

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 590.17:620.162

МЕТОДЫ ВИРТУАЛИЗАЦИИ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2019 г. А. А. Моисеев\*

НПП “Технос-РМ”, Мытищи, 141002, Россия

\*e-mail: slow.coach@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.04.2019 г.

После доработки 31.08.2019 г.

Принята к публикации 17.09.2019 г.

Квалификационные испытания интерпретируются как частный случай полунатурного эксперимента, в котором лабораторная установка играет роль физической модели системы, включающей исследуемый объект. В этих условиях виртуализация представляет собой переход от физических к математическим моделям системы и объекта и допускает виртуальную квалификацию, т.е. реализацию квалификационных испытаний в виде численного эксперимента. Виртуализация позволяет, в частности, осуществить экстраполяцию лабораторных результатов на штатные условия эксплуатации, а также обратный пересчет этих условий в адекватные параметры квалификационного эксперимента. Эффективность виртуализации продемонстрирована на примерах оптимизации математических моделей, совершенствования квалификационных экспериментов и прогнозирования их результатов, а также использования критериальных моделей для адекватной параметризации квалификационных экспериментов по эксплуатационным характеристикам. Для проведения виртуальной квалификации синтезированы модели двигателя внутреннего сгорания, предназначенные для исследования влияния химмотологических и трибологических факторов на динамику двигателя и его КПД. Они основывались на соотношении для баланса мощности двигателя и отличаются методом имитации давления в цилиндре. Учет трения в рамках моделей базировался на аппроксимации кривой Герси–Штрибека и ее использовании для расчета коэффициента смешанного трения в зависимости от числа Зоммерфельда. На основе анализа противоизносных свойств смазывающего топлива построена критериальная модель объемного износа, предназначенная для прогнозирования величины последнего при заданных условиях. Синтезированной таким образом критериальную модель было предложено использовать для прогнозирования износа в экстремальных условиях и формирования соответствующих квалификационных нормативов. Для аппроксимации плотности нефтепродуктов было предложено использовать модельно-ориентированную идентификацию. С этой целью построен модифицированный алгоритм оценки плотности углеводородов, базирующийся на использовании закона соответственных состояний. В отличие от традиционного алгоритма, основанного на использовании таблиц корреляций, в модифицированном алгоритме используется представление плотности в виде степенной функции приведенных температуры и давления. Показано, что для легких алканов модифицированный алгоритм обеспечивает лучшую точность в сравнении с традиционным.

*Ключевые слова:* квалификационные испытания, полунатурный эксперимент, численный эксперимент, физическая модель, виртуализация, виртуальная квалификация, критериальная модель, кривая Герси–Штрибека, число Зоммерфельда, противоизносные свойства, квалификационные нормативы, идентификация, алканы, закон соответственных состояний, фактор сжимаемости

**DOI:** 10.1134/S2304487X19060051

Обычной целью математического моделирования технологических процессов является прогнозирование протекания этих процессов в различных условиях, в том числе — не охватываемых натурным экспериментом. К подобной модели обычно предъявляются два основных требования — универсальности и адекватности. Универсальность позволяет использовать модель в широком диапазоне внешних условий, в том числе — в со-

ставе моделей более высокого уровня. Адекватность обеспечивает соответствие модели конкретным условиям проведения эксперимента. Указанные требования определяют типичную структуру модели. В основу последней закладывается в качестве каркаса базовая модель, описывающая процесс в общих чертах. Адекватность при этом обеспечивается в ходе параметризации модели по результатам сравнения с калибровоч-

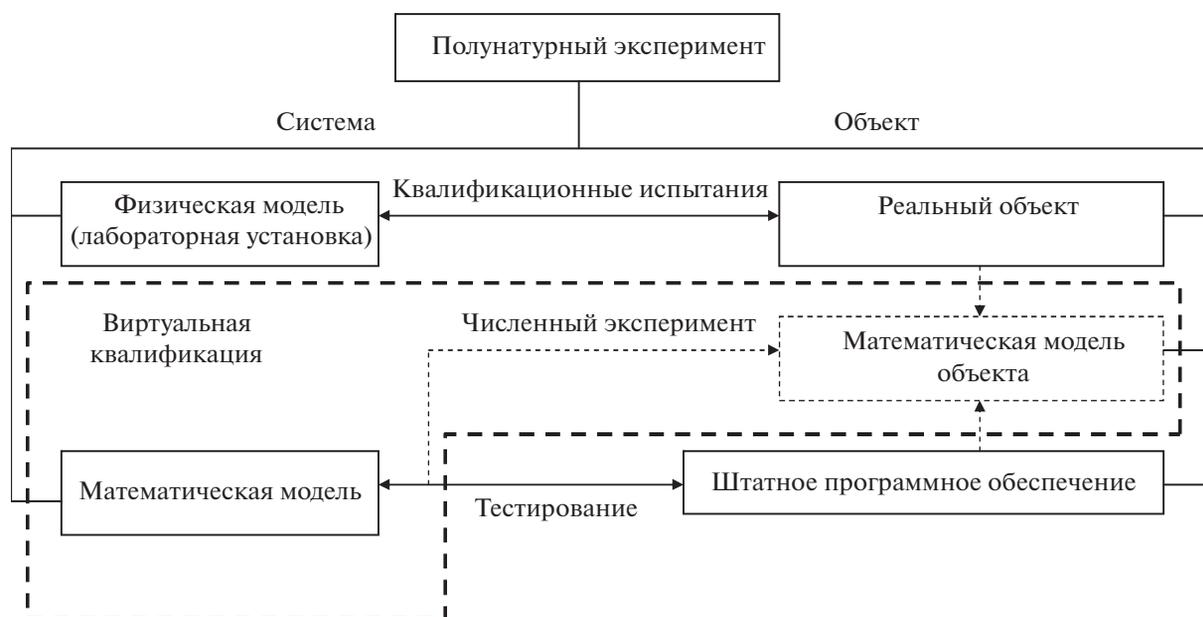


Рис. 1. Виртуальная квалификация.

ными экспериментами. Это обуславливает основные требования к интерфейсу модели – наряду со входами, определяющими условия проведения численного эксперимента, она включает предварительно настраиваемые калибровочные параметры. Полнота и непротиворечивость системы этих параметров определяют адекватность модели и обеспечиваются в ходе ее идентификации.

Являясь прикладной дисциплиной, химмотология предполагает существенный примат экспериментальных методов исследования, реализуемых в форме квалификационных испытаний объекта. Вместе с тем, как указывалось выше, построение базовой модели охватывающих системы или процесса осуществляется в рамках теоретических, главным образом физико-химических исследований. В свою очередь адекватная настройка этих моделей осуществляется по результатам квалификационных испытаний. Главной особенностью последних является то, что их основным методом является лабораторное исследование объекта, который в принципе ничем не будет отличаться от эксплуатируемого [1]. Лабораторную установку в этих условиях можно рассматривать как физическую модель системы, охватывающей объект. В этом смысле квалификационные испытания являются частным случаем более широкого понятия полунатурного эксперимента, в рамках которого охватывающая модель или ее часть может быть реализована как математическая. В этих условиях адекватную математическую модель системы, охватывающей

объект, можно интерпретировать как некую виртуальную реальность, а численный эксперимент в составе полунатурного – как виртуальную квалификацию. При этом натурные эксперименты, проводимые в рамках обычных квалификационных испытаний, могут выступать как средство идентификации создаваемых математических моделей [2].

Место виртуальной квалификации в составе полунатурного эксперимента отображено на рис. 1. Математическая модель объекта строится на основе его описания и может взаимодействовать со штатным программным обеспечением в случае управляемости объекта. В свою очередь, математическая модель охватывающей системы строится на основе ее описания и может реализовывать функции, не реализуемые физической моделью. Виртуальная квалификация осуществляется в ходе численного эксперимента с математическими моделями объекта и системы. При этом решаются две основные задачи:

- сравнительная идентификация математических моделей в условиях, обеспечиваемых физической моделью – лабораторной установкой;
- предварительная отладка штатного программного обеспечения в случае управляемости объекта.

Примером применения такого общего подхода является моделирование двигателя внутреннего сгорания, отображенное в работах [3, 4]. Первая из них посвящена созданию упрощенной математической модели двигателя внутреннего сгорания, предназначенной для моделирования влия-

ния химмотологических процессов на динамику двигателя, его КПД и смазочную способность используемых масел. Модель позволяет проводить численные эксперименты, воспроизводящие отдельные этапы стендовых испытаний. В перспективе, как предполагается, это позволит заменить проведение однотипных натуральных экспериментов их численными аналогами, что обеспечит экономию времени и средств.

Для идентификации модели использовались результаты квалификационных испытаний на установке ИМ-1, проводимых в соответствии с ГОСТ 20303-74. Поэтому считается, что виртуальный двигатель в составе модели нагружен на имитатор асинхронной машины, а потери на трение в двигателе описываются в зависимости от износа цилиндро-поршневой группы и степени ее загрязнения в рамках модели Герси–Штрибека. Эти факторы влияют на коэффициент трения пары поршень–цилиндр, а также на величину зазора между поршнем и стенкой цилиндра и, следовательно, на величину смешанного трения. Упрощенная модель базируется на соотношении баланса мощности и нагрузки двигателя, нагруженного на асинхронную машину в генераторном режиме. В нормализованной форме уравнение баланса имеет вид:

$$T \frac{du}{dt} = \pi \sqrt{u} - \pi_{fr} \sqrt{u} - n_0 (\sqrt{u} - 1) \max(1, \sqrt{u}), \quad (1)$$

где  $u = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2$  – нормированный квадрат частоты,

$\pi = \frac{p}{p_0}$  – нормированное давление в цилиндре,

$\pi_{fr} = \frac{p_{fr}}{p_0}$  – нормированное напряжение трения,

$T = \frac{J \omega_0^2}{2N_0}$  – характерное время разгона,

где  $J$  – момент инерции кривошипа;

$\omega, \omega_0$  – текущая и номинальная циклическая частота;

$p$  – давление в цилиндре, Па;

$p_{fr}$  – напряжение трения, Па.

Общая схема модели приведена на рис. 2. По существу, это схема реализации решения уравнения (1) с возможностью варьирования мощности двигателя и синхронной частоты. Основной особенностью модели является то, что для описания динамики давления в цилиндре используется индикаторная диаграмма двигателя. Последняя представляет собой зависимость давления в двигателе от смещения поршня на различных тактах двигателя. Этим тактам соответствуют различные диапазоны угла поворота кривошипа (коленчато-

го вала), который является дополнительным входом индикаторной диаграммы. В модели индикаторная диаграмма реализована в виде линейных интерполяторов давления в зависимости от положения поршня, соответствующих различным тактам двигателя и выбираемых по величине угла поворота кривошипа. Как правило, индикаторная диаграмма соответствует номинальной мощности двигателя. Для учета возможной неомонотонности используется регулируемый мультипликативный фактор  $g$ , имеющий смысл степени открытия виртуального дросселя подачи. Этот фактор формируется имитатором подачи, основой которого является встроенный PID регулятор мощности. Нормированная нагрузка  $n_l$  двигателя связана с номинальной  $n_0$  соотношением  $n_l = n_0 \max(1, \sqrt{u})(\sqrt{u} - 1)$ . В свою очередь номинальная нагрузка формируется имитатором динамического тормоза, основой которого является регулятор синхронной частоты. Нормированная мощность потерь определяется нормированным моментом трения  $\pi_{fr}$ .

Дальнейшее развитие упрощенной модели осуществлялось в направлении совершенствования имитации процессов в двигателе. В работе [4] исследовалась многофункциональная модель двигателя внутреннего сгорания, объединяющая субмодели основных подсистем двигателя. К их числу относятся:

– модель внутреннего смесеобразования, определяющая характеристики горючей смеси;

– модели тепловыделения и газообмена в цилиндре, имитирующие тактовые процессы в двигателе;

– модель кривошипно-шатунного механизма, связывающая процессы в двигателе с внешними воздействиями.

Общая схема модели приведена на рис. 3. Ее входами являются положения воздушного дросселя, топливного дозатора, а также передаточное число редуктора, связывающего ходовую ось с коленчатым валом. Эти входы естественным образом интерпретируют органы управления двигателем. Модель также может включать вспомогательные субмодели, предназначенные, в частности, для имитации состава выхлопа и охлаждения двигателя. Первая из них базируется на упрощенной системе кинетических уравнений цепного процесса в квазистационарном приближении. Она позволяет имитировать динамику состава выхлопа в виде временных зависимостей молярных долей его компонент. Разработанная методика может быть использована при прогнозировании состава выхлопа для различных цепных процессов с установленной последовательностью сопряженных реакций. Модель охлаждения ос-

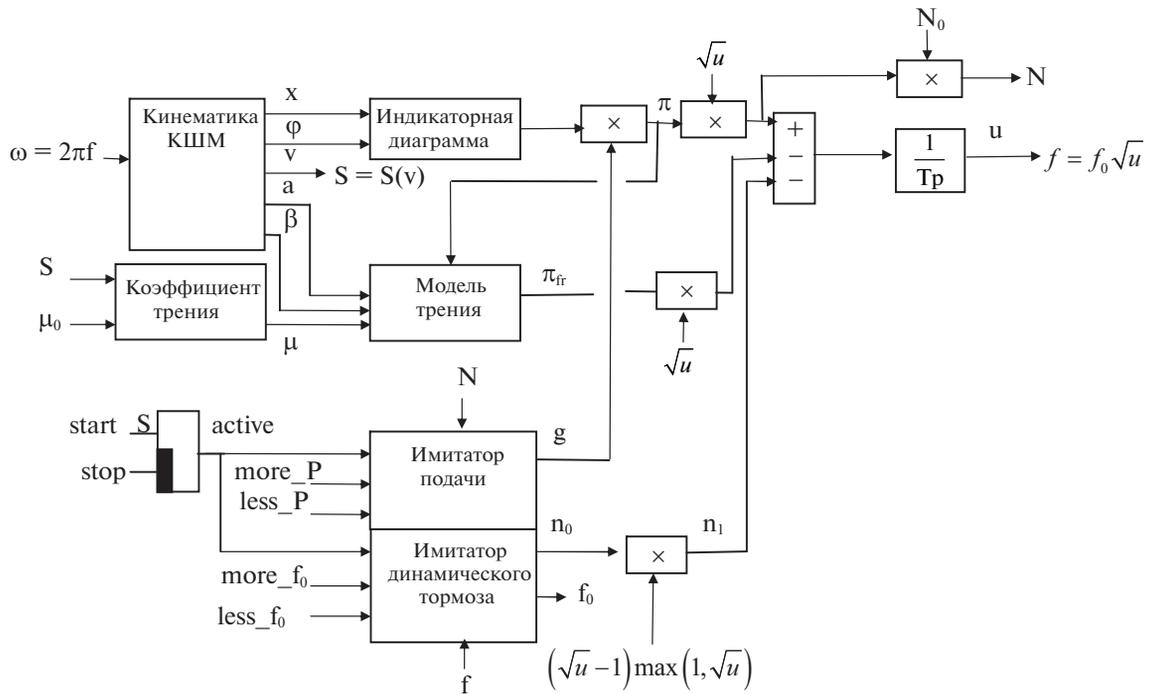


Рис. 2. Общая схема упрощенной модели двигателя.

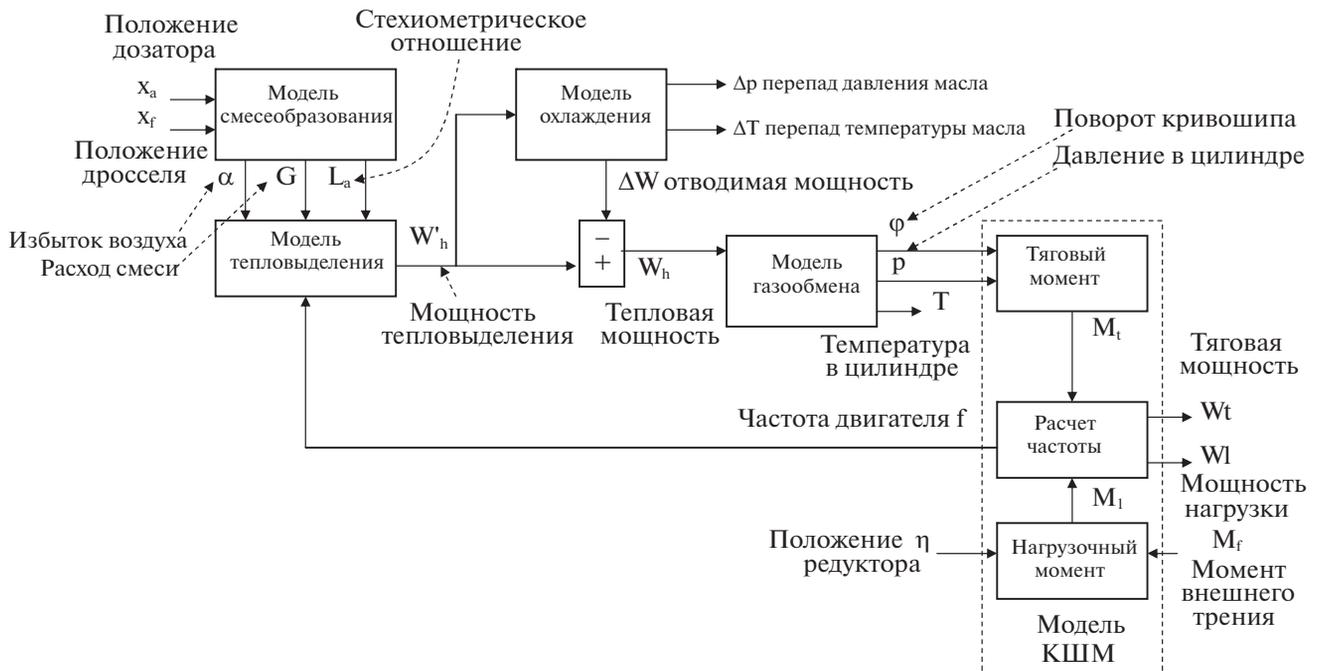


Рис. 3. Схема многофункциональной модели.

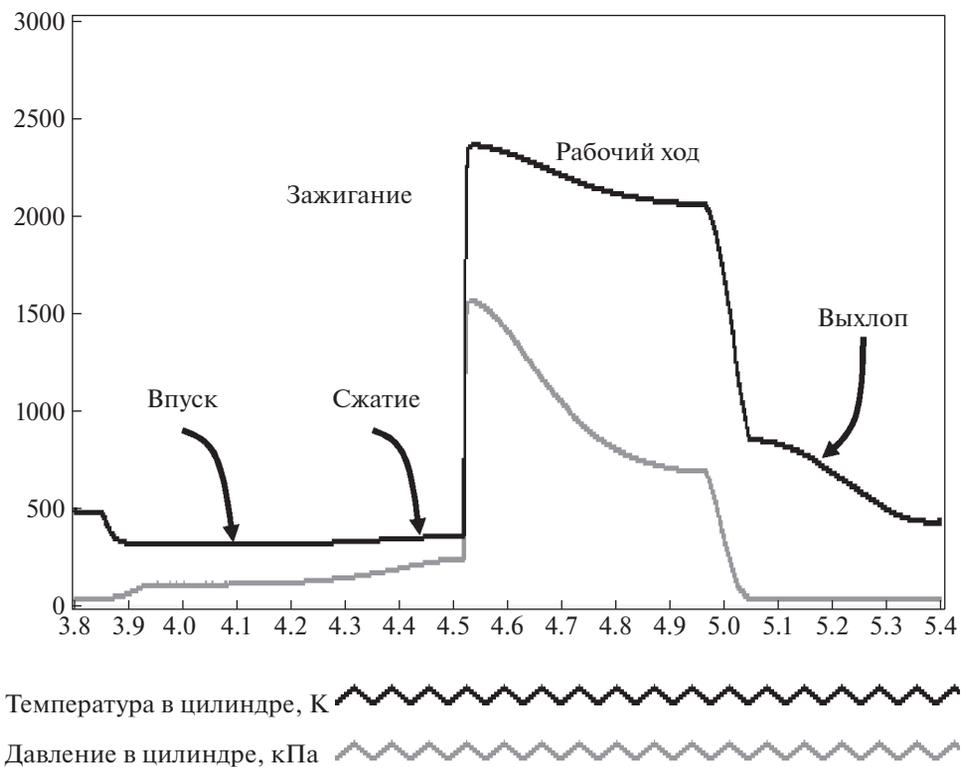


Рис. 4. Цикл без самовоспламенения.

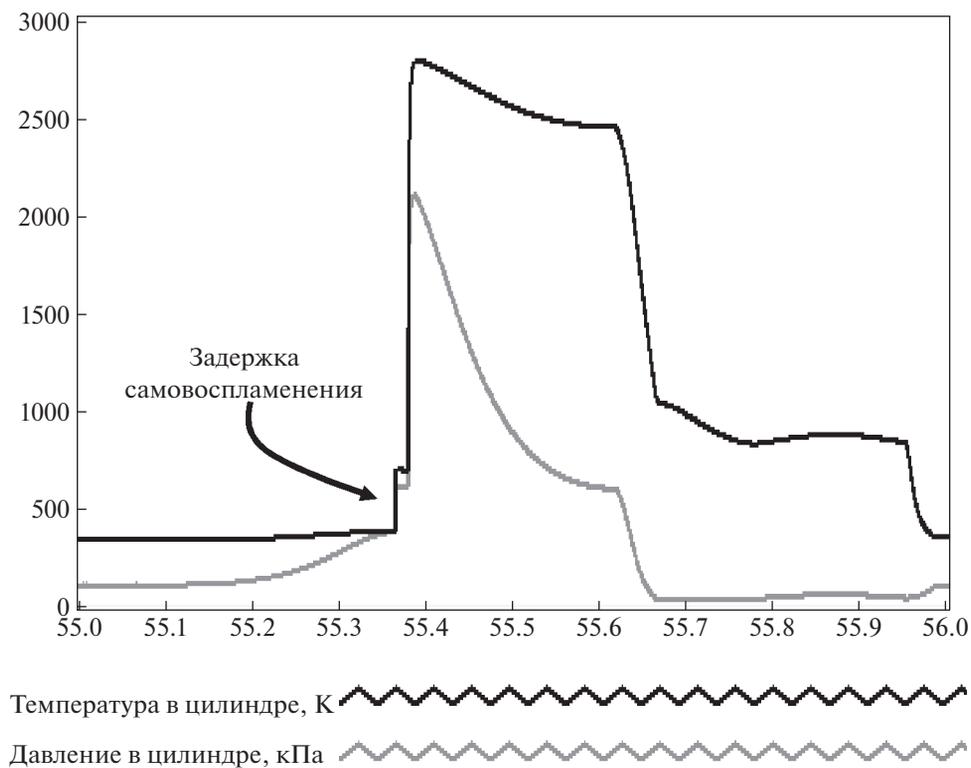


Рис. 5. Цикл с самовоспламенением.

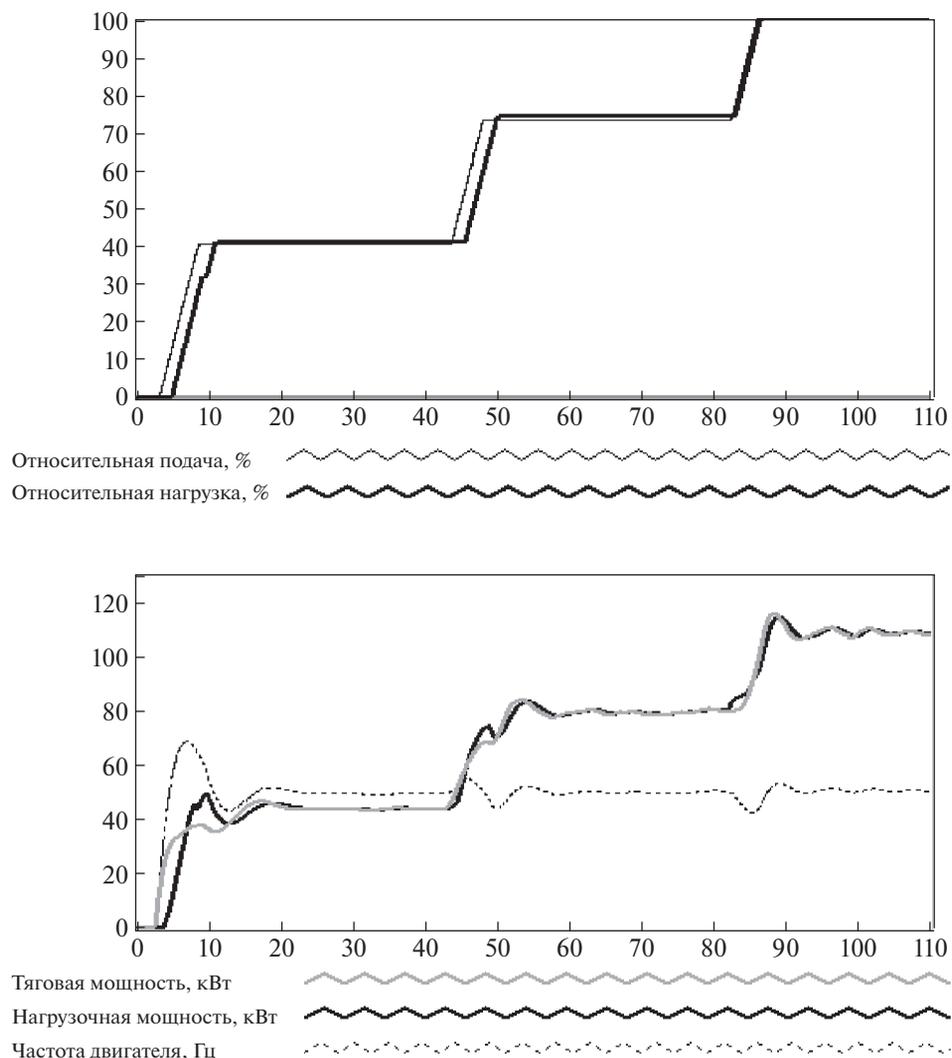


Рис. 6. Ступенчатое нагружение двигателя.

новывается на разработанной методике расчета гидравлических цепей. В этом расчете линейные регуляторы используются как численные решатели нелинейных уравнений Кирхгофа для баланса расходов и перепадов давления. Данная методика менее трудоемка, чем традиционно используемые, и применима при квазистационарных изменениях параметров гидравлической цепи. Двигатель в рамках данной модели интерпретируется как теплообменник.

Имитируемая динамика давления и температуры газа в цилиндре в соответствии с фазами газообмена отображена на рис. 4 для цикла без самовоспламенения и на рис. 5 для цикла с самовоспламенением. Построенная модель использовалась также для имитации основных процессов в двигателе. Результаты симуляции ступенчатого нагружения дви-

гателя приведены на рис. 6. Относительная нагрузка при этом увеличивалась с некоторой временной задержкой относительно подачи. В ходе регулирования имитируемая частота двигателя стабилизировалась на номинальном уровне, а тяговая и нагрузочная мощности выравнивались. Таким образом, был продемонстрирован эффект саморегулирования частоты двигателя при изменении нагрузки.

Результаты принудительного регулирования частоты двигателя отображены на рис. 7. Уставкой регулятора была номинальная частота двигателя, а выходом — величина относительной подачи. В исходном состоянии величина относительной нагрузки была нулевой. После включения регулятора величина уставки по частоте увеличивалась до номинальной частоты. Дополни-

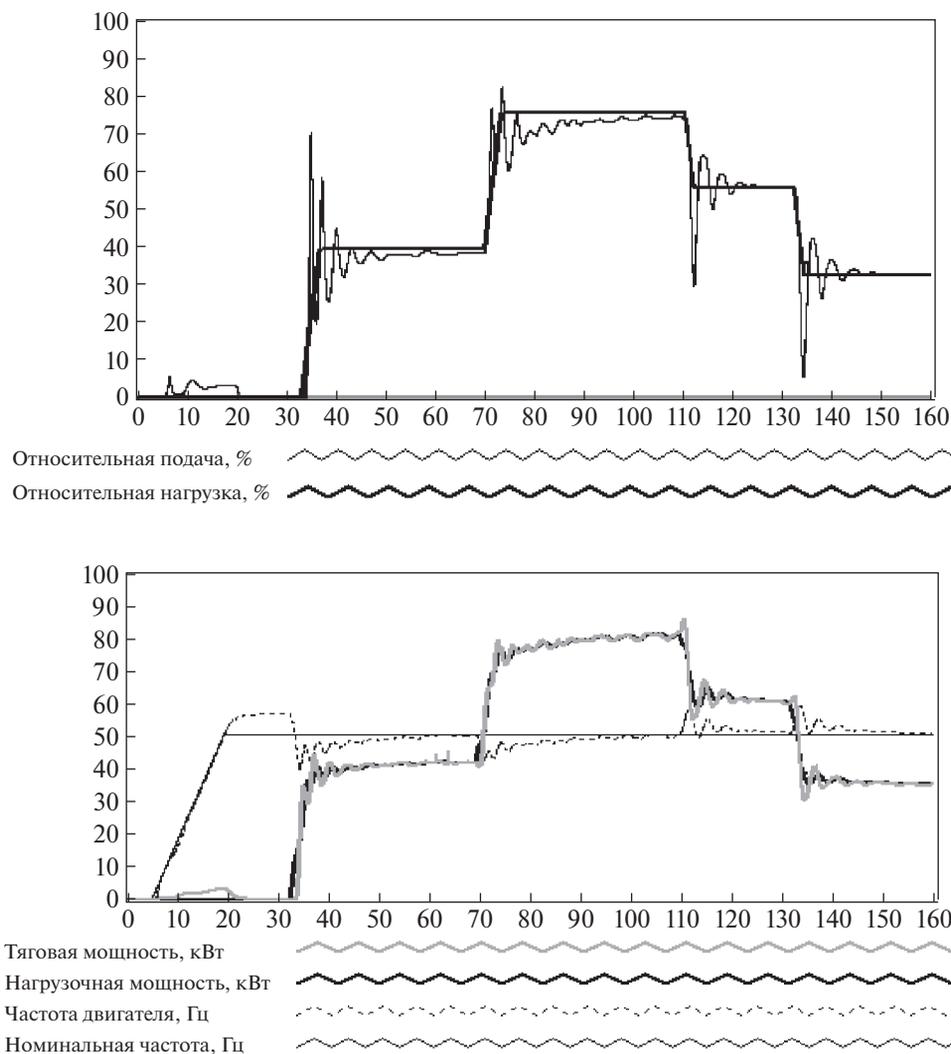


Рис. 7. Регулирование частоты двигателя.

тельное увеличение нагрузки приводило к соответствующему увеличению подачи под действием регулятора. Текущая частота при этом стабилизировалась на номинальном уровне, а тяговая и нагрузочные мощности выравнивались. Качественный анализ имитируемой динамики показывает, что в целом модель адекватно отображает процессы в двигателе и может быть использована для исследования влияния характеристик ГСМ на процессы в цилиндре.

Важным аспектом применения виртуальной квалификации является экстраполяция лабораторных результатов на штатные условия эксплуатации исследуемого объекта. В качестве примера такой экстраполяции можно привести прогнозирование объемного износа головки насосного

плунжера с учетом противоизносных свойств смазывающего топлива [5–8].

В качестве критерия подобия между лабораторной установкой и исследуемым плунжером был выбран критерий объемного износа, отображенный на рис. 8. Его физический смысл – отношение импульса износного материала к импульсу силы трения. Критерий включает плотность износного материала, скорость скольжения и нормальное давление во фрикционном контакте, а также длительность износа. Коэффициент граничного трения определяется коэффициентом сухого трения и числом Зоммерфельда. Принималось, что число Зоммерфельда помимо вязкости, скорости скольжения и твердости зависит также от кислотности А смазывающей среды и процентного содержания в ней серы S.

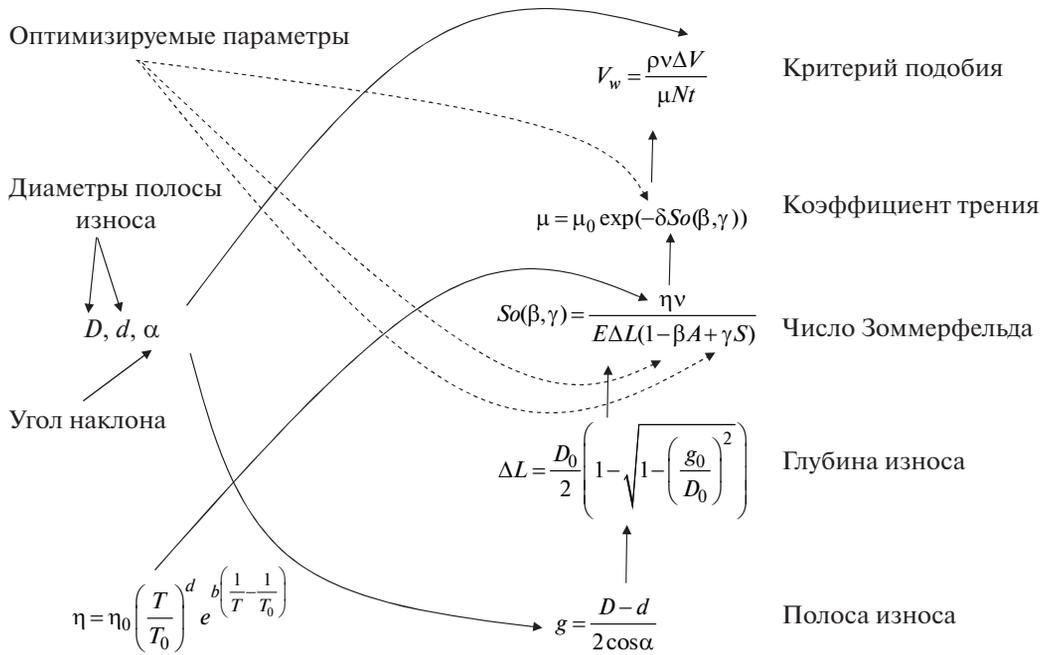


Рис. 8. Критерий объемного износа.

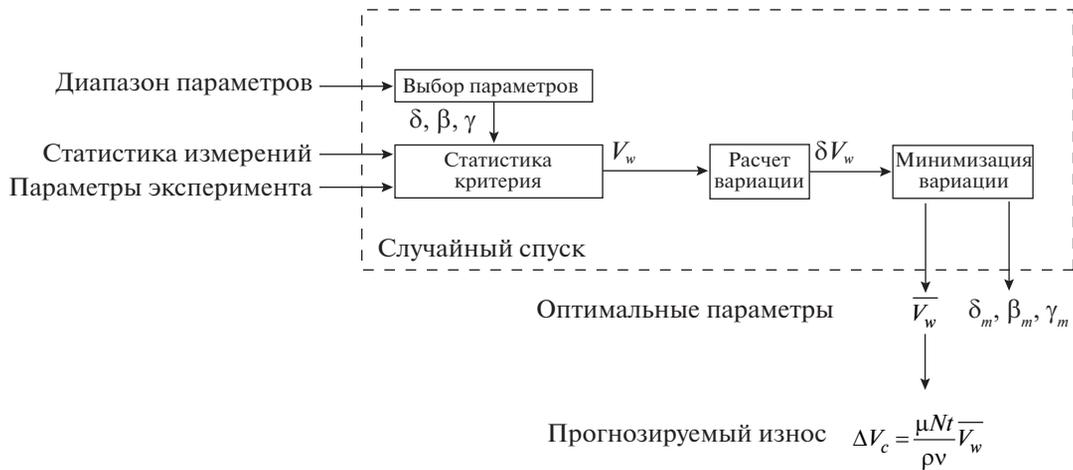


Рис. 9. Оптимальная параметризация.

Величина зазора во фрикционном контакте принималась равной глубине износа и определялась диаметром шарообразного измерительного элемента и величиной полосы износа. Учитывалась также температурная зависимость вязкости в соответствии с модифицированным соотношением Андраде. Объемный износ и полоса износа определялись максимальным и минимальным диаметрами полосы износа измерительного эле-

мента, наблюдаемыми в эксперименте, а также углом наклона оси этого элемента к плоскости фрикционного контакта. Параметрами модели являлись коэффициент при числе Зоммерфельда в выражении для коэффициента граничного трения, а также коэффициенты при кислотности и процентном содержании серы.

Схема оптимальной параметризации этой модели отображена на рис. 9. Ее первым этапом яв-

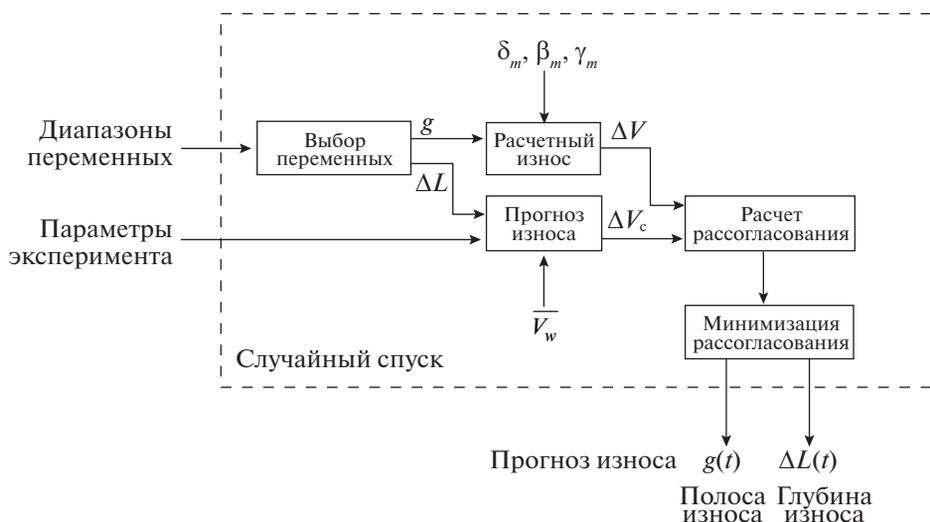


Рис. 10. Прогнозирование износа.

лялось формирование статистики критерия подобия по статистике измерений и выбранным значениям параметров. По измерениям и выбранным параметрам рассчитывался критерий объемного износа. Полученная при этом статистика использовалась для расчета вариации критерия  $\delta I_w$  для выбранных значений параметров. Оптимальные параметры выбирались методом случайного спуска из условия минимальности указанной вариации. К их числу относилась также величина усредненного критерия подобия  $\bar{I}_w$ , по которой рассчитывался прогнозируемый износ.

По параметризованной модели осуществлялось прогнозирование износа на основе равенства прогнозируемого и расчетного износа. Это равенство интерпретировалось как уравнение относительно глубины и полосы износа. Оно решалось путем минимизации модуля рассогласования между расчетным и прогнозируемым износом для различной длительности в соответствии с рис. 10. Результатом этой минимизации, осуществляемой методом случайного спуска, являются временные зависимости глубины и полосы износа, интерпретируемые как прогнозы износа. Таким образом, разработанная модель износа может быть использована для формирования квалификационных норм на основании эксплуатационных ограничений на глубину износа, соответствующую заданной длительности последнего.

Проведению испытаний предшествует предварительный выбор их экстремальных условий. Параметризация критериальной модели по результатам квалификационных испытаний в данных условиях позволяет провести прогнозирование

фрикционного износа, результаты которого можно интерпретировать как гарантированные нормы износа.

Таким образом, идентификация модели в рамках виртуализации может быть использована для экстраполяции лабораторных результатов на прогнозируемые условия эксплуатации объекта. В свою очередь, обратный пересчет позволяет формировать условия лабораторного эксперимента, адекватные прогнозируемым эксплуатационным условиям. Подход, ориентированный на решение таких задач, реализован, в частности, в теории подобия, а пример его применения приведен в работе [9]. Целью данного исследования являлось определение параметров квалификационных экспресс-испытаний химической стабильности окисляющихся смесей углеводородов в статических условиях. Для решения этой задачи применяются лабораторные реакторы, позволяющие изменять условия окисления в сравнении с эксплуатационными для достижения приемлемой длительности указанных испытаний. Используемые при этом методы подразделяются на методы *ускоренного окисления* и *искусственного старения*.

Методы первой группы предназначены для экспресс-оценки стабильности в ситуации, когда длительность испытаний является решающим фактором. Они предусматривают значительное повышение температуры процесса в сравнении с эксплуатационной, а также воздействие иных факторов, которое рассматривается ниже. В рамках методов второй группы осуществляется лабораторное хранение исследуемых продуктов в строго регламентированных условиях при уме-

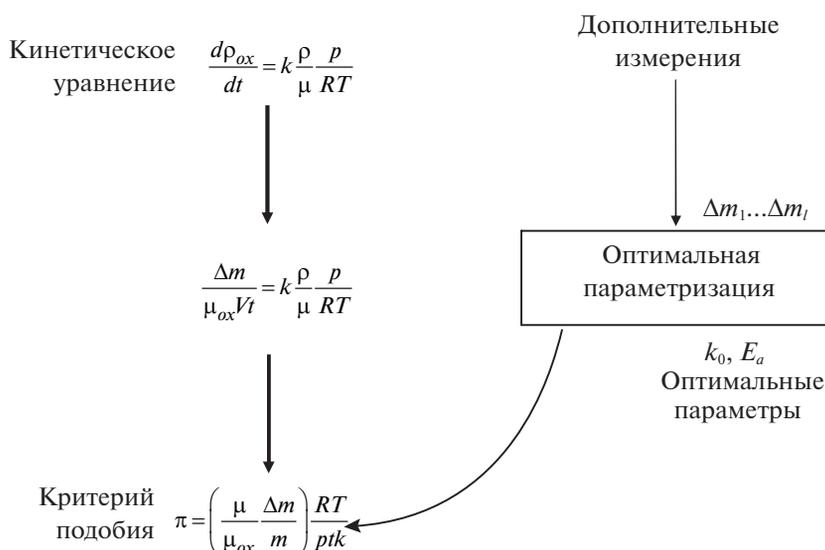


Рис. 11. Критерий химической стабильности.

ренно повышенных температурах. Преимущество этих методов перед методами искусственного окисления состоит в наиболее близком соответствии условиям реального хранения. Однако считается, что наилучшие оценки химической стабильности достигаются комплексированием методов обеих групп.

В дальнейшем исследовались методы ускоренного окисления. В ходе этого исследования была разработана критериальная модель химической стабильности углеводородных смесей, предназначенная для пересчета результатов квалификационных экспресс – испытаний к эксплуатационным условиям и включающая критерии геометрического, термодинамического и кинетического подобия. Критерий геометрического подобия может быть использован для выбора габаритов лабораторного реактора, а критерий термодинамического подобия для жидкостей представляет собой условие выбора возможного температурного режима.

Кроме того, на базе кинетического уравнения окисления углеводородов в бимолекулярном приближении был синтезирован критерий химической стабильности, представляющий собой условие динамического равновесия указанного окисления. Схема реализации критерия приведена на рис. 11. Соответствующее кинетическое уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{ox}}{dt} &= k\rho_m\rho_o, \\ \rho_m &= \frac{\rho}{\mu}, \\ \rho_o &= \frac{p}{RT}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\rho_{ox}$  – молярная плотность осаждаемого окисла;  $\rho_m, \rho_o$  – молярные плотности смеси и кислорода;  $\rho, \mu$  – плотность и молярная масса смеси;  $p, T$  – парциальное давление и температура окисления.

Из уравнения (2) получаем в бимолекулярном приближении:

$$\frac{\rho_{ox}}{t} = k \frac{\rho}{\mu} \frac{p}{RT},$$

или:

$$\frac{\Delta m}{\mu_{ox} V t} = k \frac{\rho}{\mu} \frac{p}{RT},$$

где  $t$  – длительность испытаний или эксплуатации;  $V$  – объем реактора;  $\Delta m, \mu_{ox}$  – масса осажденного окисла и его молярная масса.

Учитывая, что исходная масса смеси  $m = \rho V$ , получаем отсюда критерий химической стабильности:

$$\pi = \left( \frac{\mu}{\mu_{ox}} \frac{\Delta m}{m} \right) \frac{RT}{ptk} = 1. \quad (3)$$

Критерий (3) позволяет рассчитать потенциальную плотность  $\frac{\Delta m}{V}$  для эксплуатационных условий. При этом решение о приемлемой стабильности смеси принимается в соответствии с установленными требованиями к этой плотности. Указанные требования с помощью критерия (3) можно также пересчитать в квалификационные нормативы и использовать для принятия решения непосредственно по результатам квалификационных испытаний.

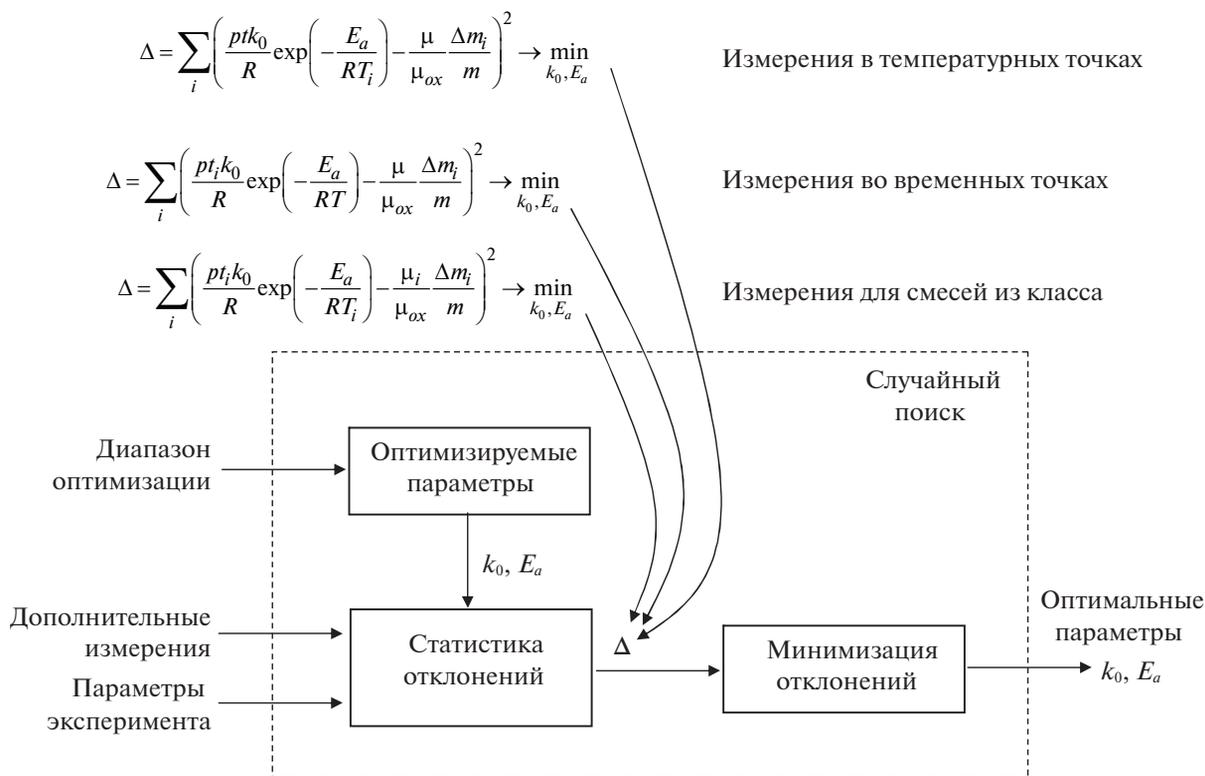


Рис. 12. Оптимальная параметризация.

Проблемой на пути реализации описанного подхода является неопределенность величины кинетического коэффициента  $k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ . Для ее определения проводятся измерения массы осадка  $\Delta m_i$  для исследуемой смеси в нескольких температурных точках  $T_i$  либо временных точках  $t_i$ . Величины номинальной скорости реакции  $k_0$  и энергию активации  $E_a$  находим при этом из соответствующих условий минимума, вытекающих из (3) и отображенных на рис. 11.

Представляет также интерес оценка параметров скорости реакции не для одной, а для класса близких по свойствам смесей. Для ее реализации необходимо провести измерения массы осадка для этих смесей в различных температурных точках и/или в различные моменты времени. Общее условие минимума для определения параметров скорости при этом приобретает вид:

$$\Delta = \sum_i \left( \frac{pt_i k_0}{R} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_i}\right) - \frac{\mu_i}{\mu_{ox}} \frac{\Delta m_i}{m} \right)^2 \rightarrow \min_{k_0, E_a}$$

Решение данных задач минимизации осуществляется каким-либо численным методом,

например, методом случайного поиска, схема которого приведена на рис. 12. Полученные при этом величины  $k_0, E_a$  используются для расчета  $k$  для исследуемой смеси при использовании описанной выше процедуры пересчета массы осадка в потенциальную плотность окисла.

Еще один пример использования идентификационного подхода связан с аппроксимацией плотности нефтепродуктов. Возможный подход к решению этой задачи предусматривает построение аппроксимации, описывающей жидкое и твердое газообразное состояние углеводорода при различных температурах и давлениях [10]. Естественной базой такой аппроксимации является закон соответственных состояний Ван дер Ваальса, в соответствии с ним все вещества подчиняются единому уравнению состояния в приведенных переменных. Для оценки свойств плотного газа или жидкости используется уравнение Менделеева–Клапейрона, дополненное фактором сжимаемости:

$$\rho = \frac{\mu p}{zRT}, \tag{4}$$

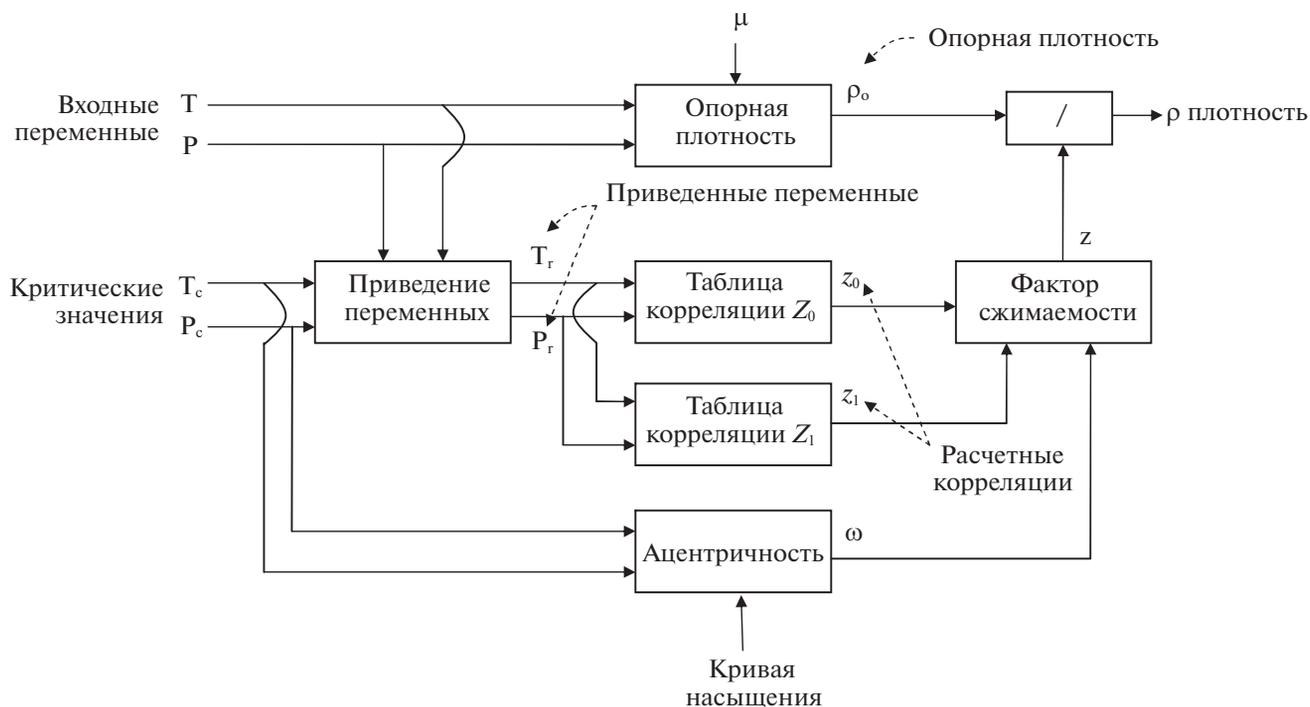


Рис. 13. Схема оценки плотности.

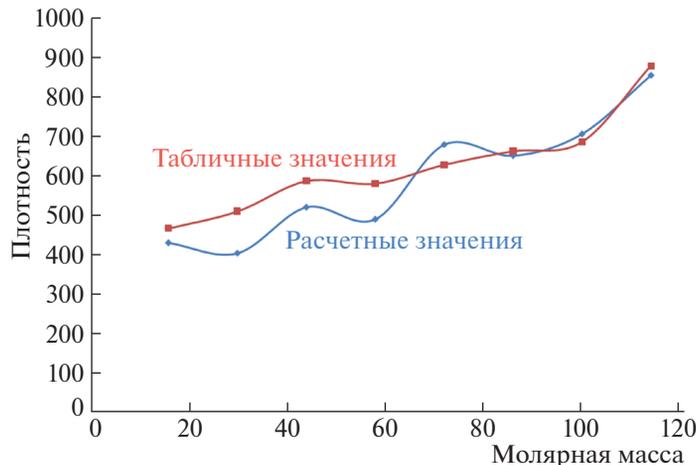


Рис. 14. Плотности при нормальных условиях (применение корреляционных таблиц).

где  $p$ ,  $T$  – давление и температура углеводорода;  $\mu$  – молярная масса углеводорода;  $z$  – фактор сжимаемости.

Последний характеризует отклонение параметров исследуемого углеводорода от состояния идеального газа с той же молярной массой. В частности, в рамках этого подхода могут быть по-

строены модифицированные алгоритмы оценки плотности углеводородов. Схема указанной оценки плотности приведена на рис. 13. Согласно закону соответственных состояний, зависимость фактора сжимаемости от приведенных переменных инвариантна для различных веществ и может быть представлена в следующей форме:

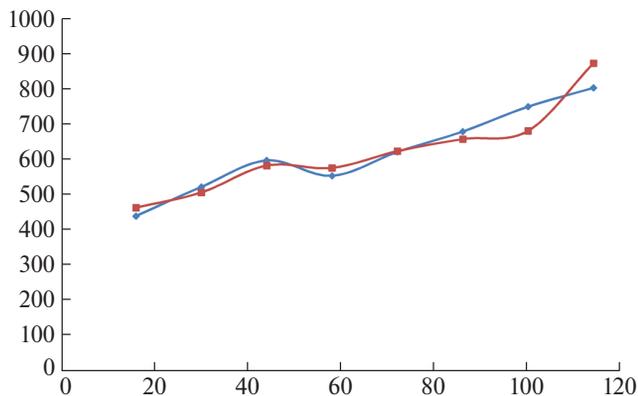


Рис. 15. Плотности при нормальных условиях (степенная аппроксимация сжимаемости).

$$z(p_r, T_r) = z_0(p_r, T_r) + \omega z_1(p_r, T_r),$$

$$p_r = \frac{p}{p_c},$$

$$T_r = \frac{T}{T_c},$$

где  $p, T$  — входные давление и температура;  $p_r, T_r$  — приведенные давление и температура;  $p_c, T_c$  — критические давление и температура;  $z_0, z_1$  — величины корреляций;  $\omega$  — величина ацентричности.

Величины корреляций рассчитываются по соответствующим таблицам путем их двумерной интерполяции. Входами этих таблиц являются приведенные давления и температуры, рассчитываемые по соответствующим критическим параметрам. Величина ацентричности рассчитывается в соответствии с соотношением  $\omega = \lg \frac{P}{P_s} - 1$ ,

где  $P_s$  — давление насыщения углеводорода при температуре  $T_s = 0.7T_c$ . Расчет давления насыщения ведется по кривым насыщения углеводородов. Результаты расчета плотности углеводородов при нормальных условиях для первых восьми алканов, а также табличные значения плотностей приведены на рис. 14. Сравнение показывает, что определенное соответствие плотностей имеет место для сравнительно тяжелых алканов, а погрешность расчета для легких алканов велика. Отсюда вытекает необходимость скорректировать использованный алгоритм оценки плотности.

Как и ранее, при оценке плотности будем исходить из соотношения (4), представляя фактор сжимаемости в виде  $z = 1 - e^{\alpha p_r^{\beta} T_r^{\gamma}}$ . Отсюда следует:

$$\sum_{i=1}^8 \left( \rho_{ii} - \frac{\rho_{0i}}{z_i(\alpha, \beta, \gamma)} \right)^2 \rightarrow \min_{\alpha, \beta, \gamma},$$

$$\rho_{0i} = \frac{\mu p_i}{RT_i},$$

$$z_i = 1 - e^{\alpha p_{ri}^{\beta} T_{ri}^{\gamma}}.$$

Таким образом, в отличие от традиционного алгоритма, основанного на использовании таблиц корреляций, в модифицированных алгоритмах используется представление фактора сжимаемости в виде степенной функции приведенных температуры и давления. Введенные параметры  $\alpha, \beta, \gamma$  являются настроечными и выбираются методом наименьших квадратов из условия соответствия расчетных и табличных плотностей при нормальных условиях. Результаты расчета плотности углеводородов при нормальных условиях для первых восьми алканов, а также табличные значения плотностей приведены на рис. 15.

Анализ указанных зависимостей показывает, что в отличие от традиционного расчета на основе таблиц корреляций, модифицированные расчеты на основе степенной аппроксимации сжимаемости обеспечивают лучшую точность для легких алканов. Более тяжелые алканы лучше описываются традиционным алгоритмом расчета. Возможным выходом в этой ситуации является комплексирование рассмотренных алгоритмов расчета, обеспечивающее сравнительно точную оценку для широкого диапазона углеводородов.

## ВЫВОДЫ

1. Традиционные квалификационные испытания интерпретируются как частный случай полунатурного эксперимента, в котором лабораторная установка играет роль физической модели системы, включающей исследуемый объект. Виртуализация представляет собой переход от физических к математическим моделям системы и объекта и допускает виртуальную квалификацию, т.е. реализацию квалификационных испытаний в виде численного эксперимента. Очевидным преимуществом виртуальной квалификации является ограничение количества натуральных экспериментов, используемых только для калибровки математических моделей, и, следовательно, снижение затрат на их проведение.

2. Виртуализация позволяет осуществить экстраполяцию лабораторных результатов на штатные условия эксплуатации, а также обратный пересчет этих условий в адекватные параметры квалификационного эксперимента. Эффективность виртуализации продемонстрирована на примерах

оптимизации математических моделей, совершенствования квалификационных экспериментов и прогнозирования их результатов, а также использования критериальных моделей для адекватной параметризации квалификационных экспериментов по эксплуатационным характеристикам.

3. Упрощенная модель двигателя внутреннего сгорания предназначена для моделирования влияния химмотологических и трибологических факторов на динамику двигателя и его КПД. Она основывалась на соотношении для баланса мощности двигателя и его нагрузки, создаваемой асинхронной машиной в генераторном режиме. Ее особенностью является то, что для имитации динамики давления в цилиндре использовалась индикаторная диаграмма двигателя. Учет трения в рамках модели базировался на аппроксимации кривой Герси—Штрибека и ее использовании для расчета коэффициента смешанного трения в зависимости от числа Зоммерфельда. Ввод в состав этого числа факторов, учитывающих износ и загрязнение пары поршень—цилиндр позволил осуществить моделирование этих процессов и качественно оценить их влияние на динамику смазочной способности и КПД двигателя.

4. Более полное исследование влияния химмотологических характеристик возможно с использованием многофункциональной модели двигателя внутреннего сгорания, которая объединяет субмодели его основных подсистем. К их числу относятся субмодели смесеобразования, тепловыделения и газообмена в цилиндре, модель кривошипно-шатунного механизма, а также вспомогательные субмодели, предназначенные для имитации состава выхлопа и охлаждения двигателя. Проведенные численные эксперименты подтвердили качественную адекватность построенной модели.

5. На основе анализа противоизносных свойств смазывающего топлива построена критериальная модель объемного износа, предназначенная для прогнозирования величины последнего при заданных условиях. Оптимальная параметризация критериальной модели базировалась на интерпретации критерия износа как инварианта с минимальной вариацией. При этом соотношение, связывающее критерий объемного износа с его усредненным значением, интерпретировалось как уравнение связи между величиной износа и влияющими на него факторами. Это позволило использовать данное уравнение для прогнозирования величины износа в заданных условиях и для различных сроков эксплуатации. Синтезированную таким образом критериальную

модель было предложено использовать для прогнозирования износа в экстремальных условиях и формирования соответствующих квалификационных нормативов.

6. Для аппроксимации плотности нефтепродуктов было предложено использовать модельно-ориентированную идентификацию. В рамках этого подхода построен модифицированный алгоритм оценки плотности углеводородов, базирующийся на использовании закона соответственных состояний. В отличие от традиционного алгоритма, основанного на использовании таблиц корреляций, в модифицированном алгоритме используется представление фактора сжимаемости в виде степенной функции приведенных температуры и давления. Параметры этого представления калибруются методом наименьших квадратов по результатам сравнения расчетных и табличных значений плотностей углеводородов при нормальных условиях. Показано, что для легких алканов модифицированный алгоритм обеспечивает лучшую точность в сравнении с традиционным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Моисеев А.А.* Виртуализация квалификационных испытаний // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 10. С. 40.
2. *Моисеев А.А.* Адаптация идентификационных моделей // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 6. С. 65.
3. *Моисеев А.А.* Упрощенная математическая модель двигателя внутреннего сгорания // Прикладная физика и математика. 2016. № 3. С. 29.
4. *Моисеев А.А.* Многофункциональная динамическая модель двигателя внутреннего сгорания // Промышленные АСУ и контроллеры. 2017. № 6. С. 23.
5. *Кондратенко В.В., Моисеев А.А.* Факторный анализ в квалификационном нормировании фрикционного износа / Тезисы докладов VI международной научно-технической конференции “Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня”, М., РГУ им. Губкина, 2016. С. 102.
6. *Моисеев А.А.* Критериальная модель фрикционного износа / Труды 25 ГОСНИИ МО РФ, Вып. 57. М., “Перо”, 2016. С. 241.
7. *Моисеев А.А.* Критериальная модель квалификационных испытаний на износ // Инженерная физика, 2015. № 12. С. 30.
8. *Моисеев А.А.* Критериальное моделирование в формировании квалификационных нормативов // Вестник НИЯУ МИФИ. 2016. Т. 5. № 5. С. 414.

9. *Моисеев А.А.* Критериальная модель химической стабильности в статических условиях // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 10. С. 42.
10. *Моисеев А.А.* Модифицированная оценка плотности углеводородов // Вестник ТюмГУ. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 3. С. 73–84.

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2019, vol. 8, no. 6, pp. 553–568

---

## Virtualization in Chimmotology Investigations

A. A. Moiseev<sup>#</sup>

*NPP Technos-RM (Technos-RM Research and Production Enterprise), Mytishi, 141002 Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: slow.coach@yandex.ru*

Received April 23, 2019; revised August 31, 2019; accepted September 17, 2019

**Abstract**—Qualification tests were interpreted as specific case of semi-natural experiment where laboratory plant takes part of environment physical model with studied object. In this situation virtualization represents transfer from physical to mathematical models and allows virtual qualification, i.e. qualification test implementation in form of numerical experiment. Virtualization permits performing extrapolation of laboratory results to normal exploitation conditions and recalculation of these conditions to qualification experiment parameters. Virtualization effectiveness demonstrated at math models optimization, qualification experiments correction and their results forecasting, at criteria models application for qualification experiments adequate parameterization on exploitation characteristics. Models of internal combustion engine were created for investigation of tribological and chimmotological factors influence on engine dynamics end effectiveness. They are based on balance relation and differ with method of cylinder pressure imitation only. Friction influence was based on Gersy–Streebeck curve approximation and its use for friction coefficient calculation in dependence of Sommerfeld's number. Basing on anti-wear properties investigation criteria model of volume wear was developed and used for wear evaluation at specified conditions. It was proposed to use this model for wear forecast at extreme conditions and forming of corresponding qualification normative. For oils density approximation model – oriented identification was proposed to use. Toward this end, modified algorithm was built which is based on law of corresponding states. In contrast to usual algorithm based on correlation tables use modified algorithm uses density presentation in form of power function of oil pressure and temperature. It was shown that for light oils modified algorithm provides better precision in comparison with usual one.

**Keywords:** qualification tests, semi-natural experiment, numerical experiment, physical model, virtualization, virtual qualification, criteria model, Gersy–Streebeck curve, Sommerfeld's number, anti-wear properties, qualification normative, identification, oils, law of corresponding states, compressibility factor

DOI: 10.1134/S2304487X19060051

### REFERENCES

1. *Moiseev A.* Qualification tests virtualization, *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, no. 10, 2015, p. 40.
2. *Moiseev A.* Identification models adaptation, *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, no. 6, 2015, p. 65.
3. *Moiseev A.* Simplified mathematical model of internal-combustion engine, *Applied Physics and Mathematics*, no. 3, 2016, p. 29.
4. *Moiseev A.* Multifunctional dynamical model of internal combustion engine, *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2017, no. 6, p. 23.
5. *Kondratenko V., Moiseev A.* Factor analysis in qualification quotation of friction wear, *Thesises of VI scientific*

- conference “*Problems of himmotology: from experiment to high level math models*”, Moscow, Gubkin university of oil and gas, 2016, p. 102.
6. *Moiseev A.* Criteria model of frictional wear, *Proceedings of 25 State himmotology institute*, issue 57, Moscow, “Pero”, 2016, p. 241.
  7. *Moiseev A.* Criteria model of qualifying wear tests, *Engineering physics*, no. 12, 2015, p. 30.
  8. *Moiseev A.* Criteria modeling at the formation of qualification standards, *Vestnik Natsional’nogo issledovatel’skogo yadernogo universiteta “MIFI”*, 2016, vol. 5, no. 5, p. 414.
  9. *Moiseev A.* Criteria model of chemical stability at static conditions, *Science intensive technologies in mechanical engineering*, no. 10, 2017, p. 42.
  10. *Moiseev A.* Modified Estimation of Oils Density, *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 73–84.