

## МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ В ВИРТУАЛИЗАЦИИ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

**Моисеев Александр Александрович,**  
г. Москва, Россия, slow.coach@yandex.ru

**Аннотация.** Традиционные квалификационные испытания интерпретируются как частный случай полунатурного эксперимента, в котором лабораторная установка играет роль физической модели системы, включающей исследуемый объект. Переход от физических к математическим моделям системы и объекта допускает их виртуализацию, т.е. реализацию квалификационных испытаний в виде численного эксперимента, преимуществом которой является снижение затрат на проведение натурных экспериментов. 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.

**Ключевые слова:** квалификационные испытания, полунатурный эксперимент, квалификационный эксперимент, адекватная параметризация, физической модель, математическая модель, теория подобия, идентификационная модель, критериальная модель, виртуализация

**Сведения об авторе:** Моисеев А.А., к.т.н., с.н.с., ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России»

---

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]. А вот лабораторную установку при этом можно рассматривать лишь как физическую реализацию некоторой приближенной модели системы, включающей исследуемый объект. В этом смысле квалификационные испытания являются частным случаем более широкого понятия полунатурных экспериментов, иллюстрируемого рисунком 1 и характеризующегося сочетанием натурной (штатной) и модельной частей. 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 этих условиях 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 параметризации и адаптации создаваемых математических моделей [2]. Построенные таким образом математические модели используются в дальнейшем для экстраполяции лабораторных результатов на штатные условия эксплуатации объекта, а обратный пересчет, осуществляемый с их помощью, позволяет формировать условия лабораторного эксперимента, адекватные прогнозируемым эксплуатационным условиям.

Подход, ориентированный на решение подобных задач, реализован, в частности, в теории подобия [3]. В рамках этой теории используются два основных подхода. Первый из них связан с использованием теории подобия для моделирования динамических процессов в ситуациях, когда описание процесса осуществляется дифференциальными уравнениями, которые формируются путем нормализации исходных уравнений последнего [4]. Переменные уравнений при этом принимают безразмерную обобщенную форму, а параметры приобретают вид некоторых инвариантов. Единственными размерными параметрами при этом остаются временные масштабы, которые либо рассчитываются, либо подбираются по результатам доступных натурных экспериментов. Задача параметризации уравнений процесса при этом существенно упрощается. Примеры применения такого подхода для построения идентификационных моделей для тестирования систем управления и эконометрического прогнозирования рассмотрены в [5].

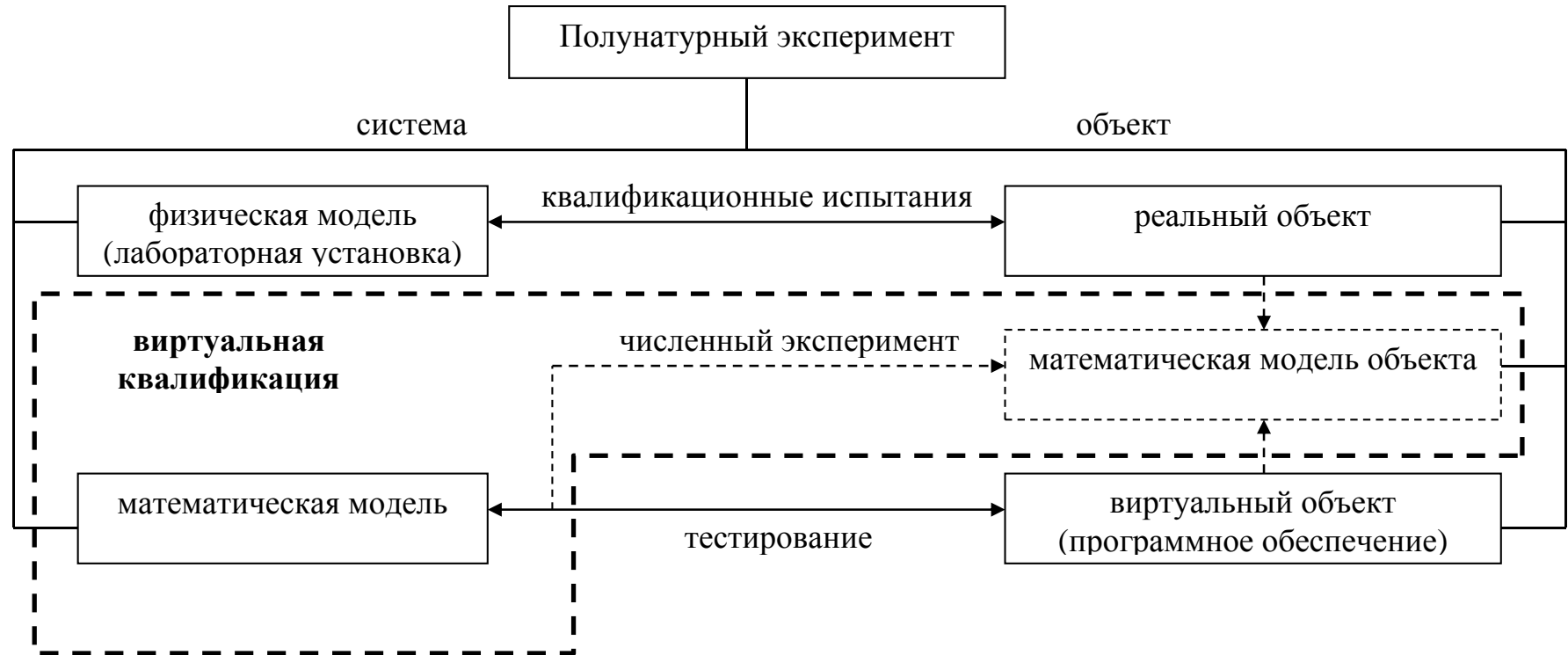


Рис. 1. Виртуальная квалификация

Второй подход является традиционным в применении теории подобия и связан с моделированием равновесных процессов - установившегося течения, стационарного теплообмена и т.п. В этой ситуации теория подобия позволяет свести описание процесса к системе уравнений относительно безразмерных критериев подобия, формируемых, в частности, методами теории размерности. Эти уравнения являются инвариантными для широкого класса процессов или широкого диапазона параметров процесса. Параметризация этих уравнений осуществляется по результатам доступных натуральных экспериментов с процессами того же типа.

В качестве примера рассматривается моделирование комплексного квалификационного эксперимента [6, 7] в форме модели коррозионно – фрикционного износа. Последняя реализуется в критериальной форме для фрикционного износа при наличии кислотной коррозии, влияющей на дефект массы изнашивающегося тела за счет адсорбционного пластифицирования. Этот дефект включает две составляющие:

- дефект коррозионного износа, связанный с воздействием кислой среды.
- дефект фрикционного износа с учетом адсорбционного пластифицирования

Выбор переменных модели фрикционного износа и ее параметров определяется условиями квалификационного эксперимента с использованием установки КАММ – 01 [7]. В частности, интенсивность собственно износа, определяется следующими величинами:

- силой трения  $F = \mu N$ , где  $\mu$  – коэффициент трения,  $N$  – нормальная нагрузка на изнашивающееся тело;
- скоростью скольжения  $v$ ;
- временем износа  $t$ , соответствующим времени эксперимента.

Представляя массовый износ в виде  $\Delta M = F^\alpha v^\beta t^\gamma$ , выпишем систему характеристических уравнений для размерностей массы длины и времени [8]:

$$\begin{cases} \alpha + 0 + 0 = 1 \\ \alpha + \beta + 0 = 0 \\ -2\alpha - \beta + \gamma = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Решениями этой системы являются  $\alpha = \gamma = 1$ ,  $\beta = -1$ . Массовый износ при этом составляет  $\Delta M \approx \frac{Ft}{v} = \frac{\mu Nt}{v}$ , а критерий подобия MFw для фрикционного износа приобретает вид:

$$MFw = \frac{v \cdot \Delta M}{\mu Nt} = \frac{v \cdot \Delta M}{\mu E_e S t} \quad (2)$$

Этот критерий имеет смысл отношения импульса увлекаемого обломочного материала к импульсу силы трения. Величина нормальной нагрузки определяется при этом соотношением  $N = E_e S$ , где  $E_e$  – модуль упругости Юнга, а  $S$  – площадь фрикционного контакта.

Трение при наличии смазки приобретает граничный характер. Для учета коэффициента трения в этих условиях воспользуемся результатами его аппроксимации кривой Герси – Штрибека. Данная кривая определяет зависимость коэффициента смешанного трения от числа Зоммерфельда, представляющего собой отношение вязкого и граничного трения и определяемого в данном случае в виде

$S_o = \frac{\eta v}{E \Delta L}$ , где  $\eta$  – динамическая вязкость смазки при температуре эксперимента,  $E$  – модуль износоустойчивости. В соответствии с [9] кривая Герси – Штрибека представляется аппроксимацией вида  $\mu = \mu_0 \exp(-\varepsilon \cdot S_o) + S_o$ , где  $\varepsilon$  – калибровочный параметр модели трения. Граничное трение соответствует при этом малым значениям  $S_o$ , для которых эта зависимость принимает приближенный вид  $\mu \approx \mu_0 \exp(-\varepsilon \cdot S_o)$ .

Согласно [10] упомянутый выше модуль износоустойчивости принимается равным модулю твердости по Бринеллю для изнашивающегося тела. Влияние кислотной коррозии на фрикционный износ определяется при этом ее влиянием на указанную твердость в условиях адсорбционного пластифицирования. Адсорбционным пластифицированием или эффектом Ребиндера [11] называется снижение твердости адсорбента (изнашивающегося тела) под действием адсорбции некоторых составляющих раствора (например, адсорбции из масла его окисленных компонент).

Наиболее удобным методом описания этого эффекта представляется уравнение Гриффитса, определяющее связь между твердостью адсорбента  $E$  и его поверхностной энергией  $\sigma$  [12]:

$$E = \sqrt{\frac{2\sigma E_e}{g}} \tag{3}$$

где  $E_e$  – модуль Юнга адсорбента  
 $g$  – толщина аномального приповерхностного слоя адсорбента.

В соответствии с уравнением Ленгмюра [13] адсорбция приводит к понижению  $\Delta\sigma$  удельной поверхностной энергии, величина которого составляет:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= \Gamma RT \\ \Gamma &= \Gamma_m \ln\left(1 + \frac{c_a}{\alpha}\right) \end{aligned} \tag{4}$$

где  $\Gamma$ ,  $\Gamma_m$  – текущая и максимальная величина адсорбции;  
 $c_a$ ,  $\alpha$  – текущая и номинальная концентрация адсорбата в растворе;  
 $T$  – абсолютная температура адсорбента;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная.

Полагая величину понижения удельной поверхностной энергии малой и используя (3), находим для величины понижения твердости:

$$E - \Delta E = \sqrt{\frac{2(\sigma - \Delta\sigma)E_e}{g}}$$

или, с учетом (4):

$$\Delta E = \Delta\sigma \sqrt{\frac{E_e}{2g\sigma}} = \Gamma RT \sqrt{\frac{E_e}{2g\sigma}} \tag{5}$$

Величины максимальной адсорбции  $\Gamma_m$ , номинальной концентрации адсорбата в растворе  $\alpha$ , а также толщина приповерхностного слоя  $g$  являются параметрами модели и подлежат оценке по результатам квалификационного эксперимента. Величины модуля упругости  $E_e$  и удельной поверхностной энергии  $\sigma$  являются табличными параметрами адсорбента [14].

Из (3) следует, что снижение твердости за счет адсорбционного пластифицирования определяется величиной адсорбции  $\Gamma$ . Последняя, в соответствии с уравнением Ленгмюра (4), зависит, в свою очередь, от концентрации  $c_a$  адсорбируемых составляющих. В условиях квалификационного эксперимента с использованием установки ДК – НАМИ этой концентрации соответствует концентрация окисленных составляющих в исследуемом масле [4]. Для ее оценки используется модель коррозионного износа, которая строится на основании уравнений баланса, описывающих растворение металла в растворе кислоты.

Первым из этих уравнений является уравнение Нойеса – Уитни, которое представляет собой выражение первого закона Фика для диффузии продукта гетерогенной реакции от границы гетерогенного контакта в раствор [11, 15]:

$$\frac{d\Delta m}{dt} = DS \frac{x_0 - x}{\delta} \quad (6)$$

где  $t$  – время коррозии

$\Delta m$  – масса растворенного металла, равная коррозионному дефекту массы

$D$  – коэффициент диффузии

$S$  – площадь гетерогенного контакта

$\delta$  – характерный размер области, занятой раствором

$x, x_0$  – объемная и приконтактная концентрация растворенного металла.

Пренебрегая в (6) объемной концентрацией в сравнении с приконтактной, получаем из условия идентичности размерностей:

$$\frac{\Delta m}{t} = DS \frac{x_0}{\delta}$$

Отсюда находим промежуточный критерий подобия:

$$\pi' = \frac{\Delta m \delta}{DStx_0} \quad (7)$$

Второе балансное уравнение описывает баланс между растворенным и нерастворенным металлом в приконтактной области. Соответствующая концентрация растворенного металла  $x_0$  определяется в предположении об обратимом характере растворения, в котором балансное уравнение принимает вид:

$$\frac{v_m V}{\mu_m} \frac{dx_0}{dt} = kS \frac{v_m \rho_a}{\mu_a} - kS \frac{v_m x_0}{\mu_m} \quad (8)$$

где  $V$  – объем раствора

$v_m, v_a$  – эффективные валентности металла и кислоты

$k$  – скорость реакции растворения металла в кислоте

$\rho_a, \rho$  – плотность кислоты и растворителя.

$\mu_m, \mu_a$  – молярные массы металла и кислоты

Состоянию динамического равновесия здесь соответствует установившаяся приконтактная концентрация  $x_0$ , которую находим, приравнявая нулю правую часть (8):

$$x_0 = \frac{v_a \mu_m}{v_m \mu} \rho c_a \quad (9)$$

где  $c_a \approx \frac{\rho_a \mu}{\rho \mu_a}$  – относительная молярная концентрация кислоты в растворе

$\mu$  – молярная масса растворителя

Подставляя (8, 9) в (7), находим с учетом определения кислотности раствора  $pK$  [16]:

$$\pi = \frac{\Delta m \delta}{\rho c_a DSt} \frac{v_m \mu}{v_a \mu_m}$$

$$c_a = 10^{-pK}$$

Принимая  $\delta \sim \frac{V}{S}$  и считая коэффициент диффузии пропорциональным кинематической вязкости

масла  $D \sim \nu$ , получаем окончательное выражение для критерия подобия  $MC_w$  коррозионного износа:

$$MS_w = \frac{\Delta m V}{\rho c_a v S^2 t} \frac{v_m \mu}{v_a \mu_m} \quad (10)$$

$$c_a = 10^{-pK}$$

Физический смысл этого критерия – отношение массовых расходов изнашиваемого вещества при его химическом растворении и при диффузии в раствор.

Масло с окисленными составляющими образует упоминаемый выше кислотный раствор, относительная концентрация которого  $c_a$  определяет массовую долю окисленных составляющих. Эта величина прямо пересчитывается в кислотность исследуемого масла  $pK = -\lg c_a$ , а также характеризует влияние окисления на фрикционный износ в условиях адсорбционного пластифицирования.

ГОСТ [6] не предусматривает измерения кислотности масла, необходимого для расчета  $c_a$ . Кроме того, в соответствии с (10), необходимы данные по валентностям и молярным массам взаимодействующих металлов, масел и их окисленных составляющих. Поэтому, для проведения калибровки модели износа указанный ГОСТ должен быть дополнен соответствующими измерениями и данными. По результатам указанной калибровки величина  $MS_w$  в (10) заменяется его усредненным значением, и концентрация  $c_a$  может быть оценена по величине дефекта массы образца. Необходимость в прямом измерении кислотности при этом отпадает, и ГОСТ [6], дополненный упомянутыми выше данными, может быть использован для прямой оценки кислотности масла.

Проведенное рассмотрение показывает, что результаты измерений, выполненных на установке ДК - НАМИ [6], не позволяют осуществить калибровку критериальной модели коррозионного износа, и, следовательно, комплексной модели коррозионно – фрикционного износа, описанной выше. Поэтому здесь мы ограничимся расчетом прогноза фрикционного износа, основываясь на модели (2). Этот расчет основывается на измерениях массового износа штатных вкладышей подшипников коленчатого вала, изготовленных из свинцовистой бронзы, с использованием установки КАММ – 01 без учета адсорбционного пластифицирования.

В соответствии с (2):

$$MF_w = \frac{v \cdot \Delta M}{\mu E_e St} \quad (11)$$

$$\mu \approx \mu_0 \exp(-\varepsilon \cdot S_o)$$

$$S_o = \frac{\eta v}{E \Delta L}$$

где  $\Delta L = \frac{\Delta M}{\rho S}$  - оценка величины линейного износа

$\varepsilon$  – калибровочный коэффициент.

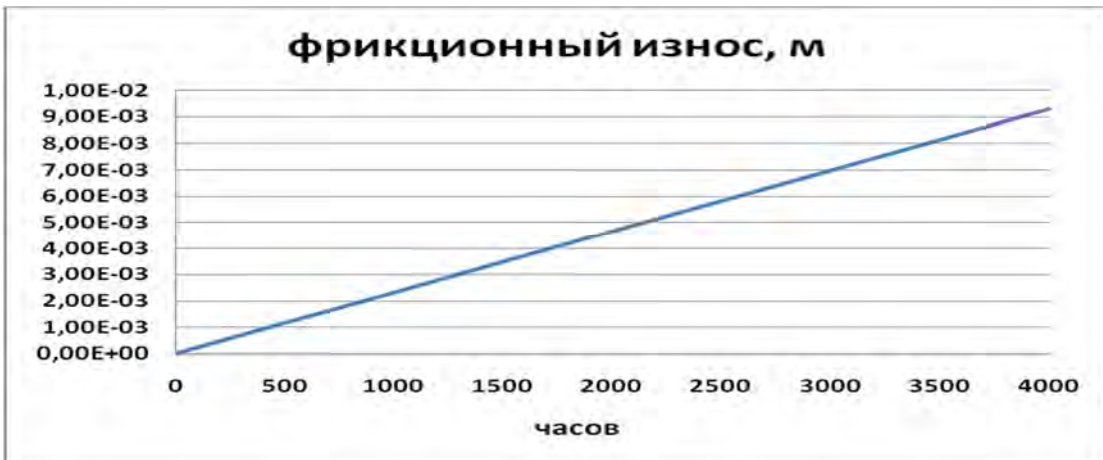


Рис. 2. Прогноз фрикционного износа

Калибровочный коэффициент  $\varepsilon$  подбирается из условия минимальности вариации критерия **MFw**. Среднее значение критерия  $\overline{MFw}$ , рассчитанное при его минимальной вариации, подставляется в соотношение (11). Последнее при этом приобретает смысл уравнения связи между массовым износом  $\Delta M$  и прочими параметрами построенного критерия, в частности – параметром времени **t**. Относительно линейного износа  $\Delta L$  оно имеет вид:

$$\frac{\mu(\Delta L)E_eSt}{\nu} = \rho S \Delta L$$

т.е. является трансцендентным. Его решение осуществлялось методом случайного поиска [18] для различных значений параметра времени **t**. Найденная таким образом зависимость  $\Delta L = \Delta L(t)$  приведена на рисунке 2. Она представляет собой искомый прогноз фрикционного износа на глубину, задаваемую временным параметром. Он показывает, что за 4000 часов линейный износ может составить ~ 9 мм.

Еще одной возможной целью виртуализации является, как уже указывалось, определение параметров квалификационного эксперимента по эксплуатационным характеристикам. Рассмотрим в качестве примера оценку химической стабильности жидкости в гидростатическом случае [19]. Особенность эксперимента заключается в том, что его предполагается провести при повышенной температуре для сокращения срока испытаний. Поэтому в число оцениваемых параметров эксперимента была включена его длительность.

Для достижения поставленной цели необходимо построить критерии подобия, существенные для описания химической трансформации жидкости. В гидростатическом случае физико-химические процессы определяются следующим рядом параметров:

- $\rho = \frac{M}{L^3}$  - плотность жидкости
- $\mu = \frac{M}{N}$  - молярная масса жидкости
- $c = \frac{L^2}{\Theta T^2}$  - теплоемкость жидкости
- $E_0 = \frac{ML^2}{NT^2}$  - энергия активации реакции трансформации
- $V = L^3$  - объем сосуда
- $P = \frac{M}{LT^2}$  - гидростатическое давление жидкости
- $T = \Theta$  - температура жидкости.

Выбор независимых параметров и построение критериев подобия базировались на методике, представленной в [8]. В качестве независимых были выбраны параметры ( $\rho, \mu, c, E_0, V$ ), а в качестве зависимых – термодинамические параметры ( $P, T$ ). Исходя из степенного представления  $\rho^\alpha \mu^\beta c^\gamma E_0^\delta V^\varepsilon$ , получаем характеристический детерминант для независимых параметров:

$$\begin{matrix} M & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ L & -3 & 0 & 2 & 2 & 3 \\ \det = T & 0 & 0 & -2 & -2 & 0 = -6 \neq 0 \\ \Theta & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ N & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{matrix}$$

Таким образом, выбранные параметры являются независимыми.

Система уравнений для гидростатического давления  $P$  имеет вид:

$$\begin{cases} \alpha + \beta + 0 + \delta + 0 = 1 \\ -3\alpha + 0 + 2\gamma + 2\delta + 3\varepsilon = -1 \\ 0 + 0 - 2\gamma - 2\delta + 0 = -2 \\ 0 + 0 - \gamma + 0 + 0 = 0 \\ 0 - \beta + 0 - \delta + 0 = 0 \end{cases}$$

Решая ее, получаем:  $\alpha = 1, \beta = -1, \gamma = 0, \delta = 1, \varepsilon = 0$ . Отсюда находим для характеристического

давления  $P = \frac{\rho E_0}{\mu}$ . Критерий при этом имеет вид  $\pi_1 = \frac{\mu P}{\rho E_0}$  и выражает условие подобия гидростатических давлений.

Система уравнений для температуры жидкости  $T$  имеет вид:

$$\begin{cases} \alpha + \beta + 0 + \delta + 0 = 0 \\ -3\alpha + 0 + 2\gamma + 2\delta + 3\varepsilon = 0 \\ 0 + 0 - 2\gamma - 2\delta + 0 = 0 \\ 0 + 0 - \gamma + 0 + 0 = 1 \\ 0 - \beta + 0 - \delta + 0 = 0 \end{cases}$$

Решая ее, получаем:  $\alpha = 0, \beta = -1, \gamma = -1, \delta = 1, \varepsilon = 0$ . Отсюда находим для характеристической

температуры  $T = \frac{E_0}{c\mu}$ . Критерий при этом имеет вид  $\pi_2 = \frac{c\mu T}{E_0}$  и выражает условие подобия температур.

Построенные критерии удовлетворяются выравниванием значений соответствующих параметров или подбором альтернативного жидкости. Возможна, однако, ситуация, когда для ускорения процесса анализа в эксперименте используется повышенная температура. В этом случае непосредственное применение критериев  $\pi_1, \pi_2$  нецелесообразно. Можно, однако, использовать их свертку вида:

$$\pi = \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{P}{c\rho T}$$

Этот критерий выражает условие **термодинамического подобия** - пропорциональности давлений и температур в моделируемом и моделирующем процессах. При произвольной величине температурного приращения  $\Delta T$  это условие выполняется, например, для идеальных газов в изохорическом процессе.

Для жидкостей указанный критерий представляет собой условие выбора температурного приращения. Пусть температура в моделируемом процессе равна  $T$ , а гидростатическое давление  $P = \rho g \sqrt[3]{V}$ , где  $g$  – ускорение свободного падения. Предположим так же, что экспериментальная колба объемом  $V_e$  наполнена той же жидкостью и закупорена. Тогда при температуре  $T + \Delta T$  давление в ней составит  $P_e = \rho g \sqrt[3]{V_e} + E\alpha\Delta T$ , где  $E$  – модуль сжатия жидкости, а  $\alpha$  – коэффициент ее температурного расширения. Условие подобия в этом случае принимает вид:

$$\frac{\rho g \sqrt[3]{V}}{T} = \frac{\rho g \sqrt[3]{V_e} + E\alpha\Delta T}{T + \Delta T}$$

Разрешая его относительно  $\Delta T$ , находим:



$$\Delta T = T \frac{\rho g (\sqrt[3]{V} - \sqrt[3]{V_e})}{E \alpha T - \rho g \sqrt[3]{V}}$$

Для слабо сжимаемых жидкостей можно считать, что  $E \alpha T \gg \rho g \sqrt[3]{V}$  [14]. Пренебрежем так же  $\sqrt[3]{V_e}$  в сравнении с  $\sqrt[3]{V}$ , что дает погрешность в несколько процентов. Тогда  $\Delta T \approx \frac{\rho g \sqrt[3]{V}}{E \alpha} \ll T$ . Это означает, что критерий допускает лишь незначительное повышение температуры жидкости в заполненной и закупоренной колбе.

В случае, если величина температурного приращения задана из каких – то дополнительных соображений, колба перед закупоркой при температуре Т должна быть заполнена лишь частично, т.е. объем жидкости в ней  $V' < V_e$ . Заполнение колбы должно происходить при температуре Т+  $\Delta T$  за счет температурного расширения. Тогда:

$$\begin{cases} \frac{\Delta V}{V'} = \alpha \Delta T \\ V' + \Delta V = V_e \end{cases}$$

Отсюда приближенно находим первоначальный объем жидкости в колбе:

$$V' = \frac{V_e}{1 + \alpha \Delta T}$$

В рамках этого рассмотрения не учитывалась малая поправка приращения  $\Delta T'$ , необходимая для создания необходимого гидростатического давления. Величина этой поправки составляет:

$$\Delta T' = \frac{\rho g (\sqrt[3]{V} - \sqrt[3]{V_e})}{E \alpha}$$

а температурное приращение в выражении для первоначального объема трансформируется в  $\Delta T - \Delta T'$ .

Оценим теперь необходимое время эксперимента. Будем исходить из того, что степень химической трансформации жидкости не должна превышать  $\eta$ . Учитывая, что скорость реакции определяется уравнением Аррениуса, находим для характерного времени трансформации:

$$t = \frac{\mu \rho V \eta}{k_0 \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right)} = \frac{\mu \rho \eta}{k_0} V \exp\left(\frac{E_0}{RT}\right)$$

В эксперименте, проводимом при температуре Т<sub>е</sub> аналогичный эффект будет достигнут за время:

$$t_e = \frac{\mu \rho \eta}{k_0} V_e \exp\left(\frac{E_0}{RT_e}\right)$$

В качестве критерия **кинетического подобия** можно, таким образом, принять критерий:

$$\pi_5 = \frac{k_0 t}{\mu \rho V \eta} \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right)$$

или его логарифмический аналог:

$$\pi'_5 = \ln \frac{k_0 t}{\mu \rho V \eta} - \frac{E_0}{RT}$$

Приравнивая эти критерии для натурной и экспериментальной ситуаций, и принимая в качестве т гарантийный срок хранения, получаем оценку времени поверочного эксперимента:

$$t_e = t \frac{V_e}{V} \exp\left(\frac{E_0}{R} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

Таким образом, адекватные оценки параметров квалификационных экспериментов по анализу химической стабильности жидкостей могут основываться на термодинамическом и кинетическом критериях

подобия. Эти критерии позволяют рассчитать условия достижения заданного температурного приращення в квалификационном эксперименте, обеспечивающие подобие по термодинамическому критерию, а также оценить длительность поверочного эксперимента на основе кинетического критерия.

#### Выводы

1. Традиционные квалификационные испытания предложено интерпретировать как частный случай полунатурного эксперимента, в котором лабораторная установка играет роль физической модели системы, включающей исследуемый объект.

2. Переход от физической к математической модели системы, а также использование математической модели объекта позволяют реализовать квалификационные испытания в виде численного эксперимента, т.е. виртуализировать их. Очевидным преимуществом виртуальной квалификации является ограничение количества натуральных экспериментов, используемых только для калибровки математических моделей, и, следовательно, снижение затрат на их проведение.

3. Теория подобия является естественным средством виртуализации квалификационных испытаний, поскольку позволяет осуществить экстраполяцию лабораторных результатов на штатные условия эксплуатации, а также обратный пересчет этих условий в адекватные параметры квалификационного эксперимента.

4. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована на следующих примерах:

- исследование полноты квалификационных экспериментов и возможностей их усовершенствования на примере исследования противоположных свойств топлив и масел;
- оптимальной настройки критериальных моделей на основе статистических исследований критериев подобия;
- разработки методики прогнозирования на основе критериальной модели;
- расчета адекватных параметров квалификационных экспериментов по эксплуатационным характеристикам на основе критериальных моделей.

#### Литература

1. ГОСТ 16504-81, Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения, М., Издательство стандартов, 1991.
2. Моисеев А.А., Адаптация идентификационных моделей, Промышленные АСУ и контроллеры, №6, 2015, с. 65.
3. Гухман А.А., Введение в теорию подобия, М., Высшая школа, 1973, 296 с.
4. Моисеев А.А., Применение теории подобия в имитационном моделировании динамических процессов, Приборы и системы, №10, 2004, с. 1.
5. Моисеев А.А. Виртуализация квалификационных испытаний, Промышленные АСУ и контроллеры, №10, 2015, с. 40.
6. ГОСТ 20502-75 Масла и присадки к ним. Методы определения коррозионности, М., Издательство стандартов, 1986.
7. Волгин С.Н., Кузнецов А.А., Малыхин В.Д. Усовершенствованный метод оценки коррозионных свойств моторных масел на установке КАММ -01М, Труды 25 ГОСНИИ МО РФ, вып. 56, с. 309, М., «Перо», 2014.
8. Моисеев А.А., Алгебраическая интерпретация  $\pi$  - теоремы, Научные технологии в космических исследованиях Земли, №3, 2014, с. 16.
9. Моисеев А.А., Упрощенная математическая модель двигателя внутреннего сгорания, Научные технологии в космических исследованиях Земли, №1, 2014, с. 20.
10. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ, М., Машиностроение, 1977, 526 с.
11. Ребиндер П.А. Избранные труды, М., Наука, 1978, 368 с.
12. Мак Лин Д. Механические свойства металлов, М., Металлургия, 1965, 431 с.
13. Абрамзон А.А. Поверхностно – активные вещества, Л., Химия, 1981, 304 с.

14. Физические величины: справочник, п/ред. Григорьева И.С. и Мейлихова Е.З., М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
15. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике, М., Наука, 1974, 944 с.
16. Некрасов Б.В. Основы общей химии, т.1, М., Химия, 1973, 656 с.
17. Гуреев А.А., Фукс И.Г., Лашхи В.Л. Химмотология, М., Химия, 1986, 368 с.
18. Теория и применение случайного поиска, п/ред. Растригина Л.А., Рига, «Зинатне», 1969, 309 с.
19. Моисеев А.А., Моделирование химической стабильности методом теории подобия, Информационные технологии, Т.21, №9, 2015, с. 666.

## METHODS OF SIMILARITY THEORY IN QUALIFICATION TESTS VIRTUALIZATION

**Moiseev Aleksandr Aleksandrovich,**  
Moscow, Russia, slow.coach@yandex.ru

**Abstract.** Traditional qualification tests are interpreted as specific case of semi-natural experiment where laboratory plant plays part of physical system including studied object. Using mathematical models of system and object it's possible to realize virtual qualification tests in form of numerical experiment. That allows reducing the costs on natural experiments since last ones used for model adjustment only. Virtualization effectiveness demonstrated on examples of mathematical models optimization, of qualification experiments improving and their results forecasting, of adequate qualification experiments parameterization on operational characteristics etc.

**Keywords:** qualification tests, semi - natural experiment, qualification experiment, adequate parameterization, physical model, mathematical model, similarity theory, identification model, criteria model, virtualization

### References

1. GOST 16504-81, Testing and control of production quality. Base terms and definitions, М., publishing house of standards, 1991.
2. Moiseev A. Identification models adaptation, Computer-aided control systems and controllers, №6, 2015, p 65.
3. Guchman A. Introduction into similarity theory, М., publisher "High school", 1973, 296 p.
4. Moiseev A. Similarity theory application in dynamical processes simulation, Devices and systems, №10, 2004, p. 1.
5. Moiseev A. Qualification tests virtualization, Computer-aided control systems and controllers, №10, 2015, p 40.
6. GOST 20502 – 75, Oils and their additives. Corrosion detection methods, М., publishing house of standards, 1986.
7. Volgin S. ea, Improved method of corrosive oils features using KAMM - 01M, Proceedings of state institute of himmology, issue 56, p. 309, М., publisher "Pen", 2014.
8. Moiseev A., Algebraic interpretation of  $\pi$  – theorem, H&ES, №3, 2014, p 16.
9. Moiseev A., Simplified mathematical model of internal-combustion engine, H&ES, №1, 2014, p 20.
10. Kragelsky I. ea, Fundamentals of friction and wear calculations, М., publisher "Machine-building", 1977, 526 p.
11. Rebinder P. Selected works, М., publisher "Science", 1978, 368 p
12. McLean D. Mechanical properties of metals, NY, Wiley, 1962, 431 p.
13. Abramson A. Surface-active substances, М., publisher "Chemistry", 1981, 304 p.
14. Physical values: reference book, ed. by Grigor'ev I. and Meilichov E., М., publisher "Energoatomizdat", 1991, 1232 p.
15. Yavorsky B., Detlaf A. Referense book on physics, publisher "Science", 1974, 944 p
16. Nekrasov B. Fundamentals of general chemistry, v. 1, М., publisher "Chemistry", 1973, 656 p.
17. Gureev A. ea, Chimmotology, М., publisher "Chemistry", 1986, 304 p.
18. Theory and application of random search, ed. by Rastrigin L., Riga, publisher "Zinatne", 1969, 309 p.
19. Moiseev A. Chemical stability modeling by means of similarity theory, Information technologies, v.21, №9, 2015, p. 666.

**Information about author:**

Moiseev A.A., PhD, State Research Institute of Chimmotology, senior researcher, E-mail: slow.coach@yandex.ru