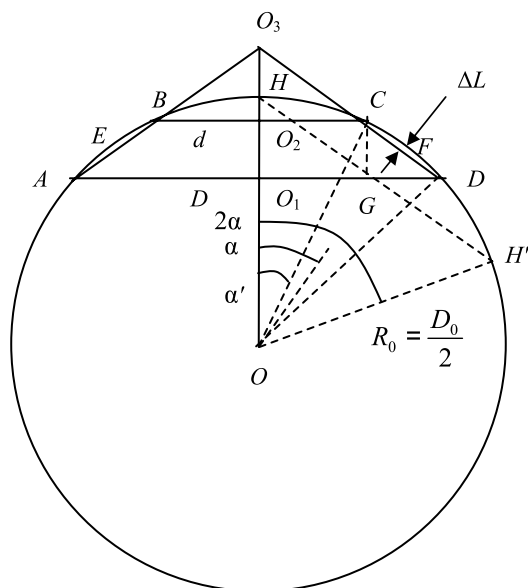


Рис. 6. Износ измерительного шарика

- функция ΔL , предназначенная для расчета глубины износа в соответствии с (3);
- функция g , предназначенная для расчета ширины полосы износа в соответствии с (4);
- функция $So = \frac{\eta v}{E \Delta L (1 - \beta A + \gamma S)}$, предназначенная для расчета числа Зоммерфельда в зависимости от динамической вязкости η , скорости скольжения v , кислотности A и процентного содержания серы S ;
- функция $fr = \mu_0 \exp(-\delta So(\beta, \gamma))$, используемая для расчета коэффициента граничного трения μ по коэффициенту сухого трения μ_0 и числу Зоммерфельда So ;
- функция $vsc = \eta_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^d e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$, используемая для расчета температурной зависимости динамической вязкости и описываемая ниже;
- функция $Vw = \frac{\rho v \Delta V}{\mu N t}$, предназначенная для расчета критерия подобия объемного износа;
- функция $\Delta V_c = \frac{\mu N t}{\rho v} \overline{Vw}$, предназначенная для прогнозирования объемного износа по оптимальному значению критерия подобия $\overline{Vw}$.

Температурную зависимость динамической вязкости рассчитывали с использованием функции $vsc(T)$, построенной на базе традиционной аппроксимации Андраде $\eta = c e^{\frac{b}{T}}$, где c , b считаются постоянными значениями характеристических вязкости и температуры [8]. Предполагая, что известна стандартная вязкость жидкости, измеренная при постоянной температуре $T_0 = 20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$,

получаем $\eta_0 = c e^{\frac{b}{T_0}}$ или $c = \eta_0 e^{-\frac{b}{T_0}}$. Подставляя величину c в аппроксимацию Андраде, получаем выражение текущей вязкости через стандартную

$\eta = \eta_0 e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$. Учитывая возможную зависимость характеристической вязкости от температуры, воспользуемся для построения модифицированной аппроксимации температурной зависимости более общим, чем аппроксимация Андраде, выражением

вида $\eta = \eta_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^d e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$. Будем в дальнейшем

считать, что данное выражение аппроксимирует заданную табличную зависимость $\eta_i = \eta(T_i)$, $i = 1, \dots, n$, где n — число опорных точек зависимости. При логарифмировании выражения в этих опорных точках, оно преобразуется к линейной функции, параметры которой b и d рассчитывают методом наи-

меньших квадратов [9]. Будучи подставлены в полученное выше выражение, они полностью определяют искомую температурную зависимость.

Численный расчет в соответствии с предложенной методикой был выполнен для табличной зависимости вязкости от температуры для керосина [10]. Значения параметров составили для нее $b = 2548 \text{ K}$ и $d = 3,156$, а результаты аппроксимации отображены на рис. 7 (см. третью сторону обложки). Они показывают, что обобщенная аппроксимация обеспечивает лучшее приближение для табличной зависимости, чем аппроксимация по Андраде. Поэтому ее предполагается использовать в дальнейшем в составе модели износа.

Моделирование износа включает два этапа:

- параметризация модели по результатам калибровочного эксперимента;
- прогнозирование износа при заданных условиях и длительности.

Схема оптимальной параметризации модели отображена на рис. 8. В ходе калибровочного эксперимента на лабораторной установке осуществляли замеры минимального d и максимального D диаметров полосы износа измерительного элемента [7]. Для их обработки в программу вводили ряд параметров. Часть из них являлась параметрами квалификационных испытаний, к числу которых относились нагрузка используемой установки и время износа, характеристики измерительного элемента, характеристики смазывающего топлива, включая температуру, определяющую динамическую вязкость, кислотность и процентное содержание серы, кинематические параметры установки, определяющие скорость скольжения и др. Другая часть представляла собой параметры температурной зависимости для вязкости смазывающего топлива, описываемой ниже.

Первым этапом параметризации модели являлось формирование статистики критерия Vw по полученным измерениям и варьируемым значениям калибровочных параметров. Применяли следующую схему этого формирования. Параметры выбирали случайно в диапазонах $\delta \in (\delta_{mn}, \delta_{mx})$, $\beta \in (\beta_{mn}, \beta_{mx})$, $\gamma \in (\gamma_{mn}, \gamma_{mx})$. На этом этапе для каждого измерения максимального и минимального диаметров полосы износа, а также варьируемых параметров β , γ (коэффициенты при кислотности и содержании серы в функции So) и варьируемого параметра δ (коэффициента при So в функции fr) рассчитывают следующие величины:

- объемный износ ΔV с использованием функции $dV(D_0, D, d)$;
- глубина ΔL и полоса g с использованием функций ΔL и g ;
- число Зоммерфельда So для расчетной глубины износа ΔL с использованием функции So ;
- коэффициент граничного трения μ с использованием функции fr ;

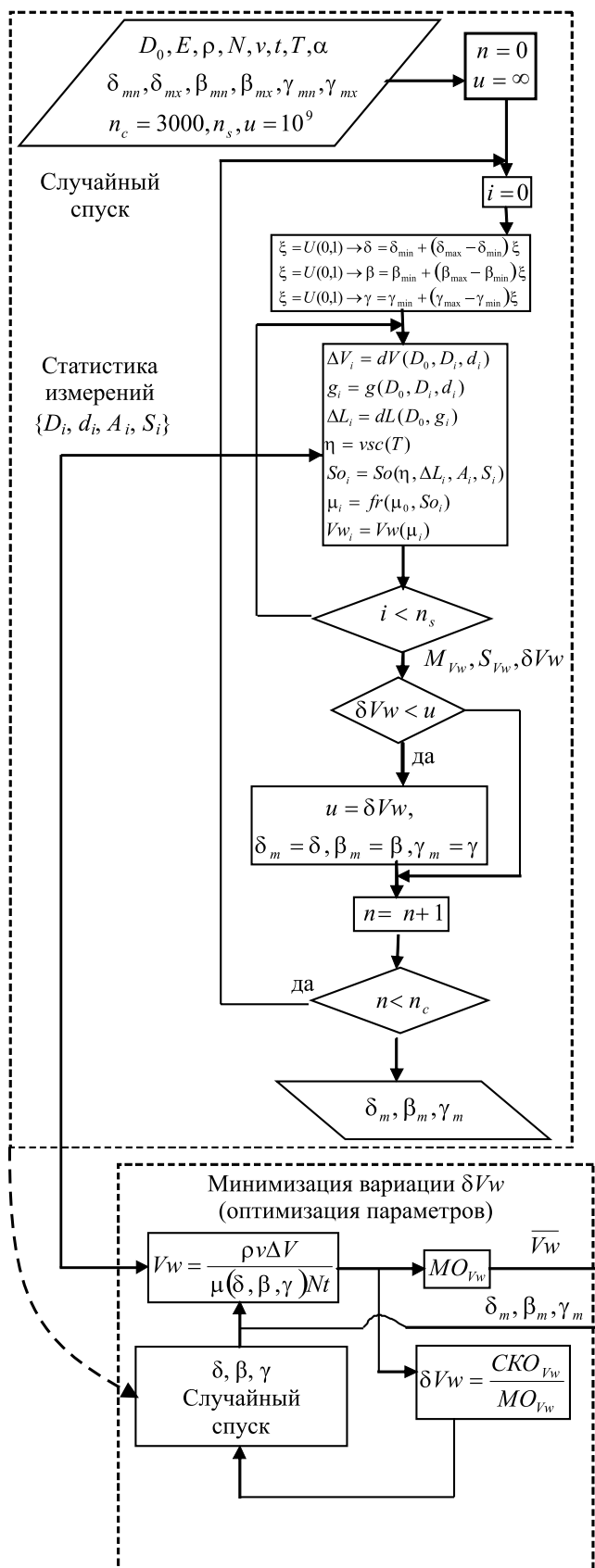


Рис. 8. Оптимальная параметризация

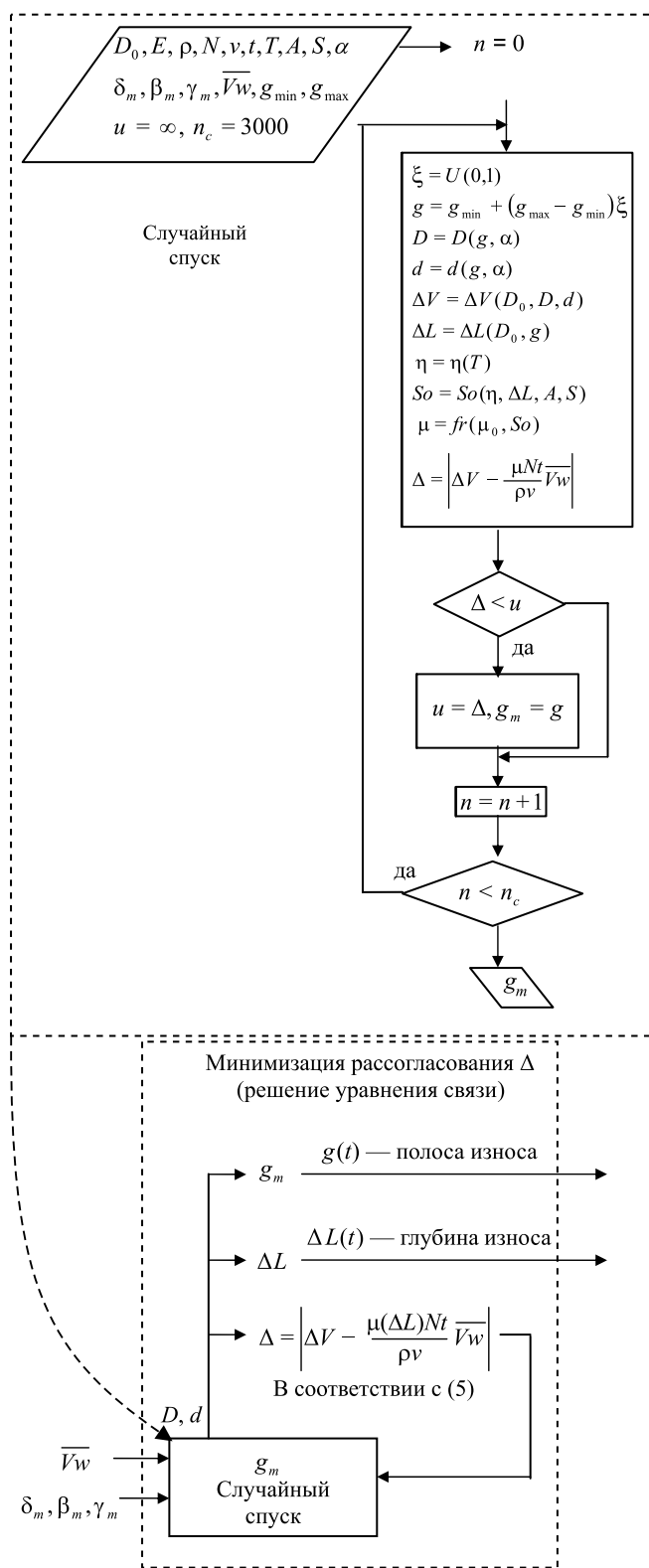


Рис. 9. Прогнозирование износа

- и, наконец, критерий объемного износа V_w с использованием функции V_w .

В совокупности расчетные значения V_w образуют статистику, используемую для расчета среднего значения M_{V_w} и СКО S_{V_w} критерия, а также для расчета вариации критерия $\delta V_w = M_{V_w}/S_{V_w}$ для выбранных значений параметров δ, β, γ . Оптимизация этих параметров осуществляется из следующих соображений. Поскольку критерий подобия можно рассматривать как инвариант критериальной модели, его вариация δV_w при должном выборе параметров должна быть минимальной. Таким образом, оптимальные параметры $\delta_m, \beta_m, \gamma_m$ представляют собой точку минимума вариации в пространстве этих параметров.

В ходе поиска точки минимума вариация δV_w , рассчитанная при текущих значениях параметров δ, β, γ , сравнивается с текущим значением минимума u . В случае если выполняется неравенство $\delta V_w < u$, корректируются текущие значения минимума $u = \delta V_w$ и точки минимума $(\delta_m, \beta_m, \gamma_m) = (\delta, \beta, \gamma)$. В качестве оценки точки минимума принимали значение, достигнутое к концу цикла. К числу параметров относилась также величина математического ожидания критерия подобия $\overline{V_w} = M_{V_w}$, соответствующая оптимальным параметрам $\delta_m, \beta_m, \gamma_m$.

После завершения обработки результатов калибровочного эксперимента возможен переход к прогнозированию износа в соответствии со схемой, приведенной на рис. 9. Этому предшествовал ввод в программу скорректированных значений параметров, а также значений кислотности и процентного содержания серы. Прогнозирование износа осуществляется на основе следующих соотношений:

$$\begin{cases} \Delta V_c = \frac{\mu N t}{\rho v} \overline{V_w}, \\ \mu = \mu_0 \exp(-\delta S_o(\beta, \gamma)), \\ S_o = \frac{\eta v}{E \Delta L (1 - \beta A + \gamma S)}. \end{cases} \quad (5)$$

В указанные соотношения подставляли параметры модели, выбранные на этапе параметризации. После этой подстановки первое соотношение (5) интерпретируется как уравнение связи между расчетным износом ΔV_c и прочими параметрами критерия. Это уравнение решали путем минимизации модуля рассогласования Δ между правой и левой частями уравнения для износа, результатом которой являются зависимости глубины износа $\Delta L(t)$ и полосы износа $g(t)$ от времени, которые интерпретируются как прогнозы износа.

Объемный износ ΔV в левой части уравнения (5), а также глубина износа ΔL , входящая в выражение для числа Зоммерфельда, являются в соответствии с (2), (3) функциями минимального d и максимального D диаметров полосы износа. При расчете этих диаметров в соответствии с рис. 6 считается, что перпендикуляр к плоскости шайбы в точке касания

шарика F совпадает с биссектрисой угла COD и $\arcsin \frac{D}{D_0} = \angle O_3 OD = \alpha + (\alpha - \alpha') = 2\alpha - \alpha'$.

Учитывая, что $\arcsin \frac{d}{D_0} = \alpha'$, получаем $\arcsin \frac{d}{D_0} + \arcsin \frac{D}{D_0} = 2\alpha$. Отсюда находим с учетом (3)

уравнения для максимального D и минимального d диаметров полосы износа:

$$\begin{cases} \arcsin \frac{D}{D_0} + \arcsin \frac{d}{D_0} = 2\alpha, \\ g = \frac{D-d}{2\cos\alpha}, \end{cases}$$

решения которых имеют следующий вид:

$$\begin{cases} D = D(g, \alpha) = \sin\alpha \sqrt{D_0^2 - g^2} + g\cos\alpha, \\ d = d(g, \alpha) = \sin\alpha \sqrt{D_0^2 - g^2} - g\cos\alpha. \end{cases}$$

Эти решения определяют объемный износ ΔV в соответствии с (2), глубину износа ΔL в соответствии с (3), и текущее рассогласование правой и левой частей первого уравнения (5). Для обеспечения минимальности этого рассогласования при заданных характеристиках пары трения и заданной длительности износа величина g в диапазоне $g \in (0, g_{\max})$ подбирается, как и ранее, методом случайного спуска. При этом согласно рис. 6 максимальное значение диапазона $g_{\max} = D_0 \sin\alpha$ соответствует длине хорды NN' , противолежащей центральному углу 2α . Как и ранее, условию $\Delta < u$ соответствует обновление текущего минимума $u = \Delta$ и текущей точки минимума $g_m = g$, а результатом минимизации считается достигнутое значение g_m .

Разработанная модель может быть использована для формирования квалификационных норм на основе соответствующих эксплуатационных требований. Примером такого требования является, например, ограничение на предельную глубину износа плунжера, которая по некоторым оценкам не должна превышать 150 мкм при длительности износа 1000 ч. В качестве примера реализации разработанной процедуры прогнозирования были рассмотрены прогнозы износа плунжера и измерительного элемента при предполагаемых характеристиках квалификационных испытаний. В перспективе это дает возможность оценить точность прогнозирования полосы износа путем сравнения с прямыми измерениями на лабораторной установке.

Для моделирования износа плунжера использовали следующие его характеристики:

- диаметр головки плунжера — 9 мм;
- удельная нагрузка — 60 атм;
- площадь контакта — 0,4 мм²;
- скорость скольжения — 0,1 м/с;
- интегральная нагрузка — 2,4 Н.

Таблица 1

Перевод твердости

Роквелл		Бринелль		Виккерс HV
HRC	HRA	Диаметр от- печатка, мм	НВ при нагрузке 300 кгс (3000 Н)	
72	89,0	2,20	782	1220
70	86,5	—	—	1076
69	86,0	2,25	744	1004
68	85,5	—	—	942
67	85,0	2,30	713	894
66	84,5	—	—	854
65	84,0	2,35	683	820
65	83,5	—	—	789
63	83,0	2,40	652	763
62	82,5	—	—	739
61	81,5	2,45	627	715
60	81,0	—	—	695
59	80,5	2,50	600	675
58	80,0	2,55	—	655
57	79,5	—	578	636
56	79,0	2,60	—	617
55	78,5	—	555	598
54	78,0	2,65	—	580
53	77,5	—	532	562
52	77,0	2,70	512	545
51	76,5	2,75	495	528
50	76,0	—	—	513
49	75,5	2,80	477	498
48	74,5	2,85	460	485
47	74,0	2,89	448	471
46	73,5	2,92	437	458
45	73,0	2,96	426	446
44	72,5	3,00	415	435
42	71,5	3,08	393	413
40	70,5	3,16	372	393
38	—	3,25	352	373
36	—	3,34	332	353

Твердость материала головки плунжера и измерительного шарика по Роквеллу принимали равной 65 HRC и переводили в твердость по Бринеллю, используемую в расчетах, в соответствии с табл. 1 (<http://promot Reid.ru/promot Reidte hinfo/pro->

mot Reidtv/). Были также использованы следующие характеристики топлива:

- марка топлива ТС-1, ГОСТ 10227—86;
- плотность 789,3 кг/м³;
- кислотность $A = 0,12$ мг KOH на 100 см³ топлива;
- массовое содержание серы $S = 0,131$ %.

Считается, что при равных удельных нагрузках интегральная нагрузка плунжера пропорциональна квадрату кривизны головки, т. е. связана с эквивалентной нагрузкой лабораторной установки соот-

ношением $\frac{N_p}{D_p^2} = \frac{N}{D_0^2}$, где D_0 , D_p — диаметры изме-

рительного шарика и головки плунжера. Используя это соотношение, можно оценить нагрузку лабораторной установки, соответствующую нагрузке плунжера. В частности, диаметру шарика 0,0127 м соответствует эквивалентная нагрузка 5 Н, диаметру шарика 0,02 м — эквивалентная нагрузка 12 Н, диаметру шарика 0,0254 м — эквивалентная нагрузка 20 Н. Прочие параметры установки приведены ниже.

Время износа, ч.	1...2000
Скорость скольжения, м/с.	0,1
Твердость по Роквеллу, HRC.	65
Температура эксперимента, °С.	50
Наклон оси измерительного шарика, °.	10
Диаметр измерительного шарика, м.	0,0127, 0,02, 0,0254
Диаметр измерительной шайбы, м.	0,04

Результаты прогнозирования износа головки плунжера и измерительных шариков лабораторной установки при эквивалентных интегральных нагрузках приведены в табл. 2. Их анализ показывает, что значение износа при его длительности 1000 ч не превышает 150 мкм, т. е. приблизительно соответствуют принятой норме на глубину износа. Непосредственно измеряемыми в квалификационном эксперименте являются значения полосы износа, соответствующие времени эксперимента 1 ч и выделенные жирным шрифтом. Их и предлагается принять в качестве квалификационных норм.

Таблица 2

Прогноз износа

Длительность износа, ч	Головка плунжера 9 мм, нагрузка 2,4 Н		Измерительный шарик 25,4 мм, нагрузка 20 Н		Измерительный шарик 20 мм, нагрузка 12 Н		Измерительный шарик 12,7 мм, нагрузка 5 Н	
	Полоса износа, мм	Глубина износа, мкм	Полоса износа, мм	Глубина износа, мкм	Полоса износа, мм	Глубина износа, мкм	Полоса износа, мм	Глубина износа, мкм
1	0,103787708	0,418934067	0,481958376	3,201326953	0,334684965	1,960514507	0,165700963	0,756746846
10	0,211691787	1,743216526	0,88991219	10,91918178	0,638557862	7,139300369	0,347980739	3,338370932
100	0,395137643	6,077614133	1,606386496	35,62772519	1,157857863	23,49976628	0,631988932	11,02075143
500	0,629624082	15,45373496	2,570376129	91,50051128	1,849088861	60,08750385	1,021586202	28,8534614
1000	0,793290775	24,56706062	3,23898011	145,7314957	2,311904594	94,15637958	1,281182564	45,46408208
2000	1,000089138	39,13405145	4,086386861	233,0929288	2,934410055	152,3122735	1,605194581	71,5747638

Выводы

1. Виртуализация квалификационных испытаний базируется на использовании математического моделирования процесса испытаний, в частности, с применением методов теории подобия, и решает следующие основные задачи:

- экстраполяция результатов квалификационных испытаний на штатные условия эксплуатации;
- обратный пересчет эксплуатационных условий в адекватные параметры квалификационных испытаний;
- формирование квалификационных норм по результатам прогнозирования эксплуатационных характеристик.

2. С использованием алгебраических методов теории подобия были синтезированы критерии химической стабильности жидкости в гидростатических условиях — критерии геометрического, термодинамического и кинетического подобия. Эти критерии, с одной стороны, позволили установить параметры квалификационных испытаний, адекватные условиям эксплуатации. С другой стороны, на их основе анализируется влияние изменений условий проведения эксперимента на корректность прогнозирования эксплуатационных характеристик.

3. Предложена методика оптимизации состава жидкофазной смеси с использованием результатов факторных экспериментов для предварительной калибровки линейно-регрессионных моделей характеристик смеси. Собственно оптимизация осуществляется расчетным путем с использованием откалброванных моделей характеристик и численным варьированием состава смеси методом Монте-Карло или прямого перебора.

4. При исследовании фрикционного износа плунжерной пары алгебраический подход был использован для построения критерия объемного износа. Оптимальная параметризация данной критериальной модели базировалась на интерпретации критерия износа как инварианта, а оптимальных параметров — как точки минимума вариации кри-

терия. При этом соотношение, связывающее критерий объемного износа и его расчетное значение с минимальной вариацией, интерпретировалось как уравнение связи между значением износа и прочими параметрами критерия, включая время износа.

5. Построенное уравнение связи используется для прогнозирования значения износа в заданных условиях и для различных сроков эксплуатации. Результаты прогнозирования предложено использовать для формирования квалификационных норм износа на основании эксплуатационных ограничений на глубину износа при заданной длительности последнего. С помощью критериальной модели рассчитывалась ширина полосы износа измерительного элемента при заданной длительности эксперимента, которую в перспективе предлагается принять в качестве квалификационной нормы при проведении испытаний.

Список литературы

1. **ГОСТ 16504—81.** Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1991.
2. **Kline S.** Similitude and approximation theory. Berlin — Heidelberg: Springer, 1986. 229 p.
3. **Barenblatt G.** Scaling, self-similarity and intermediate asymptotics. Cambridge: Cambridge university press, 1996. 383 p.
4. **Моисеев А. А.** Моделирование химической стабильности методом теории подобия // Информационные технологии. Том 21, № 9. 2015. С. 666—669.
5. **Ахназарова С. Л., Кафаров В. В.** Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высшая школа, 1985. 327 с.
6. **Моисеев А. А.** Критериальная модель квалификационных испытаний на износ // Инженерная физика. 2015. № 12. С. 30.
7. **Никитин И. М., Кондратенко В. В., Баевский Д. Ф.** Сравнительная оценка определения противоизносных свойств отечественных реактивных топлив на установке BOCLE и приборе ПСТ — 2 // Труды ГОСНИИ химмотологии. М.: Перо, 2014. Вып. 56. С. 175.
8. **Reid R., Prausnitz J., Sherwood T.** The properties of gases and liquids. NY: McGraw-Hill, 1977. 592 p.
9. **Линник Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 336 с.
10. **Физические величины:** справочник / под ред. И. С. Григорьева и Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

A. A. Moiseev, PhD, Senior Researcher, slow.coach@yandex.ru, State Research Institute of Chimmotology

Criteria Modeling in Virtualization of Qualification Tests

Considered the methods of qualification tests virtualization on the base of criteria models application. Their effectiveness demonstrated by the example of chemical stability description at hydrostatic conditions, liquid-phase mixture composition optimization and plunger piston friction wear. Chemical stability modeling used for determination of qualification tests conditions. This modeling performed by means of similarity criteria building: geometrical, thermodynamic and kinetic ones. These criteria allowed setting qualification tests conditions which are similar to real conditions of liquid chemical transformation and also qualification test durability. Developed procedure of liquid-phase mixture composition optimization based on mixture characteristics presentation in form of linear regression from mixture combination. This optimization based on mixture components fractions variation. At friction wear modeling were proposed rational methods of tests conditions choice and also optimization and forecasting methods for plunger wear characteristics in these conditions. It was proposed also to use these results for qualification standards formation.

Keywords: qualification tests, semi-natural experiment, virtualization, physical model, criteria model, qualification standards, chemical transformation, Arrhenius equation, linear regression

References

1. **GOST 16504—81.** Ispytaniya i control kachestva produktsii. Osnovnye terminy i opredeleniya. (Testing and control of production quality. Base terms and definitions), Moscow, Publishing House of standards, 1991.
2. **Kline S.** Similitude and approximation theory, Berlin — Heidelberg, Springer, 1986, 229 p.
3. **Barenblatt G.** Scaling, self-similarity and intermediate asymptotic, Cambridge: Cambridge university press, 1996. 383 p.
4. **Moiseev A.** Modelirovaniye chimicheskoy stabilnosti metodom teorii podobiya (Similarity relations in chemical stability analysis), *Informacionnye technologii*, vol. 21, no. 9, 2015, pp. 666—669.
5. **Achnazarova S., Kafarov V.** Metody optimizatsii experimenta v chimicheskoy technologii (Experiments optimization methods in chemical technology), M., Vysshaya skola, 1985, 327 p.
6. **Moiseev A.** Kriteriynaya model kvalifikatsionnykh ispytaniy na iznos (Criteria model of wear qualification tests), *Ingenernaya fizika*, 2015, no. 12, p. 30.
7. **Nikitin I., Kondratenko V., Baevskiy D.** Sravnitel'naya otsenka opredeleniya protivoznosnykh svoystv otechestvennykh reaktivnykh topliv na ustanovke BOCLE i pribore ПСТ — 2 (Comparative estimation of antiwear properties for domestic jet — fuel using BOCLE and ПСТ — 2 plants), *Trudy GOSNII himmotologii* (Proceedings of State institute of himmotology), Moscow, Pero ("Pen"), 2014, issue 56, p. 175.
8. **Reid R., Prausnitz J., Sherwood T.** The properties of gases and liquids, NY, McGraw-Hill, 1977, 592 p.
9. **Linnik Yu.** Method naimenshich kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy obrabotki nabludeniy (Least square method and fundamentals of observations mathematical-statistical processing), M., publisher "Fizmatgiz", 1958, 336 p.
10. **Fizicheskiye velichiny: spravochnik** (Physical values: reference book), ed. by I. Grigor'ev, E. Meilichov, Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p.

УДК 621.039.546

Е. П. Доморацкий, д-р техн. наук, проф., e-mail: Domorackiy.E@mfua.ru
Московский финансово-юридический университет МФЮА,
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва

Алгоритм синтеза геометрических характеристик проекционных изображений трехмерных объектов

Рассмотрен алгоритм синтеза геометрических характеристик одномерных и двумерных проекционных изображений выпуклых трехмерных объектов неправильной формы, аппроксимируемых эллипсоидом общего вида. Алгоритм содержит математические модели последовательности операций (процедур) получения проекционных изображений, их морфологического анализа (получения базовых геометрических признаков) и получения численных значений пространственных геометрических характеристик проекционных изображений.

Ключевые слова: алгоритм, синтез, геометрические характеристики, объект, проекционное изображение, математическая модель, аппроксимация, эллипсоид, базовые признаки

Введение

В настоящее время в различных областях науки, техники и практики широко применяются методы и средства определения геометрических характеристик разного рода объектов, основанных на различных физических принципах. К их числу относятся томографические, оптикоэлектронные, телевизионные, радиографические и другие методы. Все эти методы базируются на получении, обработке, анализе и синтезе различного рода одномерных и двумерных проекционных изображений объекта [1—3].

Постановка задачи (цель работы)

Данная работа относится к области морфологической обработки изображений, и ее цель заключается в синтезе (разработке) математических моделей последовательности операций (процедур) получения и преобразования исходного (синтаксического)

проекционного изображения выпуклого трехмерного объекта неправильной формы в семантическое (смысловое) изображение путем выбора и определения его оптимальных базовых геометрических признаков и получения на этой основе прагматического изображения, т.е. численных значений геометрических характеристик размеров и формы одно- и двумерных проекционных изображений объекта [4, 5].

Описание процедур алгоритма синтеза

Алгоритм синтеза включает следующие операции (этапы).

1. Выбор математической модели, аппроксимирующей выпуклый трехмерный объект неправильной формы, и геометрических характеристик его размеров и формы.