

И. Е. Старостин

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПОТОКОВЫМ  
МЕТОДОМ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ  
ИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ЭТИХ СИСТЕМ**

I. E. Starostin

**SOFTWARE IMPLEMENTATION OF SOLVING BY POTENTIAL-STREAMING  
METHOD THE PROBLEMS OF CONSTRUCTION OF SYSTEM MODELS  
FROM TEST RESULTS OF THESE SYSTEMS**

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* При проектировании и создании технических объектов, в частности компонентов авиационных систем, встает вопрос о надежности и качестве их эксплуатации. Пути повышения надежности и качества эксплуатации систем являются: диагностика и прогнозирование, а также управление этими объектами. Для решения описанных задач необходима математическая модель исследуемого технического объекта, которая автором получается из анализа физико-химических процессов потенциально-потокным методом и из результатов испытания этих систем. Трудоемкость описанных действий обуславливает необходимость их программной реализации, в общем случае распределенной (если размерность системы большая). Целью настоящей работы является разработка методов программной реализации построения математических моделей технических объектов из потенциально-потокных уравнений процессов в них и результатов испытания этих объектов. *Материалы и методы.* Потенциально-потокный метод был программно реализован автором с использованием модельно-ориентированного проектирования (стандарт modelica). Программно реализуется расчет различных динамик физико-химических процессов при различных параметрах потенциально-потокных уравнений с дальнейшей аппроксимацией на множестве этих возможных динамик формальной модели в их заданном классе. Экспериментальные исследования формальных параметров этих моделей с дальнейшим построением моделей (из формальных моделей) осуществляются статистическими методами. *Результаты.* На основе описанных методов в настоящей работе представляется структура программной реализации методов построения математических моделей систем из анализа физико-химических процессов в них и результатов испытаний этих систем. *Выводы.* Результаты работы позволяют создать программно-аппаратный комплекс, позволяющий из за-

**Abstract.** *Background.* When designing and creating technical facilities, in particular components of aviation systems, the question arises of the reliability and quality of their operation. Ways to improve the reliability and quality of operation of systems are: diagnostics and forecasting, as well as the management of these objects. To solve the described problems, a mathematical model of the studied technical object is required, which the author obtains from the analysis of physical and chemical processes by the potential-streaming method and from the results of testing these systems. The complexity of the described actions necessitates their software implementation, generally distributed (if the dimension of the system is large). The aim of this work is to develop methods for the software implementation of the construction of mathematical models of technical objects from potential-streaming equations of processes in them and the results of testing these objects. *Materials and methods.* The potential-streaming method was implemented by the author using model-oriented design (modelica standard). The software implements the calculation of various dynamics of physicochemical processes at various parameters of potential-streaming equations with further approximation on the set of these possible dynamics of the formal model in their given class. Experimental studies of the formal parameters of these models with the further construction of models (from formal models) are carried out by statistical methods. *Results.* Based on the described methods, the present paper presents the structure of the software implementation of the methods for constructing mathematical models of systems from the analysis of physical and chemical processes in them and the test results of these systems. *Conclusions.* The results of the work make it possible to create a hardware-software complex that allows one to build formal mathematical models from a user-defined structure of physicochemical processes in a technical object, and then build mathematical models of these systems from available experimental data (in particular, collected by this complex). Because in the general

данной пользователем структуры физико-химических процессов в техническом объекте строить формальные математические модели, затем из имеющихся экспериментальных данных (в частности, собранных этим комплексом) строить математические модели этих систем. Так как в общем случае этот комплекс представляет собой горизонтально масштабируемый вычислительный кластер, то это дает возможность строить описанные модели систем произвольной сложности.

**Ключевые слова:** технические объекты, надежность и качество эксплуатации, потенциально-поточный метод, математическое моделирование.

case, this complex is a horizontally scalable computing cluster, this makes it possible to build the described models of systems of arbitrary complexity.

**Keywords:** technical objects, reliability and quality of operation, potential-streaming method, mathematical modeling.

## Введение

В процессе проектирования и эксплуатации технических объектов (ТО) принципиальная роль отводится обеспечению надежности и качеству их эксплуатации [1]. Для обеспечения этих показателей ТО необходимо обеспечить их допустимые (и оптимальные) режимы работы [1]. Этим целям служит диагностика и прогнозирование технического состояния рассматриваемого ТО [2], а также управление этим объектом [3]; в частности, выбор его параметров. Для решения описанных задач [2, 3] необходима математическая модель рассматриваемого ТО [2–5] – связь одних характеристик этого объекта с другими [6, 7].

Как известно, функционирование ТО определяется протеканием физико-химических процессов (ФХП) в этих объектах [1]. Отсюда автором в работах [6–8] было рассмотрено построение математических моделей рассматриваемых ТО из анализа ФХП в них на основе результатов испытаний этих объектов (в общем случае статистики наблюдений данных характеристик ТО [7]) [6–8]. В общем случае для анализа и математического моделирования динамики ФХП автором в рамках современной неравновесной термодинамики [9–12] был разработан потенциально-поточный метод (ППМ) [12–16] – единый подход анализа и моделирования ФХП различной природы [12, 13]. Получим систему уравнений ППМ, мы эту систему численно-аналитическими методами приводим к виду, представляющему собой связь одних технических характеристик ТО с другими (с наблюдаемыми) [6–8, 17]. Получение такой связи заключается в задании различных значений неизвестных параметров, входящих в уравнения ППМ, расчета для этих неизвестных параметров динамик ФХП и соответственно технических характеристик рассматриваемого ТО и затем аппроксимации на этих различных технических характеристиках математической модели (с точностью до параметров (формальных параметров) – формальной модели) рассматриваемого ТО. Затем эти формальные параметры исследуются на основе экспериментальных данных (ЭД). Исследовав экспериментально эти формальные параметры, мы на основе формальной модели ТО получим искомую модель ТО (в общем случае вероятностную [7]) [6–8, 17].

Отсюда, как нетрудно видеть, построение математической модели ТО из анализа ФХП в нем – достаточно трудоемкий процесс. Это приводит к необходимости программной реализации этой методологии. Более того, в общем случае ФХП в этом объекте могут иметь большое число степеней свободы; благодаря чему система уравнений этих процессов не влезет в память. В таком случае, а также в целях ускорения расчета необходимо распараллеливание расчета на нескольких вычислительных машинах – в вычислительном кластере.

Настоящая работа посвящена программной реализации (с учетом распараллеливания) описанной методологии построения математической модели произвольного заданного ТО на основе ЭД из анализа ФХП в нем.

## Потенциально-поточный метод

В соответствие с ППМ динамика ФХП в произвольном ТО определяется факторами, показанными на рис. 1 [12, 13].



Рис. 1. Факторы, определяющие динамику физико-химических процессов

Для получения из этих уравнений в численном виде динамики ФХП необходима информация о свойствах веществ и процессов в этой системе, начальное состояние системы, неизвестные внешние воздействия, получаемые из ЭД [12, 13]. Эти ЭД представляют собой снятые экспериментально наблюдаемые технические характеристики (ТХ) ТО [13]. Однако однозначно эти величины из экспериментальных данных в общем случае определить нельзя [6, 8, 13]; это и приводит к необходимости преобразования (численно-аналитическими методами) уравнений ППМ к такому виду, в котором эти описанные неизвестные величины уходят, а остаются лишь ТХ, в том числе и те, которые мы можем получить из ЭД [6–8, 17].

В работе [13] рассматривались различные виды программной реализации ППМ, в том числе и в виде блок-диаграмм. Как показано в работе [15], такое представление ФХП в виде блочных диаграмм позволяет выполнять декомпозицию этих процессов, что в свою очередь позволяет распараллелить вычисление динамики ФХП на разных машинах [18].

### Распределенное вычисление динамики физико-химических процессов потенциально-потокным методом

Пусть ППМ была получена система дифференциальных уравнений динамики ФХП в ТО [12–14], представляемая в общем случае в виде Коши:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t)), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (1)$$

$$y(t) = g[x(\tau), u(\tau)](t), \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (2)$$

где  $x(t)$  – координаты состояния [12, 13];  $u(t)$  – внешние воздействия;  $y(t)$  – ТХ системы (и их производные);  $x_0$  – начальное состояние в начальный момент времени  $t_0$ ;  $T$  – время моделирования системы. В общем случае нам систему (1) и (2) необходимо декомпоновывать на части, каждая из которых помещается в памяти компьютера [18], и обрабатывать ее по частям [18]. Используя декомпозицию ФХП на подпроцессы [15], мы систему (1) представим в виде

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \tilde{f}_i(x_i(t), u_i(t), s_i(t)), \quad s_i(t) = h_i(x(t), u(t)), \quad x_i(t_0) = x_{0,i}, \quad i = 1, n, \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (3)$$

$$y_i(t) = g_i[x_i(\tau), u_i(\tau), s_i(\tau)](t), \quad i = 1, n, \quad x(t) = \{x_i(t)\}_{i=1}^n, \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (4)$$

где  $n$  – число подгрупп, на которые мы декомпоуем ФХП; величины  $u_i(t)$ ,  $i = 1, n$  входят в число величин  $u(t)$  в любой момент времени  $t$ . Получив представление (3) и (4) системы (1) и (2), мы,

введя промежуточные динамики (ПД) [15], а также разбив  $[t_0; t_0 + T]$  на промежутки  $[t_0; t_0 + T] = \bigcup_{r=0}^{N-1} [t_r; t_{r+1}]$ , где  $t_0 + T = t_N$ , запишем

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t)}{dt} &= \tilde{\mathbf{f}}_i(\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t), \mathbf{u}_i(t), \mathbf{s}_i^{(k)}(t)), \quad \mathbf{s}_i^{(k)}(t) = \mathbf{h}_i(\mathbf{x}^{(k)}(t), \mathbf{u}(t)), \\ \mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_0) &= \mathbf{x}_{0,i}, \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_i^{(k)}(t) = \mathbf{g}_i[\mathbf{x}_i^{(k)}(t), \mathbf{u}_i(t), \mathbf{s}_i^{(k)}(t)], \quad i = 1, n, \quad \mathbf{x}^{(k)}(t) = \{\mathbf{x}_i^{(k)}(t)\}_{i=1}^n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \quad (6)$$

где  $k$  – номер итерации. Здесь  $\mathbf{s}_i^{(k)}(t)$ ,  $i = 1, n$  – ПД [15]. В силу условий Липшица [19] итерации (5) и (6) равномерно сходятся к решению системы (3) и (4).

С этой целью представим выражения (3) и (5) в интегральном виде [19]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t) &= \mathbf{x}_i(t_r) + \int_{t_r}^t \tilde{\mathbf{f}}_i(\mathbf{x}_i(t'), \mathbf{u}_i(t'), \mathbf{s}_i(t')) dt', \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \\ \mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) &= \mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) + \int_{t_r}^t \tilde{\mathbf{f}}_i(\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t'), \mathbf{u}_i(t'), \mathbf{s}_i^{(k)}(t')) dt', \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \end{aligned}$$

отсюда в силу условий Липшица [19], в силу неравенства треугольника, а также в силу теоремы об интегрировании неравенств имеем (норма вектора-столбца – сумма модулей каждой координаты вектора-столбца)

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}_i(t)\| &= \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}_i(t_r)\| + \int_{t_r}^t (\|\tilde{L}_x^i \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t') - \mathbf{x}_i(t')\| + \tilde{L}_s^i \|\mathbf{s}_i^{(k)}(t') - \mathbf{s}_i(t')\|) dt', \\ i &= 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \end{aligned}$$

отсюда в силу леммы Гронуола [19] имеем

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}_i(t)\| &\leq (\|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}_i(t_r)\| + \tilde{L}_s^i \|\mathbf{s}_i^{(k)}(t') - \mathbf{s}_i(t')\| \Delta t_r) \exp(\tilde{L}_x^i \Delta t_r), \quad i = 1, n, \\ t &\in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\Delta t_r = t_{r+1} - t_r. \quad (8)$$

Согласно (3) и (5) в силу условий Липшица [19] имеем

$$\|\mathbf{s}_i^{(k)}(t) - \mathbf{s}_i(t)\| = L_s^i \|\mathbf{x}^{(k)}(t) - \mathbf{x}(t)\|, \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \quad (9)$$

отсюда в силу (7) имеем

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}_i(t)\| &\leq (\|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}_i(t_r)\| + \tilde{L}_s^i L_x^i \|\mathbf{x}^{(k)}(t) - \mathbf{x}(t)\| \Delta t_r) \exp(\tilde{L}_x^i \Delta t_r), \\ i &= 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \end{aligned}$$

отсюда, введя обозначение

$$q = n \tilde{L}_s^i L_x^i \Delta t_r \exp(\tilde{L}_x^i \Delta t_r), \quad (10)$$

получим окончательно, просуммировав по всем индексам  $i$ :

$$\|\mathbf{x}^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}(t)\| \leq \|\mathbf{x}^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}(t_r)\| \exp(\tilde{L}_x^i \Delta t_r) + q \|\mathbf{x}^{(k)}(t) - \mathbf{x}(t)\|, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1. \quad (11)$$

Возьмем, используя (8), разбиение  $[t_0; t_0 + T] = \bigcup_{r=0}^{N-1} [t_r; t_{r+1}]$ ,  $t_0 + T = t_N$  таким образом, чтобы

$$nL_s^{\bar{t}} L_x^h \Delta t_r \exp(L_x^{\bar{t}} \Delta t_r) < 1;$$

отсюда в силу (10) имеем

$$q < 1. \quad (12)$$

Рассмотрим  $r = 0$ . Выражение (11) в таком случае в силу (3) и (5) примет вид

$$\|\mathbf{x}^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}^{(k)}(t)\| \leq q \|\mathbf{x}^{(k)}(t) - \mathbf{x}(t)\|, \quad t \in [t_0; t_1];$$

отсюда следует равномерная сходимость  $\mathbf{x}^{(k)}(t)$  к  $\mathbf{x}(t)$  при  $t \in [t_0; t_1]$  в случае  $r = 0$ . Отсюда для  $r = 1$  из (11) вытекает равномерная сходимость  $\mathbf{x}^{(k)}(t)$  к  $\mathbf{x}(t)$  при  $t \in [t_1; t_2]$ . Аналогично для произвольных  $r$  можно доказать равномерную сходимость  $\mathbf{x}^{(k)}(t)$  к  $\mathbf{x}(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N-1$ .

Из равномерной сходимости  $\mathbf{x}^{(k)}(t)$  к  $\mathbf{x}(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N-1$  в силу (9) вытекает равномерная сходимость  $\mathbf{s}^{(k)}(t)$  к  $\mathbf{s}(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N-1$ . Отсюда в силу (4) и (6) вытекает равномерная сходимость ТХ  $\mathbf{y}^{(k)}(t)$  к  $\mathbf{y}(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N-1$  из свойств непрерывности соответствующих функционалов в (4) и (6).

Итак, мы видим, что итерации (5) и (6) сходятся к решению (1) и (2), эквивалентных (3) и (4). ПД в (5) и (6) мы вводим путем описанных в [15] разрывов по термодинамическим силам, координатам состояния, коэффициентам кинетических матриц, связи которых более слабые, чем те, которые мы сохраняем [15]. Это делает возможным брать разбиение  $[t_0; t_0 + T] = \bigcup_{r=0}^{N-1} [t_r; t_{r+1}]$ ,  $t_0 + T = t_N$  на меньшее число отрезков, что упрощает расчет и уменьшает число итераций (видно из (10) и (11)).

Таким образом, выражения (5) и (6) представляют собой итерации, которые мы реализовываем независимо друг от друга (параллельно [18]) с последующим уточнением результата моделирования (синхронизация путем обмена сообщениями [18]). На одном компьютере итерации (5) и (6) также распараллеливаются средствами моделирующей среды (modelica), основанной на аппаратной конфигурации [18], на создании потоков [18]. Примером среды modelica, в которой реализован потенциально-поточный метод, является scilab [13]. В соответствии с работами [6, 8] эти итерации крутятся для каждой совокупности значений неизвестных параметров, входящих в потенциально-поточные уравнения.

### Распределенное построение математической модели

В работе [17] было показано, что математическая модель произвольного заданного ТО строится (из уравнений ППМ) по частям, т.е. сложные модели в этом множестве сводятся к частным (более простым) моделям, настраиваются параметры этих простых моделей, затем эти частные модели объединяются в более общую модель [17]. В общем случае такие модели имеют вид [6–8, 17]

$$\mathbf{y}^{(o)}(t) = \mathbf{q}(\mathbf{y}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{w}, \mathbf{p}), \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (13)$$

где  $\mathbf{y}^{(o)}(t)$  – ТХ системы  $\mathbf{y}(t)$ , являющиеся выходными параметрами модели (ненаблюдаемые ТХ системы);  $\mathbf{y}^{(i)}(t)$  – ТХ системы  $\mathbf{y}(t)$ , являющиеся входными параметрами модели (наблюдаемые ТХ системы);  $\bar{\mathbf{u}}(t)$  – известные внешние воздействия на систему  $\mathbf{u}(t)$  (и их производные);  $\mathbf{p}$  – настраиваемые параметры модели;  $\mathbf{w}$  – формальные параметры модели [6, 8, 17]. Эти параметры  $\mathbf{p}$  настраиваются на множестве динамик ТХ, полученных из уравнений ППМ (рис. 1) для различных совокупностей значений неизвестных параметров уравнений ППМ [6–8, 17]. Из всего множества моделей (13) выбирается та модель, которая после настройки параметров  $\mathbf{p}$  лучше

описывает связь между ТХ объекта и известными внешними воздействиями на рассматриваемый ТО, вытекающую из потенциально-поточковых уравнений ФХП в нем [6–8, 17].

Упомянутая выше и в работе [17] декомпозиция модели (13) аналогична описанной в работе [15] декомпозиции уравнений ППМ. С этой целью, как и ранее, уравнение (13) представим в виде (вытекает из [17])

$$\mathbf{y}_j^{(o)}(t) = \mathbf{q}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \mathbf{p}_j, \bar{\mathbf{s}}_j(t)), \quad \bar{\mathbf{s}}_j(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}), \quad t \in [t_{0,j}; t_{0,j} + T_j], \quad j = 1, n_m, \quad (14)$$

где  $\mathbf{y}_j^{(o)}(t)$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$  – все или некоторые ненаблюдаемые ТХ объекта  $\mathbf{y}^{(o)}(t)$  в  $j$ -м представлении модели (13);  $\mathbf{y}_j^{(i)}(t)$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$  – все или некоторые наблюдаемые ТХ объекта  $\mathbf{y}^{(i)}(t)$  в  $j$ -м представлении модели (13);  $\bar{\mathbf{u}}_j(t)$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$  – все или некоторые известные внешние воздействия на объект  $\bar{\mathbf{u}}(t)$  в  $j$ -м представлении модели (13);  $\mathbf{p}_j$ ,  $j = 1, n_m$  – некоторые настраиваемые параметры  $\mathbf{p}$  модели (13) в  $j$ -м ее представлении;  $[t_{0,j}; t_{0,j} + T_j] \subset [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$ , причем отрезки  $[t_{0,j}; t_{0,j} + T_j]$ ,  $j = 1, n_m$  полностью покрывают отрезок  $[t_0; t_0 + T]$ ;  $n_m$  – число представлений (14) модели (13).

Используя (14), модели (13) сведем к упрощенным частным моделям (аналогично [17]):

$$\mathbf{y}_j^{(o)}(t) = \mathbf{q}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \mathbf{p}_j^{(k+1)}, \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)), \quad \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}^{(k)}), \quad t \in [t_{0,j}; t_{0,j} + T_j], \quad j = 1, n_m, \quad (15)$$

где  $k$  – номер итерации. На каждой  $k$ -й итерации  $\mathbf{p}_j^{(k+1)}$ ,  $j = 1, n_m$  находится путем аппроксимации динамик ТО, полученных из уравнений ППМ (рис. 1) при различных значениях неизвестных параметров, входящих в эти уравнения (методами [6–8]), при фиксированных  $\bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)$ ,  $j = 1, n_m$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ . Отсюда в силу сказанного выше (в том числе и в силу (15)) параметры  $\mathbf{p}_j^{(k+1)}$ ,  $j = 1, n_m$  являются функционалом  $\bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)$ ,  $\mathbf{y}_j^{(o)}(t)$ ,  $\mathbf{y}_j^{(i)}(t)$ ,  $\bar{\mathbf{u}}_j(t)$ ,  $j = 1, n_m$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ :

$$\mathbf{p}_j^{(k+1)} = \mathbf{r}_j[\mathbf{y}_j^{(o)}(t), \mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)], \quad \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}^{(k)}), \quad j = 1, n_m. \quad (16)$$

Выстроив аналогичные рассуждения для (14), получим

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{r}_j[\mathbf{y}_j^{(o)}(t), \mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \bar{\mathbf{s}}_j(t)], \quad \bar{\mathbf{s}}_j(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}), \quad j = 1, n_m. \quad (17)$$

Полученное выражение (16) представляет собой прямые итерации [20]. Если в (16) выполняется условие сходимости прямых итераций [20], то эти итерации сходятся к (17) [20], т.е.  $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{p}^{(k)} = \mathbf{p}$  [20]. Таким образом, выражения (15) являются частными моделями (13) тогда и только тогда, когда выполняются условия сходимости прямых итераций (16).

Модели (15) выбираются еще и так, чтобы они по частям поместились в памяти ЭВМ. Это дает возможность частные модели настраивать, используя (16), параллельно на разных ЭВМ на каждой итерации. Затем эти итерации повторяются. Получив формальную модель ТО, мы также в параллель на разных компьютерах исследуем статистическими методами из ЭД формальные параметры полученных моделей, получив тем самым модель системы [7].

### Структура программно-аппаратного комплекса, реализующего формализм построения математических моделей технических объектов

Описанные операции стадий построения математической модели ТО выполняются в моделирующей среде (modelica, например, scilab/xcos), которая запускается на каждой ЭВМ (рис. 2). Эти компьютеры координируются специальной распределенной программой, реализующей запуск моделирующей среды на каждом компьютере, базу данных (блок-схем различных ФХП, функций моделей систем, функций состояний для свойств веществ и процессов), а также взаимодействующий с пользовательским интерфейсом (рис. 2) [18].

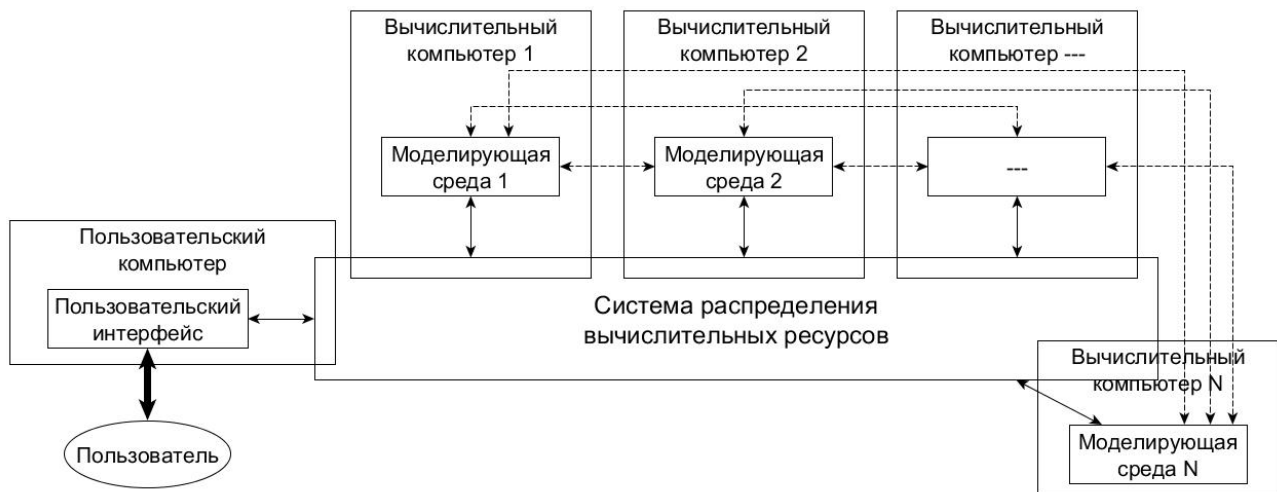


Рис. 2. Структура программной реализации построения модели технического объекта.  
Пунктирные линии – обмен сообщениями между вычислительными процессами

Также возможно подключение панели сбора данных на некоторые компьютеры со сбором ЭД и с заданием управляющего сигнала. Обработку собранных ЭД, а также планирование управляющих воздействий можно реализовать в моделирующей среде.

Пользовательский интерфейс включает в себя генерацию кода, отображение модели ТО, закон управления ТО, выбранные параметры ТО, и т.д.

### Заключение

Итак, в настоящей работе была получена структура программной реализации методологии построения математической модели ТО из анализа ФХП в нем и ЭД. Так как эта реализация подразумевает распараллеливание по разным компьютерам, а также эта система горизонтально масштабируемая, то такая реализация позволит решать задачи построения модели произвольной сложности со сбором необходимых экспериментальных данных и экспериментальной проверкой полученной модели (благодаря панели сбора данных и задания сигнала).

### Библиографический список

1. Старостин, И. Е. К проблеме программной реализации методов моделирования и идентификации параметров физико-химических процессов в энергетике / И. Е. Старостин, А. Г. Степанкин, М. Л. Тюляев, В. В. Лавров // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : сб. тр. XIV Всерос. науч.-техн. конф. – Москва : Экспериментальная мастерская «НаукаСофт», 2017. – С. 498–508.
2. Колодежный, Л. П. Надежность и техническая диагностика : учебник для вузов / Л. П. Колодежный, А. В. Чернодаров. – Москва : ВУНЦ ВВС ВВА им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. – 452 с.
3. Бессекерский, В. А. Теория систем автоматического управления : учебник / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 752 с.
4. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления : цикл лекций / П. Д. Крутько. – Москва : Машиностроение, 2004. – 576 с.
5. Харьков, В. П. Адаптивное управление динамической системой на основе обратных задач динамики / В. П. Харьков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 176–177.
6. Starostin, I. E. Identification of system models from potential-stream equations of the basis of deep learning on experimental data / I. E. Starostin, S. P. Khaluytin // Civil Aviation High Technologies. – 2020. – Vol. 23 (2). – P. 47–58.
7. Старостин, И. Е. Получение моделей надежности технических объектов из потенциально-поточковых уравнений физико-химических процессов в этих объектах / И. Е. Старостин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 6–13.
8. Старостин, И. Е. К вопросу программной реализации методики получения математической модели эксплуатируемого объекта из потенциально-поточковых уравнений физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Научные горизонты. – 2019. – № 11 (27). – С. 214–230.

9. Эткин, В. А. Энергодинамика: синтез теорий переноса и преобразования энергии : монография / В. А. Эткин. – Санкт-Петербург : Наука, 2008. – 409 с.
10. Jou, D. Extended irreversible thermodynamics / D. Jou, J. Casas-Vázquez, G. Lebon. – New York, USA : Springer, 2006. – 528 p.
11. Полак, Л. С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение : монография / Л. С. Полак. – Москва : Наука, 1979. – 248 с.
12. Starostin, I. E. Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic : monograph / I. E. Starostin, V. I. Bykov. – Raleigh (North Carolina, USA) : Open Science Publishing, 2017. – 229 p.
13. Старостин, И. Е. Программная реализация методов современной неравновесной термодинамики и система симуляции физико-химических процессов SimulationNonEqProcSS v.0.1.0 : монография / И. Е. Старостин, А. Г. Степанкин. – Бо Бассен, Маврикий : Lambert academic publishing, 2019. – 127 с.
14. Старостин, И. Е. Алгоритм численного интегрирования потенциально-поточковых уравнений в сосредоточенных параметрах с контролем корректности приближенного решения / И. Е. Старостин // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 479–493.
15. Старостин, И. Е. Упрощение потенциально-поточковых уравнений динамики физико-химических процессов для получения математической модели системы / И. Е. Старостин, С. П. Халютин, В. И. Быков // Сложные системы. – 2019. – № 3 (32). – С. 82–97.
16. Старостин, И. Е. Задание функций состояния для величин, входящих в формализм потенциально-поточкового метода описания динамики физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Инновационные информационные и коммуникационные технологии : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Москва : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2019. – С. 317–322.
17. Старостин, И. Е. Программная реализация на базе СКМ Scilab методологии построения математической модели системы из уравнений физико-химических процессов в ней / И. Е. Старостин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2020. – Т. 1. – С. 41–44.
18. Воеводин, В. В. Параллельные вычисления : учеб. пособие / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
19. Сансоне, Дж. Обыкновенные дифференциальные уравнения : монография / Дж. Сансоне. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1953. – 346 с.
20. Калиткин, Н. Н. Численные методы : учебник для вузов / Н. Н. Калиткин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.

### References

1. Starostin I. E., Stepankin A. G., Tyulyaev M. L., Lavrov V. V. *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N. E. Zhukovskogo: sb. tr. XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky: proceedings of the XIV all-Russian scientific and technical conference]. Moscow: Eksperimental'naya masterskaya «NaukaSoft», 2017, pp. 498–508. [In Russian]
2. Kolodezhnyy L. P., Chernodarov A. V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika: uchebnik dlya vuzov* [Reliability and technical diagnostics: textbook for Universities]. Moscow: VUNTs VVS VVA im. N. E. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina, 2010, 452 p. [In Russian]
3. Bessekerskiy V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik* [Theory of automatic control systems: textbook]. Saint-Petersburg: Professiya, 2003, 752 p. [In Russian]
4. Krut'ko P. D. *Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravleniya: tsikl lektsiy* [Inverse problems of dynamics in automatic control theory: a series of lectures]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 576 p. [In Russian]
5. Khar'kov V. P. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 176–177. [In Russian]
6. Starostin I. E., Khaluytin S. P. *Civil Aviation High Technologies*. 2020, vol. 23 (2), pp. 47–58.
7. Starostin I. E. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2020, no. 1 (29), pp. 6–13. [In Russian]
8. Starostin I. E. *Nauchnye gorizonty* [Scientific horizons]. 2019, no. 11 (27), pp. 214–230. [In Russian]
9. Etkin V. A. *Energodinamika: sintez teoriy perenosa i preobrazovaniya energii: monografiya* [Energy dynamics: synthesis of energy transfer and transformation theories: monograph]. Saint-Petersburg: Nauka, 2008, 409 p. [In Russian]
10. Jou D., Casas-Vázquez J., Lebon G. *Extended irreversible thermodynamics*. New York, USA: Springer, 2006, 528 p.
11. Polak L. S. *Neravnovesnaya khimicheskaya kinetika i ee primeneniye: monografiya* [Non-equilibrium chemical kinetics and its application : a monograph]. Moscow: Nauka, 1979, 248 p. [In Russian]
12. Starostin I. E., Bykov V. I. *Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic: monograph*. Raleigh (North Carolina, USA): Open Science Publishing, 2017, 229 p.



13. Starostin I. E., Stepankin A. G. *Programmnaya realizatsiya metodov sovremennoy neravnovesnoy termodinamiki i sistema simulyatsii fiziko-khimicheskikh protsessov SimulationNonEqProcSS v.0.1.0: monografiya* [Software implementation of methods of modern non-equilibrium thermodynamics and a system for simulating physical and chemical processes SimulationNonEqProcSS V. 0. 1. 0: monograph]. Bo Bassen, Mavrikiy: Lambert academic publishing, 2019, 127 p. [In Russian]
14. Starostin I. E. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling]. 2014, vol. 6, no. 4, pp. 479–493. [In Russian]
15. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Bykov V. I. *Slozhnye sistemy* [Complex system]. 2019, no. 3 (32), pp. 82–97. [In Russian]
16. Starostin I. E. *Innovatsionnye informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Innovative information and communication technologies: proceedings of the XVI international conference. scientific-practical conf.]. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 2019, pp. 317–322. [In Russian]
17. Starostin I. E. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2020, vol. 1, pp. 41–44. [In Russian]
18. Voevodin V. V., Voevodin V. V. *Parallel'nye vychisleniya: ucheb. posobie* [Parallel computing: tutorial]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002, 608 p. [In Russian]
19. Sansone Dzh. *Obyknovennyye differentsial'nye uravneniya: monografiya* [Ordinary differential equations: monograph]. Moscow: Izd-vo inostrannoy literatury, 1953, 346 p. [In Russian]
20. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody: uchebnik dlya vuzov* [Numerical methods: textbook for Universities]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 592 p. [In Russian]

**Старостин Игорь Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра электротехники  
и авиационного электрооборудования,  
Московский государственный технический  
университет гражданской авиации  
(Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)  
E-mail: starostinigo@yandex.ru

**Starostin Igor' Evgen'evich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of electrical engineering  
and aviation electrical equipment,  
Moscow State Technical  
University of Civil Aviation  
(20 Kronshtadtsky Boulevard, Moscow, Russia)

**Образец цитирования:**

Старостин, И. Е. Программная реализация решения потенциально-потокowym методом задач построения моделей систем из результатов испытаний этих систем / И. Е. Старостин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 128–136. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-15.