

УДК 001.8
ББК 72+30
В 38

Главный редактор
доктор экономических наук
профессор Г. П. Беляков

Заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук
профессор С. И. Сенашов

Редакционная коллегия:
Т. В. Зеленская, А. Н. Ловчиков, А. В. Медведев,
В. А. Охорзин, А. С. Павлов (отв. секретарь), А. С. Паршин,
З. Г. Сангадиев, В. Г. Сомов, В. В. Филатов,
Ю. А. Филиппов, Л. Г. Шаймарданов

Учредитель
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева

Издание зарегистрировано
Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия

Издание включено ВАК России в «Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»

Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика
В 38 М. Ф. Решетнева / под ред. проф. Г. П. Белякова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Вып. 7. – Красно-
ярск, 2005. – 160 с.

УДК 001.8
ББК 72+30

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ОДНОМЕРНЫЙ ПОТОК ГРАНУЛИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

Получено решение задачи Коши для системы уравнений, описывающей одномерный поток гранулированного материала, с использованием законов сохранения специального вида.

В работе [1] описана математическая модель потока частиц гранулированного материала, уравнения которой содержали высоту и среднюю скорость в глубине потока как функцию времени и тангенса угла наклона направления потока к вертикальной оси. В [2] были выведены уравнения в более общей форме для одномерного потока гранул в движущемся цилиндре. В [3] было проведено подробное исследование таких уравнений, найдены их инвариантные решения. Ниже представлено решение задачи Коши для системы, полученной в [2], с использованием законов сохранения специального вида.

Будем искать функции $u(x, t)$ и $h(x, t)$, удовлетворяющие системе

$$h_t + uh_x + u_x h = 0, \quad u_t + uu_x + \beta h_x = 0 \quad (1)$$

и условиям

$$h(x, 0) = h_0(x), \quad u(x, 0) \equiv 0, \quad (2)$$

где h – толщина; u – средняя скорость частиц в глубине потока; t – время; x – пространственная координата; $h_0(x)$ – непрерывная финитная функция, $\beta = \text{const}$.

Введем следующие обозначения: $[a, b]$ – носитель функции $h_0(x)$, $M = (l_1, 0)$, $N = (l_2, 0)$, $a \leq l_1 \leq l_2 \leq b$.

Уравнения характеристик системы (1) и их соотношения следующие:

$$dx = (u \pm \sqrt{\beta h})dt, \quad u \pm 2\sqrt{\beta h} = \text{const}$$

Законы сохранения для системы (1) можно записать в виде $A_t + B_x = 0$, где A и B – функции, зависящие только от u и h .

Следствия законов сохранения имеют вид

$$-h \cdot A_h - u \cdot A_u + B_u = 0, \quad -u \cdot A_h - \beta \cdot A_u + B_h = 0. \quad (3)$$

Характеристики системы (3) таковы, что $u \pm 2\sqrt{\beta h} = \text{const}$.

Сделаем замену $z = u + 2\sqrt{\beta h}$, $k = u - 2\sqrt{\beta h}$. Тогда система (3) в новых переменных имеет вид

$$z \cdot A_z = B_z, \quad k \cdot A_k = B_k. \quad (4)$$

Запишем закон сохранения в эквивалентной форме:

$$\int_{MNP} -Adx + Bdt = 0. \quad (5)$$

Проведем из точек M и N две характеристики различных семейств и обозначим точку пересечения P . Используя законы сохранения для однородных квазилинейных гиперболических систем [4], найдем координаты точки P и значение функций u и h в ней.

Представим интеграл по криволинейному треугольнику MNP в виде суммы трех слагаемых, учтем уравнения характеристик системы (1) и проинтегрируем по частям:

$$\begin{aligned} \int_{NP} -Adx + Bdt &= \int_{\{k=k_0\}} (-Au + A\sqrt{\beta h} + B)dt = t(-Au + A\sqrt{\beta h} + B)|_N^P - \\ &- \int_{\{k=k_0\}} t \cdot \partial_z (-Au + A\sqrt{\beta h} + B)dz. \end{aligned}$$

Положим

$$\partial_z \left((-Au + A\sqrt{\beta h} + B)|_{k=k_0} \right) = 0, \quad (6)$$

тогда

$$\begin{aligned} \int_{NP} -Adx + Bdt &= t_p (-Au + A\sqrt{\beta h} + B)|_p, \\ \int_{PM} -Adx + Bdt &= -t_p (-Au - A\sqrt{\beta h} + B)|_p \end{aligned}$$

при условии

$$\partial_k \left((-Au - A\sqrt{\beta h} + B)|_{z=z_0} \right) = 0. \quad (7)$$

Теперь равенство (5) примет вид

$$\int_{l_1}^{l_2} Adx = 2 t_p (A\sqrt{\beta h})|_p. \quad (8)$$

Функции A, B должны удовлетворять системе (4) и крайевым условиям (6), (7). Наиболее простое решение этой задачи такое:

$$A = (z - k_0)^{1/3} - (k - z_0)^{1/3} - (z_0 - k_0)^{1/3},$$

$$B = \frac{1}{4}(z - k_0)^{1/3}(z + 3k_0) - \frac{1}{4}(k - z_0)^{1/3}(k + 3z_0),$$

где $z_0 = 2\sqrt{\beta h_0(l_1)}$, $k_0 = -2\sqrt{\beta h_0(l_2)}$.

По формуле (8) окончательно получим:

$$\begin{aligned} t_p = \beta^{-1/2} \left(\sqrt{h_0(l_1)} + \sqrt{h_0(l_2)} \right)^{-1} (l_1 - l_2) + \beta^{-1/2} \times \\ \times \left(\sqrt{h_0(l_1)} + \sqrt{h_0(l_2)} \right)^{-4/3} \cdot \int_{l_1}^{l_2} \left(\left(\sqrt{h_0(x)} + \sqrt{h_0(l_1)} \right)^{1/3} + \right. \\ \left. + \left(\sqrt{h_0(x)} + \sqrt{h_0(l_2)} \right)^{1/3} \right) dx. \end{aligned} \quad (9)$$

Вернемся к интегралу (5). Рассуждая подобно тому, как описано выше, можем записать:

$$\begin{aligned} \int_{NP} -Adx + Bdt &= \int_{\{k=k_0\}} \left(-A + \frac{B}{u - \sqrt{\beta h}} \right) dx = \\ &= \left(-A + \frac{B}{u - \sqrt{\beta h}} \right) x \Big|_N^P - \int_{\{k=k_0\}} x \cdot \partial_k \left(-A + \frac{B}{u - \sqrt{\beta h}} \right) dz, \\ \int_{PM} -Adx + Bdt &= \\ &= \left(-A + \frac{B}{u + \sqrt{\beta h}} \right) x \Big|_P^M - \int_{\{z=z_0\}} x \cdot \partial_z \left(-A + \frac{B}{u + \sqrt{\beta h}} \right) dk. \end{aligned}$$

Будем искать функции A и B , удовлетворяющие системе (4) и условиям

$$\begin{aligned} \partial_z \left(\left(-A + \frac{B}{u - \sqrt{\beta h}} \right)_{k=k_0} \right) &= 0, \\ \partial_k \left(\left(-A + \frac{B}{u + \sqrt{\beta h}} \right)_{z=z_0} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Системы (4), (10) имеют следующие решения:

$$\begin{aligned} A &= \frac{4(z-k_0)^{1/3}}{(z_0-k_0)^{1/3}(z_0+3k_0)} - \frac{4(k-z_0)^{1/3}}{(z_0-k_0)^{1/3}(k_0+3z_0)}, \\ B &= \frac{(z-k_0)^{1/3}(z+3k_0)}{(z_0-k_0)^{1/3}(z_0+3k_0)} - \frac{(k-z_0)^{1/3}(k+3z_0)}{(z_0-k_0)^{1/3}(k_0+3z_0)} - 1. \end{aligned}$$

Отсюда равенство (5) примет вид

$$\begin{aligned} \int_{l_1}^{l_2} A dx &= 2 x_p \frac{B\sqrt{\beta h}}{(u + \sqrt{\beta h})(u - \sqrt{\beta h})} \Big|_p + \\ &+ l_2 \frac{Au - A\sqrt{\beta h} - B}{u - \sqrt{\beta h}} \Big|_{(l_2,0)} - l_1 \frac{Au + A\sqrt{\beta h} - B}{u + \sqrt{\beta h}} \Big|_{(l_1,0)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Учитывая выражения для t_0, k_0 , после упрощений получим:

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{4\sqrt{h_0(l_1)}\sqrt{h_0(l_2)}(l_1-l_2)}{(\sqrt{h_0(l_1)}-3\sqrt{h_0(l_2)})(\sqrt{h_0(l_1)}+\sqrt{h_0(l_2)})} - \\ &- \frac{4\sqrt{h_0(l_1)}\sqrt{h_0(l_2)}}{(\sqrt{h_0(l_1)}+\sqrt{h_0(l_2)})^{4/3}} \int_{l_1}^{l_2} \left(\frac{(\sqrt{h_0(x)}+\sqrt{h_0(l_2)})^{1/3}}{(\sqrt{h_0(l_1)}-3\sqrt{h_0(l_2)})} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\sqrt{h_0(x)}+\sqrt{h_0(l_1)})^{1/3}}{(3\sqrt{h_0(l_1)}-\sqrt{h_0(l_2)})} \right) dx. \end{aligned} \quad (12)$$

Значения функций в точке P следующие:

$$\begin{aligned} u(x_p, t_p) &= \sqrt{\beta} (\sqrt{h_0(l_1)} - \sqrt{h_0(l_2)}), \\ h(x_p, t_p) &= \frac{(\sqrt{h_0(l_1)} + \sqrt{h_0(l_2)})^2}{4}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, формулы (9), (12), (13) определяют функции $u(x, t)$ и $h(x, t)$ в криволинейном треугольнике, ограниченном отрезком $[a, b]$ оси X и характеристиками, проведенными из точек $(a, 0)$ и $(b, 0)$

Библиографический список

1. Savag, S. B. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline / S. B. Savag, K. Hutter // J. Fluid. 1989. P. 177–215.
2. Gray, N. Rapid Granular Avalanches / N. Gray // Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Vol. II. Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2003. P. 3–42.
3. Chugunov, V. Group Theoretic Methods and Computational Mechanics / V. Chugunov, N. Gray, K. Hutter // Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Vol. II. Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2003. P. 251–261.

O. N. Zhdanov

THE SOLUTION OF CAUCHY PROBLEM FOR SYSTEM, DESCRIBING ONE-DIMENSIONAL FLOWS OF GRANULAR MATERIAL

In this article we obtained the solution of Cauchy problem for system, using be the special class of loch conservation.

МЕТОД ОТСЕЧЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОДНОГО КЛАССА ЗАДАЧ УСЛОВНОЙ ПСЕВДОБУЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Исследуются свойства пространства булевых переменных, представленного в виде уровней произвольной точки. На основании доказанных утверждений строится алгоритм метода отсечений для решения одного класса задач условной псевдобулевой оптимизации – нахождения оптимального значения вещественной функции на уровне произвольной точки.

Метод локального поиска является основой большинства регулярных алгоритмов, разработанных для решения различных задач псевдобулевой оптимизации. Это самый простой и наиболее универсальный метод дискретной оптимизации. Для некоторых классов задач безусловной и условной оптимизации псевдобулевых функций (преимущественно монотонных) разработаны алгоритмы локального поиска, позволяющие найти локальный минимум за полиномиальное число вычислений. Однако для произвольных функций, в том числе и алгоритмически или неявно заданных, метод локального поиска не гарантирует своего вырождения в полный перебор. Поэтому в работах [1...3] автором был предложен метод отсечений, решающий эту проблему. Метод гарантирует исключение полного перебора при нахождении локального минимума любой функции на всем пространстве булевых переменных.

Но на практике задачи без ограничений встречаются достаточно редко. Поэтому исследование было продолжено в направлении решения задач с ограничениями. В данной статье рассматривается задача нахождения экстремума на подмножестве, называемом уровнем некоторой точки. К такой постановке сводится большой класс прикладных задач, например задача выбора системы информативных факторов. Для ее решения предлагается использовать схему метода отсечений, который, как и в случае безусловной оптимизации, гарантирует элиминацию полного перебора. Построенный алгоритм и исследованные свойства уровня произвольной точки будут использоваться для решения задач безусловной оптимизации и задач с произвольными видами ограничений.

Свойства пространства булевых переменных. Общая постановка задачи псевдобулевой оптимизации имеет вид

$$f(X) \rightarrow \text{extr}, \quad (1)$$

где $f: S \rightarrow R$; $S \subset B_2^n$; $B_2^n = B_2 \times B_2 \times \dots \times B_2$; $B_2 = \{0,1\}$.

Задача условной оптимизации, которую автор предлагает решать методом отсечений, имеет своим множеством допустимых решений векторы с фиксированным числом ненулевых компонент:

$$S = \{X \in B_2^n : \sum_{j=1}^n x_j = m, m < n\}. \quad (2)$$

Приведем необходимые определения и утверждения, принятые и доказанные в [4].

Определение 1. Точки $X^1, X^2 \in B_2^n$ назовем k -соседними, если они отличаются значениями k координат, $k = 1, n$. Однососедние точки будем называть просто соседними точками.

Определение 2. Множество $O_k(X) \in B_2^n$ всех точек, которые являются k -соседними к точке X , будем называть k -м уровнем точки X , $k = 1, n$. При этом $O_0(X) = X$.

В соответствии с этим определением, задачу (1), (2) можно называть задачей на m -м уровне нулевой точки $X^0(0, 0, \dots, 0)$.

Определение 3. Будем называть точку $X^* \in B_2^n$, для которой выполняется условие $f(X^*) < f(X) \forall X \in O_1(X^*)$, локальным минимумом функции $f(X)$.

Определение 4. Если псевдобулевая функция имеет только один локальный минимум на B_2^n , то будем говорить, что эта функция унимодальная.

Определение 5. Множество точек $W(X^0, X^l) = \{X^0, X^1, X^2, \dots, X^i, \dots, X^{l-1}, X^l\} \subset B_2^n$ назовем путем длины l между точками X^0 и X^l , если $\forall i = 1, l$ точка X^i является соседней к точке X^{i-1} .

Определение 6. Если $X^l \in O_k(X^0) \subset B_2^n$, то в случае когда $l = k$, путь $W(X^0, X^l)$ будем называть кратчайшим.

Определение 7. Унимодальную функцию $f(X)$ назовем разноточной на B_2^n , если для каждого кратчайшего пути $W(X^0, X^l)$, $X^l = X^*$ выполняется условие $f(X^i) \neq f(X^j)$ при $i \neq j$, где $X^i, X^j \in W(X^0, X^l)$, $i = 0, l$, $j = 0, l$.

Определение 8. Путь $W_f(X^0, X^l) \subset B_2^n$ назовем путем невозрастания функции $f(X)$, если $\forall X^i, X^{i-1} \in W_f(X^0, X^l)$, $i = 1, l$ выполняется условие $f(X^i) \leq f(X^{i-1})$, и путем убывания функции, если это неравенство строгое.

Лемма 1 [4]. $\forall X \in B_2^n : \text{card } O_k(X) = C_n^k$, где C_n^k – число сочетаний из n по k , $k = 0, n$.

Лемма 2 [4]. $\forall X \in B_2^n : B_2^n = \bigcup_{k=0}^n O_k(X)$.

Лемма 3 [4]. Для любой унимодальной разноточной на B_2^n функции $f(X)$ в каждой точке $X \in B_2^n \setminus \{X^*\}$ среди точек $X^j \in O_1(X)$, $j = 1, n$ найдется хотя бы одна такая точка X^{j_k} , что $f(X^{j_k}) < f(X)$.

Как следует по лемме 2, пространство B_2^n всегда можно представить в виде объединения n уровней произвольной точки $X \in B_2^n$ (в дальнейшем эту точку будем обозначать X^0). При этом любой уровень $O_k(X^0)$, $k = 1, n-1$ разбивает пространство B_2^n на два непустых непересекающихся подпространства, состоящих из объединения полных уровней X^0 :

$$V_1 = \bigcup_{i=0}^{k-1} O_i(X^0), \quad V_2 = \bigcup_{i=k+1}^n O_i(X^0).$$

Метод отсечений. На основании приведенных определений и утверждений автором в [1] был доказан ряд утверждений и предложен метод отсечений, общая схе-

ма которого для задачи безусловной псевдоболевой оптимизации выглядит следующим образом.

1. На первом этапе пространство решений B_2^n делим на два подпространства некоторым уровнем $O_k(X^0)$, $k = 1, n-1$. Он назван отсекающим уровнем.

2. Вычисляем значения функции в точках отсекающего уровня и делаем заключение, в каком из исследуемых подпространств находится минимум. Если минимум находится на отсекающем уровне, то останавливаем поиск и переходим к п. 4 схемы.

3. Подпространство, в котором находится минимум, снова делим на два подпространства новым отсекающим уровнем и переходим к п. 2 схемы.

4. Останавливаем поиск.

Подробное описание метода для задачи безусловной оптимизации приводится в [1].

Заметим, что деление подпространств на два проводится до тех пор, пока подпространство, содержащее X^* , не будет состоять из одного уровня (если, конечно, до этого не будет определен минимум). На этом последнем уровне и лежит точка, доставляющая минимальное значение функции.

Свобода выбора отсекающего уровня на каждом этапе позволяет строить ряд алгоритмов, отличающихся правилом определения номера отсекающего уровня в пп. 1 и 3 схемы. При отсутствии априорных сведений о функции естественно рассматривать средние уровни на каждом этапе алгоритма, а в качестве X^0 – нулевую точку. Под средним уровнем на этапе можно понимать уровень с номером, равным среднему арифметическому (целой части) номеров l и L , или же уровень, разбивающий подпространство, исследуемое на этапе, на два равномоощных или максимально близких по мощностям.

В работах [2; 5] автором строятся три алгоритма метода отсечений для задачи безусловной оптимизации уни-модальной разноточной функции.

Приведем верхнюю и нижнюю оценки числа вычислений для алгоритма 1, в котором средний уровень определяется как среднее арифметическое крайних уровней исследуемого подпространства.

Теорема 1 [2]. Определение точки минимума X^* уни-модальной разноточной на B_2^n функции алгоритмом 1 метода отсечений требует вычисления ее значений не менее чем в $C_n^{\lfloor n/2 \rfloor} + n$ и не более чем в $T_1(n)$ точках B_2^n ($n > 4$):

$$T_1(n) = \sum_{i=1}^{\lfloor \log_2(n-1) \rfloor} C_n^{j_i} + n \lfloor \log_2(n-1) \rfloor,$$

где $j_0 = 0$, $j_1 = \lfloor n/2 \rfloor$; $j_i = \lfloor (j_{i-1} + j_1)/2 \rfloor$; $i = 2, \lfloor \log_2(n-1) \rfloor$.

Следствие 1: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\text{card } B_2^n}{T_1(n)} = \infty$.

Следствие 2. $T_1(n) < 2^{n-1}$ для $n > 13$.

По приведенным оценкам видно, что верхняя оценка числа вычислений алгоритма 1 превосходит полный перебор в несколько раз. Для других алгоритмов показывается, что их оценки могут быть и лучше.

Метод отсечений на уровне. Рассмотрим теперь возможность использования метода отсечений для задачи (1), (2). Для этого введем несколько новых определений и

докажем утверждения необходимых для исследования свойств множества допустимых решений вида (2).

Лемма 4. Любая точка $X \in O_m(X^0)$ имеет только $2k$ -соседние к себе точки, лежащие на этом же уровне точки X^0 . При этом число $2k$ -соседних к X точек, лежащих на m -м уровне X^0 , определяется формулой $C_m^k C_{n-m}^k$, $k = 1, \min\{m, n-m\}$.

Доказательство. Не нарушая общности суждений, можно считать, что X^0 есть точка со всеми нулевыми компонентами. Тогда все точки, лежащие на m -м уровне точки X^0 , имеют ровно m единичных компонент. Таким образом, множество всех точек уровня получается всевозможными перестановками нулей и единиц. При этом не трудно видеть, что каждая перестановка меняет значение одной нулевой и одной единичной компоненты. Это ведет к тому, что все точки отличаются между собой только четным числом компонент. Конкретное же число $2k$ -соседних к X точек, лежащих на m -м уровне X^0 , определяется прямым подсчетом числа возможных перестановок единичных компонент.

Следствие 3. Множество всех точек m -го уровня точки $X^0 \in B_2^n$ может быть представлено как объединение всех $2k$ -соседних точек произвольной точки $X \in O_m(X^0)$. При этом

$$C_n^m = \sum_{k=0}^l C_n^k C_{n-m}^k,$$

где $l = \min\{m, n-m\}$.

Доказательство. Следует непосредственно по лемме 1 и лемме 4.

Определение 9. Назовем множество всех точек, $2k$ -соседних к X_m^0 и лежащих на m -м уровне точки X^0 , k -м условным уровнем (или k -м подуровнем) точки $X_m^0 \in O_m(X^0)$. Обозначим это множество $O_k(X^0, X_m^0) = O_m(X^0) \cap O_{2k}(X_m^0)$.

Лемма 5. $\forall X \in O_k(X^0, X_m^0)$:

$$O_2(X) \cap O_{k-1}(X^0, X_m^0) = k^2,$$

$$O_2(X) \cap O_{k+1}(X^0, X_m^0) = (m-k)(n-m-k),$$

$$O_2(X) \cap O_k(X^0, X_m^0) = k(n-2k).$$

Доказательство. Первые два равенства получаются простым комбинаторными вычислениями. Для удобства подсчета за X^0 следует взять нулевую точку, а за X_m^0 – точку с m единичными компонентами на первых m местах. Последнее равенство также можно получить прямым подсчетом или как разность: $m(n-m) - \{k^2 + (m-k)(n-m-k)\}$, где $m(n-m) = C_m^1 C_{n-m}^1$ – общее число двусоседних к X точек, лежащих на $O_m(X^0)$.

Определение 10. Точку $X_m^* \in B_2^n$ будем называть локальным минимумом m -го уровня точки $X^0 \in B_2^n$, если $\forall X \in O_m(X^0)$ выполняется условие $f(X_m^*) < f(X)$.

Подобным же образом определения 4...8 переносятся на m -й уровень точки $X^0 \in B_2^n$. В этих определениях будет справедлив и аналог леммы 3 на уровне.

Нетрудно видеть, что любой k -й условный уровень точки $X_m^0 \in O_m(X^0)$ ($k = 1, \min\{m, n-m\} - 1$) разбивает множество $O_m(X^0)$ на два непустых непересекающихся подпространства, состоящих из объединения полных условных уровней точки X_m^0 :

$$V_1^m = \bigcup_{i=0}^{k-1} O_i(X^0, X_m^0), V_2^m = \bigcup_{i=k+1}^{\min\{m, n-m\}} O_i(X^0, X_m^0).$$

Заметим, что в соответствии с леммой 4 максимальное число условных уровней на m -м уровне точки X_m^0 равно $\min\{m, n-m\}$ и не может превосходить $n/2$, причем достигаться значение $n/2$ может только на среднем уровне точки X^0 для четных значений n . И, в отличие от распределения точек B_2^n по уровням точки X^0 , распределение точек на ее m -м уровне уже не будет симметричным относительно какого-либо условного уровня, кроме случая когда $m = n/2$, а n – четное.

Обозначим через $X_{m,k}^*$ точку, определяемую по условию $f(X_{m,k}^*) = \min_{X \in O_k(X^0, X_m^0)} f(X)$. Иначе говоря,

точка $X_{m,k}^*$ доставляет наименьшее значение функции $f(X)$ на k -м условном уровне точки X_m^0 . При этом она может быть не единственной.

Лемма 6. Для $\forall k = 0, \min\{m, n-m\} - 2$, $m = 2, n - 2$ любая точка $X' \in O_k(X^0, X_m^0)$ не имеет двусоседних точек на условном уровне $O_{k+2}(X^0, X_m^0)$.

Доказательство. Не нарушая общности суждений, будем полагать, что у X^0 все координаты нулевые, а X_m^0 имеет ровно m единичных компонент, которые стоят на первых m местах. Тогда любая точка $X' \in O_k(X^0, X_m^0)$ будет иметь $m-k$ единиц среди первых m компонент и k единиц среди последних $(n-m)$ компонент. Любая же точка $X'' \in O_{k+2}(X^0, X_m^0)$ будет иметь $m - (k+2)$ единиц среди первых m компонент и $(k+2)$ единицы среди последних $(n-m)$ компонент. Таким образом, точки X', X'' отличаются как минимум двумя компонентами, стоящими на первых m местах, и не менее чем двумя компонентами, стоящими на последних $(n-m)$ позициях. Следовательно, эти точки четырехсоседние или имеют еще большее четное соседство.

Лемма 7. Если $f(X)$ – унимодальная на $O_m(X^0)$ функция и для некоторого $\bar{X} \in O_l(X^0, X_{m,k}^*)$, $k = 1, \min\{m, n-m\} - 1$ выполняется условие $f(\bar{X}) < f(X_{m,k}^*)$, то точки $\bar{X}$ и X_m^* принадлежат одному подпространству: V_1^m или V_2^m .

Доказательство. Предположим противное: $\bar{X} \in V_1^m$, $X_m^* \in V_2^m$. Так как $f(X)$ – унимодальная на $O_m(X^0)$ функция, то из точки $\bar{X}$ всегда существует путь невозрастания $W_-^f(\bar{X}, X_m^*) = \{\bar{X}, X^1, \dots, X^s, X_m^*\} \subset O_m(X^0)$. По определению, пути на уровне пары точек $\bar{X}$ и $X^1, \dots, X^i$ и $X^{i+1}, \dots, X^s$ и X_m^* являются двусоседними по отношению друг к другу. В соответствии с леммой 6 точка $\bar{X}$, как и все точки подпространства V_1^m , не имеет двусоседних точек в подпространстве V_2^m и, следовательно, путь $W_-^f(\bar{X}, X_m^*)$ не может проходить через подпространство V_2^m .

Следствие 4. Если для псевдобулевой функции $f(X)$ существуют такие точки $\bar{X}_1 \in O_l(X^0, X_{m,k}^*) \cap O_{k-1}(X^0, X_m^0)$ и точка $\bar{X}_2 \in O_l(X^0, X_{m,k}^*) \cap O_{k+1}(X^0, X_m^0)$, что $f(\bar{X}_1) < f(X_{m,k}^*)$, $f(\bar{X}_2) < f(X_{m,k}^*)$, то функция $f(X)$ имеет по крайней мере два локальных минимума X_m^{*1}, X_m^{*2} , где $X_m^{*1} \in V_1^m$, $X_m^{*2} \in V_2^m$.

Доказательство. Непосредственно следует по лемме 7.

Доказанные утверждения позволяют строить алгоритмы метода отсечений на уровне. Заметим, что все они

являются аналогами утверждений, доказанных в [2; 5] для задачи безусловной псевдобулевой оптимизации. Однако одно из утверждений, справедливое для задачи безусловной оптимизации, не имеет аналога на уровне, так как не всегда выполняется на нем. Об этом утверждении будет сказано ниже.

Для унимодальной разноточной на уровне $O_m(X^0)$ функции $f(X)$ схема метода отсечений будет выглядеть следующим образом.

1. Выбираем произвольную точку $X_m^0 \in O_m(X^0)$ и некоторый ее условный уровень $O_k(X^0, X_m^0)$ ($k = 1, \min\{m, n-m\} - 1$). Полагаем $l = 0$, $L = \min\{m, n-m\}$.

2. Определяем $X_{m,k}^*$ и $\bar{X}_{m,k}$ по условиям:

$$f(X_{m,k}^*) < f(X), \forall X \in O_k(X^0, X_m^0),$$

$$\bar{X}_k \in O_l(X^0, X_{m,k}^*) \cap \{O_{k-1}(X^0, X_m^0) \cup O_{k+1}(X^0, X_m^0)\}.$$

Если $\bar{X}_k$ не существует, то $X_m^* = X_{m,k}^*$ и переходим к п. 4.

3. Если $\bar{X}_k \in O_{k-1}(X^0, X_m^0)$, то полагаем $L = k$, $k = k - i$ ($i = 1, k - l - 1$). Если $\bar{X}_k \in O_{k+1}(X^0, X_m^0)$, то полагаем $l = k$, $k = k + i$ ($i = 1, L - k - 1$) и переходим к п. 2.

4. Останавливаем поиск.

Здесь l и L – номера первого и последнего условных уровней соответственно, рассматриваемых на каждом этапе подпространства.

Итак, схема метода отсечений на уровне подобна схеме метода отсечений для задачи без ограничений. Однако важно заметить, что для задачи (1), (2) поиск ведется до тех пор, пока исследуемое пространство не станет одним уровнем. И, в отличие от схемы метода для задачи безусловной оптимизации, здесь проверяется и последний уровень. Это отличие связано с тем, что на условных уровнях все точки имеют двусоседние к себе точки не только на соседних условных уровнях, но и на условном уровне, которому они принадлежат (см. лемму 5).

Как показали исследования метода отсечений на задаче без ограничений, оптимальным алгоритмом выбора отсекающих уровней здесь является алгоритм 3 [5]. Однако в связи с указанным выше отличием, аналог алгоритма 3 для задачи (1), (2) не будет иметь преимуществ перед аналогом алгоритма 2, где отсекающий уровень на каждом этапе разбивает исследуемое подпространство на два равномоощных или максимально близких по мощности подпространства. Поэтому для решения задачи на уровне будем использовать алгоритм 2, превосходящий по своим оценкам алгоритм 1, который реализует схему выбора отсекающего уровня по правилу среднего арифметического номеров крайних уровней.

Теорема 2. Определение точки минимума X_m^* унимодальной разноточной на $O_m(X^0)$ функции алгоритмом 2 метода отсечений требует вычисления ее значений не менее чем в $C_m^{N_1} C_{n-m}^{N_2} + \{k^2 + (m-k)(n-m-k)\}$ и не более чем в $T_1^m(n, m)$ точках $O_m(X^0) \subset B_2^n$ ($n > 4, m = 1, n - 1$):

$$T_1^m(n, m) = \sum_{i=1}^{\lfloor \log_2(s-1) \rfloor} C_m^{N_i} C_{n-m}^{N_i} + \lfloor \log_2(s-1) \rfloor \{k^2 + (m-k)(n-m-k)\},$$

где $s = \min\{m, n - m\}$; N_i – номера отсекающих уровней для наихудшего случая месторасположения X_m^* .

Доказательство. Оценка снизу в соответствии со схемой алгоритма и леммой 4 равна мощности первого из проверенных уровней ($C_m^{N_1} C_{n-m}^{N_1}$) плюс множество двусоседних к X_m^* точек, лежащих на $O_m(X^0)$. Число последних равно $k^2 + (m - k)(n - m - k)$ (см. лемму 5).

Оценка сверху получена в соответствии со схемой алгоритма 2. Как было замечено выше, распределение точек по условным уровням не симметрично. Поэтому для конкретных значений n, m будем иметь конкретные распределения точек на уровне. При этом, очевидно, что для m -го и $(n - m)$ -го уровней X^0 распределения совпадают. Заметим также, что в соответствии с формулой распределения точек на m -м уровне ($C_m^k C_{n-m}^k$), чем больше m отличается от $n/2$, тем больше первый и последующий за ним отсекающие уровни смещаются в сторону от точки X_m^0 .

Следствие 5: $\lim_{n \rightarrow \infty, m \rightarrow n/2} \frac{\text{card} O_m(X^0)}{T_1^m(n, m)} = \infty$.

Доказательство.

$$\begin{aligned} & \frac{\text{card} O_m(X^0)}{T_1^m(n, m)} \geq \\ & \geq \frac{C_n^m}{[\log_2(s-1)] [C_m^{N_1} C_{n-m}^{N_1} + \{k^2 + (m-k)(n-m-k)\}]} > \\ & > \frac{C_n^m}{[\log_2(s-1)] \cdot C_m^{N_1} C_{n-m}^{N_1}}. \end{aligned}$$

Переходим к пределу и используем для замены $C_n^{[n/2]}$ формулу, полученную в [5]:

$$C_n^{[n/2]} \approx \begin{cases} \frac{2^n}{1,25\sqrt{n}} & \text{для четных } n, \\ \frac{2^n}{1,25(1+\frac{1}{n})\sqrt{n-1}} & \text{для нечетных } n. \end{cases}$$

Предположим для простоты вычислений, что n кратно четырем. Тогда получаем

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty, m \rightarrow n/2} \frac{\text{card} O_m(X^0)}{T_1^m(n, m)} & > \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{C_n^{n/2}}{[\log_2(n/2)] (C_n^{n/4})^2} > \\ & > \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1,25\sqrt{n/2})^2}{\log_2 n \cdot 1,25\sqrt{n}} \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{0,625\sqrt{n}}{\log_2 n} = \infty. \end{aligned}$$

Для других значений n справедливость формулы (3) доказывается аналогично.

Сравнивая эффективность метода отсекающих для задачи безусловной оптимизации и для задачи (1), (2), несложно заметить, что для заданного n и значениях m , близких к $n/2$, нижняя и верхняя оценки числа вычислений для задачи на

уровне выше (относительно мощности пространства решений), чем соответствующие оценки задачи без ограничений. Это связано с существенным различием в распределении точек по уровням точки X^0 в B_2^n и по условным уровням ее конкретного уровня. Так, при $m = n/2$ (n – четное) оценка снизу для задачи (1), (2) составляет $1/(0,625\sqrt{n})$ часть от множества допустимых решений, а для задачи безусловной оптимизации – только $1/(1,25\sqrt{n})$ от мощности B_2^n , т. е. ровно в два раза меньше.

Можно несколько сократить оценки снизу и сверху для задачи (1), (2), если разложить m -й уровень точки X^0 по условным уровням точки X_{m-1}^0 (или X_{m+1}^0), а не по подуровням X_m^0 . Число условных уровней останется прежним, но соседство с точкой X_{m-1}^0 (или X_{m+1}^0) будет уже нечетным. При этом множество точек m -го уровня несколько перераспределится. Но такой прием не позволяет существенно улучшить оценки алгоритма и поэтому не представляет большого интереса для изучения.

Таким образом, исследованные в данной статье свойства пространства булевых переменных позволяют строить алгоритмы метода отсекающих для решения задачи условной псевдоболевой оптимизации (1), (2). Построенные алгоритмы гарантируют элиминацию полного перебора при нахождении локального минимума разнзначной функции, заданной алгоритмически или неявно. Верхняя оценка алгоритмов в несколько раз превосходит соответствующие оценки известных методов.

Библиографический список

1. Antamoshkin, A. N. The total examination eliminating when optimizing the unimodal pseudoboolean functions / A. N. Antamoshkin, Y. G. Koshkin // Parametric Optimization and Related Topics III. Berlin, 1991. P. 56–58.
2. Antamoshkin, A. N. The cutting-off algorithms for pseudoboolean optimization / A. N. Antamoshkin, Y. G. Koshkin // Informatika. Vol. 2. 1991. № 4. P. 67–79.
3. Koshkin, Yu. G. The cutting-off techniques for polimodal pseudoboolean optimization / Yu. G. Koshkin, A. A. Stupina // Abs. of the Symposium on Operations Research. Jena, 1997. P. 44.
4. Антамошкин, А. Н. Регулярная оптимизация псевдоболевых функций / А. Н. Антамошкин. Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1989. 284 с.
5. Кошкин, Ю. Г. Об оптимальных алгоритмах выбора отсекающих уровней в методе отсекающих при решении задач безусловной псевдоболевой оптимизации / Ю. Г. Кошкин // Информационные технологии и математическое моделирование : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Ч. 2. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2005. С. 111–115.

Yu. G. Koshkin

THE CUTTING-OFF METHOD FOR ONE CLASS OF PROBLEMS OF CONDITIONAL PSEUDOBOOLEAN OPTIMIZATION

In this article the properties of Boolean variables space are described as some levels of arbitrary point are researched. On the basis of proven statements the algorithm of cutting-off method is developed for one class of problems of conditional pseudo-Boolean optimization that is for finding the optimum meaning of real function on the level of arbitrary point.

А. Л. Адрианов

ВЫДЕЛЕНИЕ РАЗРЫВОВ В ДВУМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ НЕВЯЗКОГО И ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА

В рамках модели идеального совершенного газа моделируются стационарные течения с множественными взаимодействиями газодинамических разрывов между собой и с физическими границами области, для чего применяется метод выделения множества разрывов на сетке, несогласованной с ними, который обладает высоким разрешением и эффективностью.

В рамках модели вязкого теплопроводного совершенного газа при больших числах Рейнольдса рассмотрена стационарная задача о взаимодействии скачка уплотнения со сдвиговым слоем. Скачок при этом также выделяется, а фактор вязкости – теплопроводности учитывается в обычных и в дифференциальных соотношениях на нем. Строится аналитическое (в расширенном смысле) решение задачи о проникновении скачка в сдвиговый слой. Вычислительным путем показано, что для возмущенного течения в сдвиговом слое возможно существование двух различных режимов: автомодельного и диффузионного.

Специфической особенностью задач, связанных со сверхзвуковым движением газа в каналах, соплах и струях, является наличие развитых ударно-волновых структур (УВС), а также существование зон относительной непрерывности течения. Образующаяся система волн, как правило, интенсифицирует теплообмен на стенках каналов (на преграде) и влияет на устойчивость течения в целом. Наибольший интерес к указанному классу задач возник с появлением сверхзвуковых летательных аппаратов и двигательных установок, использующих сверхзвуковые сопла и воздухозаборники. К этому же классу задач можно отнести задачу о движении газа в резонаторе сверхзвукового газодинамического лазера, особенностью которой, как и в случае воздухозаборника, является наличие большого числа взаимодействующих между собой разрывов. Теоретические аспекты интерференции стационарных газодинамических разрывов всех типов, включая локальное определение их формы до и после взаимодействия, рассмотрены в [1...3].

В этой работе основное внимание сосредоточено на практической стороне вопроса, связанной с расчетом (моделированием) течений, содержащих разрывы.

Существенным моментом, упрощающим численное моделирование сверхзвуковых течений, когда среда находится в условиях, близких к нормальным, является то, что большую часть области течения занимает невязкий поток, а ударные волны, пограничные и сдвиговые слои оказываются локализованными. Во внутренних газодинамических течениях такая разделенность сохраняется в сравнительно коротких и гладких каналах. Вышесказанное позволяет применять на практике зональный подход, в рамках которого вся область течения разбивается на подобласти со специфической моделью течения в каждой из них. Данный подход при численном моделировании допускает, в частности, независимое совершенствование математических моделей в соответствующих подобластях такого течения. Что касается ударных переходов, то информацию о применимости тех или иных моделей для их описания можно найти, например, в [2]. Для большинства практических приложений детальное описание тонкой структуры ударной волны не является необходимым, в связи с чем под нее не выделяют специальной подобласти, схематизируя ее математической поверхностью.

При расчете указанного класса течений (точнее – их невязкого ядра), общепринято использование модели идеального совершенного газа, динамика которого в непрерывной части течения описывается классическими решениями уравнений Эйлера.

Численное моделирование разрывных течений идеального совершенного газа представлено двумя самостоятельными направлениями: методом сквозного счета (МСС) и методом выделения газодинамических разрывов (МВР), различать которые проще всего по наличию или отсутствию выделяемых поверхностей (ВП) в расчетной области. Разумеется, выделение поверхностей разрывов в той или иной задаче не является самоцелью, а продиктовано как физическими представлениями о фактической толщине ударного перехода, так и чисто математическими [4]. Введение в вычислительный процесс ВП приводит к существенному усложнению логики алгоритма, тем более если допускается взаимодействие их между собой и с границами расчетной области (как в этой статье).

Основное достоинство МСС – относительная простота конструирования численного алгоритма и его программной реализации и, как следствие этого, некоторая надежность. Фактическая точность, получаемая при использовании МСС, в большинстве случаев является удовлетворительной, в связи с чем данное направление активно развивается. Требования, предъявляемые к разностной схеме (РС) сквозного счета, противоречивы: с одной стороны, точное воспроизведение гладкой части решения, для чего, как правило, необходима глобальная интерполяция, с другой – правильная передача возмущений в случае разрывов параметров и (или) производных от них. Очевидно, что одинаково хорошо удовлетворить этим противоречивым требованиям невозможно, в силу чего универсального МСС не существует.

Ниже кратко описан один из представителей семейства МВР – маршевый метод расчета двумерных (плоских, осесимметричных) стационарных сверхзвуковых течений идеального совершенного газа с множеством разрывов [3], а также приведены результаты численного моделирования на его основе. Основу этого метода составляет оригинальный алгоритм, объединяющий достоинства МСС и МВР на основе адаптированной к газодинамическим особенностям комбинированной сетки с динамически изменяю-

щейся структурой, что делает возможным массовое выделение возникающих в моделируемом течении УВС из сильных и слабых разрывов, выявляя детальное устройство потока в соплах, каналах и струях.

Метод численного моделирования невязких сверхзвуковых течений. Сетка (полная сетка) состоит из комбинации двух подвижных компонентов: регулярного (R) – разностной решетки и нерегулярного (N) – динамического (лагранжевого) (фрагмент такой сетки представлен на рис. 1). Первый компонент (R) образуется равномерным разбиением пространственного слоя ($x = \text{const}$; где x – временно-подобная (маршевая) координата) и согласован с положением внешних границ расчетной области (свободная и (или) твердая поверхность, ось или плоскость симметрии). Второй компонент (N) появляется при пересечении пространственного слоя траекториями выделяемых поверхностей. Решение в узлах данного компонента определяется уже парой векторов газодинамических переменных, поскольку допускаются разрывы величин. Узлы компонента N в общем случае движутся по отношению друг к другу и узлам решетки независимо и могут в процессе движения слипаться, разъединяться, перемещаться группами, в свою очередь группы могут проникать одна в другую. При этом всюду предполагается упорядоченность компонента N по координате y , которая при реализации алгоритма достигается своевременной послойной сортировкой.

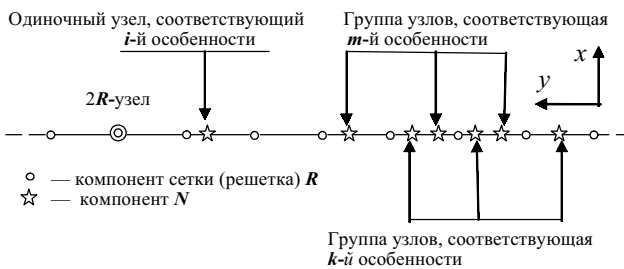


Рис. 1

Выделяемыми поверхностями могут являться фактические разрывы (сильные и слабые) всех существующих типов и направлений, а также фиктивные разрывы (просто характеристики) соответствующих семейств. По этой причине узлы компонента N , кроме основной – порядковой, имеют дополнительную индексацию, определяющую как их принадлежность к той или иной группе узлов (группа может состоять из одного представителя), так и класс (фактический или фиктивный разрыв) соответствующей данному узлу ВП.

Это позволяет отследить любые комбинации взаимодействий ВП и определить по маршевой координате x не только отдельные газодинамических разрывы, но и особенности, например, центрированных волн разрежения (ВР). При этом точное решение, справедливое для произвольного неравномерного течения лишь в центре такой ВР, проектируется в малой σ -окрестности центра ($\sigma \sim h_r^2$, где $h_r \equiv \Delta y$ – шаг решетки в физической плоскости (x, y)) на конечную группу равноотстоящих узлов N :

$$\{R_i^j\}_{i=1, \lambda_j} = R^j \subseteq N, \quad \bigcup_{j \in I} R^j = N,$$

где λ_j – количество лучей (ВП) в группе (например, в секторе разрежения), имеющей порядковый (по списку) номер

особенности, равный j (см. рис. 1, где j принимает значения i, m, k , а λ_j – соответственно 1, 3, 3).

Число λ_j зависит от интенсивности ВР, количества узлов решетки (компонента R), а также от желаемой степени разрешения внутренней структуры ВР. Известно, что первая ($i = 1$) и замыкающая ($i = \lambda_j$) характеристики ВР являются слабыми разрывами (СЛР), поэтому соответствующие им ВП имеет смысл отделить от остальных ВП в данном секторе, например изначально присвоив им в качестве дополнительного индекса не порядковый номер особенности j , как остальным узлам в данной группе, а – j . Индексное множество $\mathfrak{Z}$ есть множество номеров (по ходу расчета) особенностей, образующих в текущий момент расчета нерегулярный компонент сетки. В связи с инициированием в ходе расчета новых особенностей, а также возможной фильтрацией существующих второстепенных ВП как $\mathfrak{Z}$, так и λ_j динамически изменяются, при этом λ_j (j фиксировано) может только уменьшаться. Для одиночных ВП $\lambda_j \equiv 1$, а дополнительный индекс может принимать как отрицательные, так и положительные значения в зависимости от того, является ли данная ВП фактическим или фиктивным разрывом соответственно.

Для нерегулярных узлов расчетного слоя (см. рис. 1) выписать дополнительные индексы для соответствующих ВП, располагая лишь информацией, представленной на рис. 1, невозможно, поскольку начальные сведения о тех или иных разрывах (ВП) потеряны, точнее на рис. 1 не присутствуют. Для одиночной в потоке центрированной ВР, возникающей на кромке сопла, естественная (начальная) расстановка дополнительных индексов может нарушиться уже после отражения первой характеристики ВР от противоположной границы расчетной области.

Следствием положения о несогласованности ВП с разностной решеткой является независимость координат ее узлов от положения разрывов (ВП), что в свою очередь позволяет независимо (в малом) интегрировать основные уравнения в подобластях, где решение является гладким, и в подобластях, содержащих разрывы (ВП). С этой целью, выбрав в качестве условной РС для расчета гладкой части течения класс явных симметричных трехточечных РС, выделим среди узлов решетки (R) узлы, в которых с помощью данной РС можно найти решение на следующем слое по маршевой координате x . Потребуем, чтобы шаблон условной РС не содержал ВП. Другими словами, выделим узлы решетки, имеющие слева и справа на сетке в качестве ближайших узлов регулярных «соседей». Узлы выделенного таким образом множества назовем дважды регулярными ($2R$) (см. рис. 1, второй узел слева). Заметим, что при реализации алгоритма такой послойный анализ узлов решетки проводится автоматически.

В качестве фактической РС для расчета газодинамических параметров в гладкой части течения (в $2R$ -узлах) может быть взята любая явная устойчивая РС второго порядка точности с шаблоном, вкладывающимся в шаблон условной РС. Поскольку в [3] подробно описано использование подобных РС для интегрирования газодинамических уравнений (уравнений Эйлера) в гладкой части течения, то дальнейшее его изложение считаем излишним.

В результате анализа узлов решетки с помощью условной РС на полной сетке появляется орнамент [3], со-

стоящий из регулярных узлов, не являющихся дважды регулярными (сюда могут быть причислены и граничные узлы), и собственно нерегулярных узлов (на рис. 1, по причине крупного разбиения области, орнаментом охвачен почти весь слой). Символически множество узлов, составляющих орнамент (окрестности ВП), можно записать как $\{(R \setminus 2R) + N\}$. Выбор РС для расчета газодинамических параметров в узлах данного множества, включая определение формы элементов ВП (в пределах шага τ по координате x ; $\tau \equiv \Delta x$), должен основываться в большей степени на требовании точности вычислений, чем на экономичности. Это положение можно обосновать следующими соображениями: а) желанием сохранить точность вычислений в окрестностях разрывов, в противном случае выделение разрывов было бы не актуальным; б) удельный вклад множества $\{(R \setminus 2R) + N\}$ по отношению к общему количеству узлов сетки $(\{R + N\})$ на слое сравнительно невелик и уменьшается с измельчением разностной решетки для конкретной задачи.

С этой точки зрения, оптимально локальное применение сеточно-характеристического метода (СХМ). Форма элемента ВП может определяться как на основе дифференциальных условий динамической совместности (ДУДС) на разрывах [3], так и с помощью того же СХМ [1; 3]. Детальное описание этих процедур содержится в [3]. Там же подробно описан процесс выбора шага по маршевой координате x с учетом положения ВП, решение локальной задачи об интерференции разрывов (ВП) различного типа, а также механизм фильтрации второстепенных ВП в ходе расчета.

Моделирование газодинамических течений с разрывами. Представим численный расчет осесимметричной задачи о движении (торможении) газа ($\gamma = 1,4$ для воздуха) в кольцевом сужающемся канале, имеющем излом верхней образующей в начальном сечении (рис. 2). Расчет выполнен на разностной решетке с 21 узлом как в случае использования МВР (рис. 2, а, б), так и МСС (рис. 2, в, г) применяется РС Лакса–Вендроффа).

Сделаем замечание, справедливое и для этого, и для других расчетов, приведенных ниже. Моделируемое те-

чение изображается на рис. 2 в виде линий уровня значений газодинамических величин (функций): $-10 \log$ (давления), числа Маха, угла наклона линий тока к оси x и полного давления, причем маркировка линий уровня соответствует отрезку натурального ряда, если отсутствует дробная часть числа в маркере. Для удобства сопоставления результатов вычислений при расчетах, выполненных разными численными методами (МВР и МСС), линии уровня строятся в одном общем для обоих расчетов масштабе данной величины, при этом важно, что интерполяция значений величин через ВП (для МВР) не делается. Траектории ВП на рис. 2 представлены дискретно в виде последовательности точек, соответствующих расчетным слоям по маршевой координате x . Над расчетной областью выполнено аффинное преобразование (как правило, сжатие по оси x) с целью ее оптимального размещения в пределах рамки рисунка. По тем же соображениям внутренний цилиндр для осесимметричных кольцевых течений отсутствует. Для левых половинок ось y направлена от центра влево, для правых – от центра вправо. Ось x совпадает с осью (либо лежит в плоскости) симметрии течения и направлена снизу вверх таким образом, что начальное сечение (слой) располагается всегда внизу изображения.

Стационарная постановка задачи о торможении газа в подобном кольцевом осесимметричном канале вполне корректна и хорошо демонстрирует возможности методик МВР и МСС. Параметры в начальном сечении цилиндрического канала следующие: число Маха втекающего равномерного потока $M = 3,0$, нижняя граница в начальном сечении располагается на расстоянии 0,5 входного калибра от оси симметрии течения, верхняя – на расстоянии 1,5 входного калибра. Излом верхней стенки в начальном сечении $\Delta\theta = -5^\circ$. Для исключения режима маховского отражения скачка уплотнения цилиндр размещается на оси симметрии течения. Расчет автоматически останавливается при достижении моделируемым течением хотя бы в одной из точек сечения местной скорости звука.

Анализируя приведенные на рис. 2 расчеты, можно утверждать, что МВР обеспечивает на порядок более

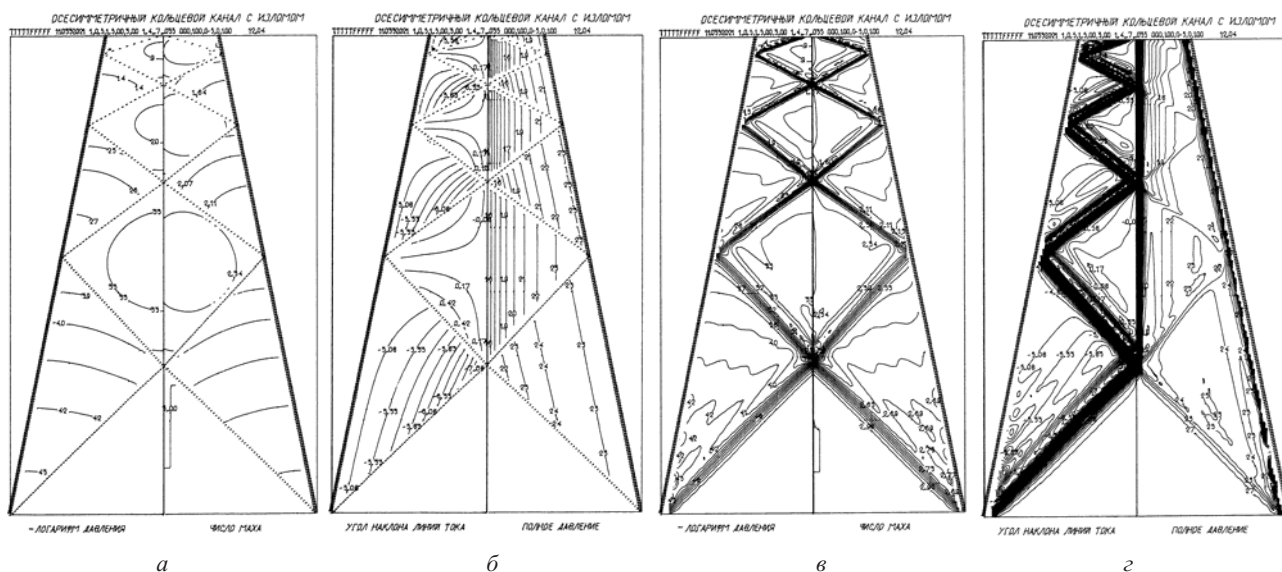


Рис. 2

высокое качество разрешения внутреннего устройства канального газодинамического течения, чем МСС. Дополнительные временные затраты на выделение одной изолированной ВП при этом сопоставимы со временем расчета нескольких регулярных точек слоя. Кроме того, решение, полученное МСС на более мелкой разностной решетке (201 узел, в данной статье оно не приводится), сводится к решению, представленному на рис. 2, а, б (МВР, 21 узел). Заметим, что в плоском случае точное решение данной задачи получается с помощью МВР уже на одной (!) ячейке разностной решетки. Если не принимать во внимание всплески, вызванные немонотонностью используемой в МСС схемой Лакса – Вендроффа, то результаты, полученные по обеим методикам, хорошо согласуются между собой. Исключение составляет значение полного давления (энтропии) (см. рис. 2, г, где присутствует чернота вдоль границы справа) на верхней граничной линии тока вследствие программной ошибки (в случае скачков выбирался не тот знак перед радикалом при нахождении корней алгебраического уравнения).

Однако данная ошибка остается локализованной и практически не влияет на конечный результат, получаемый МСС.

Приведем расчеты сверхзвуковых струй (рис. 3): плоской (рис. 3, а, б) и осесимметричной кольцевой (рис. 3, в, г). Все расчеты сделаны только МВР. Исходные параметры плоской струи: число Маха в выходном сечении профилированного сопла, дающего равномерный поток, $M = 4,0$; показатель изэнтропии газа $\gamma = 1,3$. Струя истекает в затопленное пространство с нерасчетностью $n = 10$ (струя недорасширенная). Расчет выполнен на разностной решетке с 61 узлом. В расчете применялась фильтрация ВП и, поэтому «жизнь» внутренних характеристик (не СЛР) центрированной ВР ограничена моментом их касания противоположной границы расчетной области. Момент перехода первой характеристики ВР, являющейся СЛР, в сильный разрыв (с последующим увеличением его интенсивности) после ее отражения от плоскости симметрии и взаимодействия с последней характеристикой (также СЛР) и границей струи хорошо отслеживается по профилю полного давления.

Для осесимметричной кольцевой струи (см. рис. 3, в, г), истекающей из конического кольцевого сопла в затопленное пространство, исходные параметры следующие: нижняя граница (цилиндр) в начальном сечении располагается на расстоянии 0,5 входного калибра от оси симметрии течения, верхняя – на расстоянии 1,5 входного калибра. В начальном сечении распределение газодинамических параметров соответствует течению от источника с углом полураствора $\alpha = 10^\circ$. Расчет выполнен на разностной решетке с 201 узлом (хотя на самом деле необходимости в таком количестве узлов не было). Можно заметить, что в отличие от предыдущего случая сжатый слой струи формируется скачком уплотнения, образовавшимся из последней характеристики (СЛР) центрированной ВР.

В ходе всех расчетов контролировалась интегральная (по расходу массы) ошибка при переходе от одного расчетного слоя к другому, которая во всех случаях не превышала 0,05 %.

Выделение скачка уплотнения в вязком теплопроводном газе при больших числах Рейнольдса. В рамках модели вязкого теплопроводного совершенного газа при больших числах Рейнольдса рассмотрим задачу о взаимодействии скачка уплотнения (СУ) со сдвиговым слоем [6...8]. К данной задаче можно прийти, если в предыдущую задачу, связанную с множественными взаимодействиями газодинамических разрывов, добавить малую вязкость и теплопроводность среды. Тогда при больших числах Рейнольдса скачки можно по-прежнему рассматривать как разрывы непрерывности в газовой среде и идеализировать их математическими разрывами первого рода, в отличие от тангенциальных разрывов, которые должны рассматриваться уже как непрерывные сдвиговые слои с соответствующим их представлением на расчетной сетке. Таким образом, базовой (главной) и одновременно модельной задачей в этом случае будет задача о взаимодействии СУ со сдвиговым слоем, которая к тому же должна решаться быстро и эффективно (без привлечения полных уравнений Навье – Стокса). Более того, на этой задаче может быть изучен и общий механизм взаимодействия ударной волны с произвольными неоднородностями типа сдвигового и (или) температурного слоя.

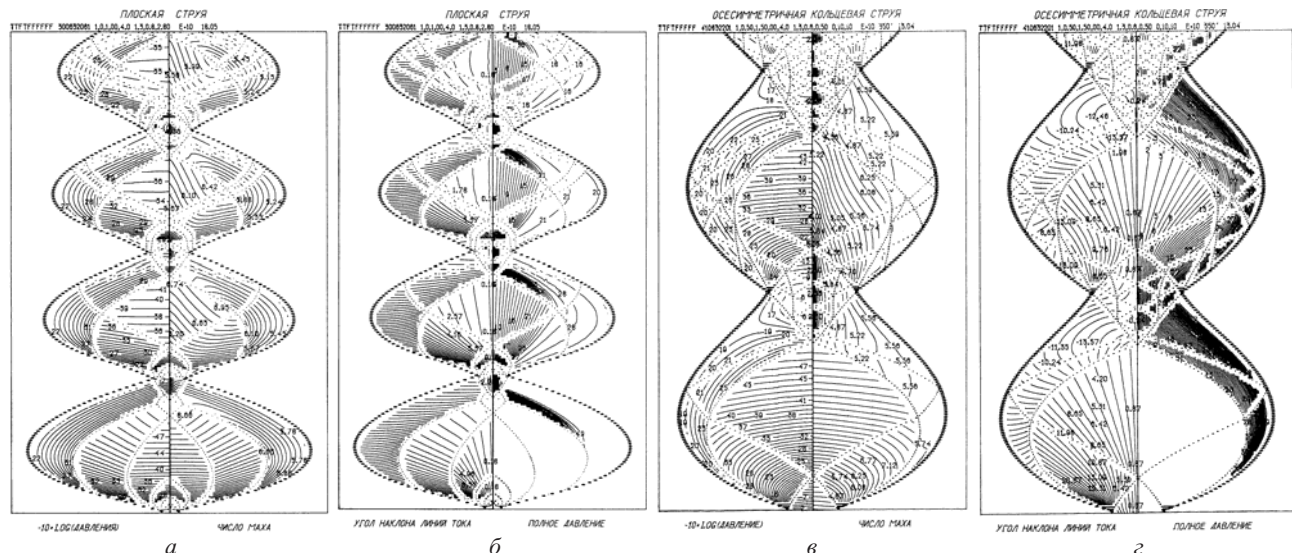


Рис. 3

Фактор вязкости – теплопроводности при решении данной задачи будем учитывать как в обычных, так и в дифференциальных соотношениях для СУ. Кратко опишем применяемый в данной работе подход [6...8] и приведем результаты математического моделирования на его основе.

Приведем компактную запись обобщенных асимптотических дифференциальных соотношений для СУ в приближении сдвигового слоя (ОДСС) [6...8]:

$$\alpha_{ij} \left(\hat{\Phi}_j \right)_n + b_i K_w + c_{ij} \left(\Phi_j \right)_n + d_i (\delta/y) + \\ + \varepsilon^2 \left[e_{ij} \left(\hat{\Phi}_j \right)_{nn} + f_{ij} \left(\Phi_j \right)_{nn} + G_i \right] = 0, \quad (1) \\ \Phi_{j=1...4} = (W, \theta, p, h)^T, \quad i, j = 1...4$$

где

$$\delta = 0(1), \quad \varepsilon^2 = (\text{Re}_\infty)^{-1}, \quad G_i = f_i \left(\left(\hat{\Phi}_j \right)_n, \left(\Phi_j \right)_n, \hat{\Phi}_j, \Phi_j \right).$$

Здесь

$$H = h + W^2/2; \quad h = \gamma/(\gamma-1) p/\rho; \quad \gamma = c_p/c_v$$

$$\mu/\mu_\infty = (h/h_\infty)^\omega, \quad 1/2 \leq \omega \leq 1 \quad \lambda/c_p = \mu/\text{Pr}$$

где W – модуль скорости; H – полная энтальпия; p – давление; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; θ – угол наклона линии тока к оси OX декартовой системы координат XOY ; n – нормаль к линии тока. Ось OX является либо осью, либо лежит в плоскости симметрии течения. Газодинамические параметры (или производные) за СУ обозначаются символом $\hat{}$. В (1) применено суммирование по повторяющемуся индексу j . Вектор G объединяет нелинейные слагаемые (произведения младших производных и кривизны). Матрицы $A...F$, зависящие от газодинамических величин по обе стороны СУ, являются громоздкими и поэтому здесь не приводятся. Расчет величин за СУ (а следовательно, указанных матриц) может выполняться как с учетом, так и без учета фактора вязкости – теплопроводности с использованием классических условий на косом СУ.

Система (1) содержит 9 неизвестных величин: 8 нормальных производных первого и второго порядка от газодинамических величин за СУ и его продольную кривизну K_w (в отличие от радиальной кривизны $1/y$ в осесимметричном случае). Те же производные в невозмущенном сдвиговом слое (до СУ) считаются известными, что не умаляет общности подхода и вполне соответствует постановке задачи: распределение газодинамических величин поперек невозмущенного слоя может иметь либо аналитическое представление, либо подходящую параметризацию. Важно, что система (1) не замкнута: требуется дифференциальное условие за СУ. В [6...8] показано, что наиболее универсальным из такого рода дополнительных условий за СУ является условие:

$$\hat{p}_s + \hat{m}^{-\chi} \cdot \hat{p}_n = 0, \quad \hat{m}^{-\chi} = \frac{-\chi}{\sqrt{\hat{M}^2 - 1}} = -\chi \operatorname{tg}(\alpha_M^{\hat{}}) \quad (2) \\ \hat{p}_{ss} - \left(\hat{m}^{-\chi} \right)^2 \hat{p}_{nn} = 0$$

где s – направление вдоль линии тока; $\chi = \pm 1$ – показатель семейства СУ; M – число Маха. В [7] доказано, что (2) (исключающее условие) с физической точки зрения эк-

вивалентно исключению краевого эффекта за СУ, приносимого догоняющими возмущениями. По отношению к решаемой задаче это допущение не является значимым, при этом упрощения уравнений (1) получаются существенными и позволяют свести задачу к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Методы решения (1) с учетом (2) подробно описаны в [8], поэтому перейдем непосредственно к процессу моделирования проникновения СУ в сдвиговый слой.

Моделирование взаимодействия скачка уплотнения со сдвиговым слоем. Представим сравнительные расчеты для плоского модельного сдвигового слоя (рис. 4). В качестве модели слоя бралась сверхзвуковая часть пограничного слоя (ПС) на теплоизолированной пластине с параметрами: $\text{Pr} = 1, \partial p/\partial n = 0, W_{n=y=0} = 0, (\partial h/\partial n)_{n=y=0} = 0$. При построении профиля энтальпии h использовалось известное точное решение: $H = h + W^2/2 = \text{const} = H_\infty$. Поскольку задача о течении в ПС не имеет своего характерного размера, то везде в дальнейшем под Re_∞ будем понимать $\text{Re}_x = c_\infty W_\infty x / \mu_\infty$, где x – текущая координата, совпадающая с точкой падения СУ.

Текущие газодинамические параметры в невозмущенной части слоя перед СУ определялись по известным профилю скорости и параметрам равномерного внешнего набегающего невязкого потока, помеченного символом ∞ . Автомодельный профиль продольной компоненты скорости сжимаемого ПС во всех расчетах задавался в виде полинома 4-й степени (метод Польгаузена) с непрерывным переходом по первой и второй производным от параметров указанного невязкого потока. Профиль малой по величине поперечной компоненты скорости (в данном случае угла n) рассчитывался по соответствующей толщине вытеснения.

Одной из целей данной работы являлась оценка действия фактора вязкости – теплопроводности на процесс взаимодействия СУ и слоя. В связи с этим возникла потребность в детальном анализе механизма влияния указанных факторов на окончательный результат. Как параметр (невяно), определяющий поперечные масштаб слоя и компоненту скорости, вязкость присутствует в настоящей математической модели взаимодействия всегда (даже при $\varepsilon^2 = 0$), в чем и состоит ее главное действие. Кроме этого, в настоящей модели вязкость присутствует (при $\varepsilon^2 \neq 0$) еще и как коэффициент (явно) в (1), однако соответствующие вязкие члены имеют более высокий, в сравнении с ее невязным вхождением, асимптотический порядок, отвечая лишь за дополнительный вязкий эффект в возмущенной задаче. Но насколько существен этот вязкий эффект?

Конкретные значения безразмерных газодинамических параметров внешнего потока и значения параметров на плоскости симметрии, совместно определяющие невозмущенный слой, были следующими: $M_\infty = 2,5; \rho_\infty = 1; W_\infty = 1$ при $y = 1$ и $W_{y=0} = \theta_{y=0} = 0$ при $y = 0$. При этом текущая энтальпия и давление определялись по соотношениям:

$$h = H_\infty - W^2/2, \quad W = W(z), \quad z = z(y), \quad z \in (0,1),$$

$$y \in (0, \delta_\tau], \quad p = p_\infty, \quad h_\infty = W_\infty^2 / [(\gamma-1)M_\infty^2],$$

$$H_\infty = H_0 = h_\infty + W_\infty^2/2, \quad p_\infty = p_{y=0} = \rho_\infty h_\infty (\gamma-1) / \gamma.$$

В ходе расчетов изменялась величина $\varepsilon^2 = (1 / \text{Re}_\infty) = \{0, \dots, 10^{-4}\}$, величина начальной интенсивности падающего СУ была выбрана и полагалась постоянной $J_\infty = J_s t^{1/100}$, $t = 5\%$, измеряемой в процентах от звуковой ($M = 1$) интенсивности СУ J_s .

При численной реализации описанных в [8] методов пространственный шаг расчетной сетки полагался равным не более 0,001, что в сочетании со вторым порядком аппроксимации используемых разностных схем обеспечивало достаточную точность вычислений и гарантировало практическую сходимость. Расчет, как правило, останавливался при достижении СУ интенсивности J_s .

Существенным отличием данной работы от [8] является то, что фактор вязкости – теплопроводности учитывался не только в ОДСС (1), но и в соотношениях функции на разрыве, для чего в каждой точке СУ дополнительно решалась соответствующая нелинейная система методом Ньютона.

На графиках (рис. 4, а, б) профилей скоростей W (малая по величине поперечная компонента изображена пунктиром) и энтальпий h заметного различия между кривыми, соответствующими разным $\{\infty, 10^4\}$ числам Re_∞ , не наблюдается. Видны лишь различия профилей этих параметров до СУ (невозмущенное течение) и за ним (кривые, соответствующие разным числам Re_∞).

На графиках траектории СУ, углов наклона СУ к линии тока и кривизны СУ (рис. 4, в, г) возмущенные решения, соответствующие разным числам Re_∞ , также слабо различимы.

На графиках интенсивностей J и углов преломления β (рис. 4, д, е), наоборот, видно уже качественное различие в поведении кривых: $\text{Re}_\infty \rightarrow \infty$ ($\varepsilon^2 = 0$, более протяженные графики) и $\text{Re}_\infty = 10^4$. Но это существенное различие становится практически незаметным при достаточной (~20 %) интенсивности падающего СУ (эти графики приведены в [8]). Следовательно, с увеличением начальной

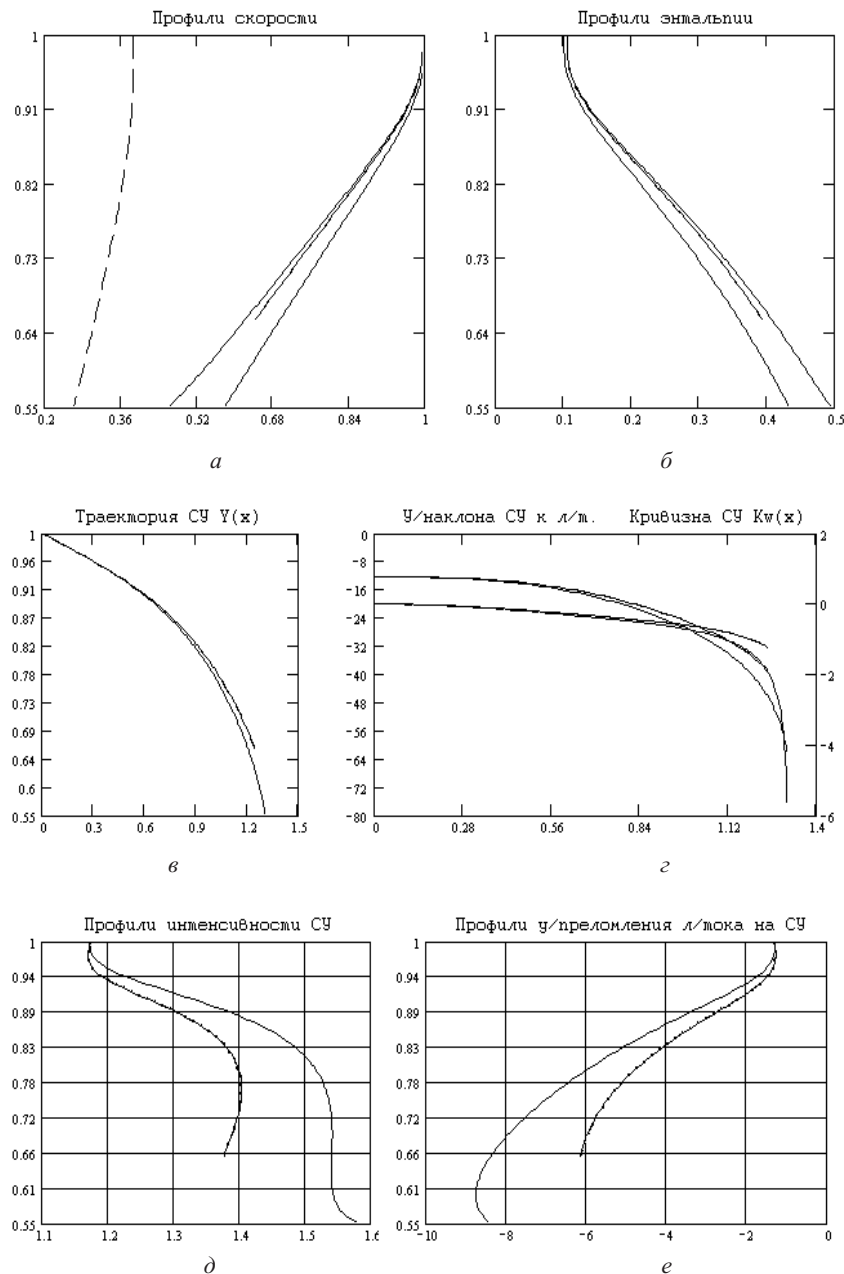


Рис. 4

интенсивности падающего СУ происходит выход возмущенного течения на автомодельный режим, когда определенный выше вязкий эффект практически исчезает. При этом важно, что время расчета невязкого ($\epsilon^2 = 0$) и вязкого ($\epsilon^2 = 10^{-4}$), более трудоемкого варианта задачи, значительно отличается, особенно при дальнейшем уменьшении числа Рейнольдса.

При малой начальной интенсивности СУ ($\leq 5\%$) и значительной вязкости ($Re_\infty \leq 10^3$) физический процесс проникновения в слой СУ сопровождается его быстрым расщеплением (диффузией) с последующим вырождением. При этом графики интенсивностей, соответствующие мало отличающимся значениям ϵ^2 , ведут себя по-разному. В физико-математической литературе такое поведение «соседних» решений принято называть бифуркацией (раздвоением) решений, однако какой-либо потери единственности решения в данном случае не происходит. С учетом того что в качестве Re_∞ в представленном исследовании выступает Re_x , данное явление будет иметь место и в случае близкого падения СУ к точке образования слоя при фиксированной физической вязкости потока.

Таким образом, сделаем следующие выводы:

– приведенные расчеты свидетельствуют о высокой разрешающей способности представленного МВР на грубых сетках при численном моделировании двумерных стационарных газодинамических течений с множеством разрывов;

– проведенные исследования показывают, что роль фактора вязкости – теплопроводности (в виде вязкого эффекта) может быть весьма значительной. В возмущенном решении задачи, кроме основной – автомодельной (газодинамической) ветви решения, присутствует еще и диффузионная ветвь, проявляющаяся при малых интенсивностях скачка и числах Рейнольдса. В последнем случае неполноценный (как в вихревой невязкой модели) учет малых вязкости и теплопроводности может привести к принципиально неверному представлению о физических основах процесса взаимодействия скачка со слоем.

Для практики важно, что рассмотренная в данной статье математическая модель позволяет в рамках единого вычислительного алгоритма учесть газодинамическую

и диффузионную стадии эволюции скачка в слое, чем достигается значительная экономия вычислительного ресурса (расчет занимает минуты или даже секунды). Кроме того, в данной постановке задачи сохраняется естественный (бесконечный, в отсутствии других возмущений) порядок гладкости решения в касательном к скачку направлении.

Библиографический список

1. Рождественский, Б. Л. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике / Б. Л. Рождественский, Н. Н. Яненко. М. : Наука, 1968. 592 с.
2. Гриффитс, У. Ударные волны / У. Гриффитс // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы / под ред. Дж. Бэтчелора и Г. Моффата. М. : Мир, 1984. 501 с.
3. Адрианов, А. Л. Интерференция стационарных газодинамических разрывов / А. Л. Адрианов, А. Л. Старых, В. Н. Усков. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1995. 180 с.
4. Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики / Н. Н. Анучина, К. И. Бабенко, С. К. Годунов и др. ; под ред. К. И. Бабенко. М. : Наука, 1979. 296 с.
5. Адрианов, А. Л. Численное исследование взаимодействия сверхзвуковой струи газа с плоской преградой / А. Л. Адрианов, А. А. Безруков, Ю. А. Гапоненко // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 4. С. 106–111.
6. Адрианов, А. Л. Дифференциальные соотношения на скачке уплотнения в вязком газе при больших числах Рейнольдса / А. Л. Адрианов // Математическое моделирование в механике : тр. семинара / ВЦ Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. Красноярск, 1996. 18 с. Деп. в ВИНТИ 01.04.96, № 1052.
7. Адрианов, А. Л. О модельной кривизне скачка уплотнения в неравномерном потоке / А. Л. Адрианов // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5, № 6. С. 3–14.
8. Адрианов, А. Л. Аналитический подход в задаче проникновения скачка в сдвиговый слой / А. Л. Адрианов // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева : сб. науч. тр. / под ред. проф. Г. П. Белякова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Вып. 5. Красноярск, 2004. С. 5–22.

A. L. Adrianov

THE SHOCK WAVE SCHEMATIZATION IN THE 2D INVISCID AND VISCOUS HEAT CONDUCTING FLOWS

Within the framework of model of the ideal perfect gas, the steady supersonic gasdynamic flows with many discontinuities are simulated. The method with not connected grid is applied. The adduced calculations demonstrate the high resolving power and efficiency of the given method.

Within the framework of model of the viscous heat conducting perfect gas (large Reynolds numbers) as main (basic), the steady problem about interaction of a shock wave with a shift layer is considered. The shock (discontinuity) thus also schematized, and the factor of viscosity – heat conduction is taken into account in usual and in differential relations. The analytical solution (in the extended sense) of a problem of penetration of a shock wave into the shift layer is received. Difference in behavior of shock waves of the large and small intensity is shown.

ДИНАМИКА ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Рассмотрены вопросы моделирования движения дисперсной фазы в турбулентных газодисперсных восходящих и нисходящих потоках. Область применения модели – повышение эффективности процессов и аппаратов для очистки промышленных газовых выбросов от газообразных и высокодисперсных примесей в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами.

Анализ состояния исследований аэродинамики гетерофазных систем показывает, что для решения многих технологических проблем требуется создание математических моделей движения, учитывающих целый комплекс физических явлений межфазного обмена массой, импульсом и энергией и специфику конкретных процессов и аппаратов. Возникающие при этом трудности связаны со сложностью описания взаимодействия с газом даже отдельной твердой шаровой частицы в достаточно широком диапазоне режимов ее обтекания. Детальное исследование взаимодействия дисперсной твердой частицы или капли с газом с учетом процессов, происходящих внутри нее и на ее поверхности (тепло- и массопереноса, конденсации или испарения, внутренней циркуляции, деформации и т. д.), потребовало бы привлечения практически всех методов газодинамики, термодинамики и физико-химической кинетики [1]. Противоречие между необходимостью детального описания процессов, происходящих с отдельной частицей или каплей, и требованием их учета в виде элементарных актов в общей динамике аэродисперсной смеси требует принятия компромиссных решений и упрощающих допущений при построении моделей динамики и массообмена отдельной частицы и газодинамики смеси в целом.

Для турбулентного течения газа характерны беспорядочные хаотические пульсации скорости во всех направлениях и во всех точках потока, придающие практически всем происходящим процессам стохастический характер. При таком течении отдельные объемы газа с определенной вероятностью могут перемещаться в любом направлении и истинное значение любой характеристики газа в конкретной точке в конкретный момент времени представляет собой сумму величин, характеризующих основное и пульсационное течения. Следствием хаотических пульсационных движений является беспорядочное интенсивное перемешивание и специфическая турбулентная диффузия, турбулентная вязкость газа, более равномерное (чем при ламинарном течении) распределение осредненной скорости и ее резкое падение в пристенной области, увеличение потерь на трение и т. д.

Профиль скоростей газа в турбулентном потоке. Мгновенную скорость газа в любой точке потока в каждом из направлений можно представить как сумму осредненной скорости и скорости пульсаций. Соответственно в уравнения движения Рейнольдса входят добавочные касательные напряжения, обуславливающие повышение вязкости и гидравлического сопротивления. Для замыкания системы уравнений применяются статистические или полуэмпирические теории турбулентности, широко используется аналогия между турбулентными и молекуляр-

ными напряжениями, экспериментальные данные о статистических связях между пульсациями в пространстве и времени [2]. Однако для инженерных расчетов обычно используются феноменологические теории и полуэмпирические методы расчета [3; 4].

Профиль осредненной осевой скорости газа по сечению канала наиболее точно можно аппроксимировать универсальным профилем скорости (трехслойной моделью), полученным Прандтлем и Тейлором и дополненным Карманом [5]:

$$w^+ = y^+ \text{ при } y^+ < 5 \text{ (ламинарный пристенный слой)}, (1)$$

$$w^+ = -3,05 + 5 \ln(y^+) \text{ при } 5 < y^+ < 30 \text{ (буферный слой)}, (2)$$

$$w^+ = 5,5 + 2,5 \ln(y^+) \text{ при } 30 < y^+ < R^+ \text{ (турбулентное ядро)}, (3)$$

где $w^+ = w / w^*$ – скоростной параметр (универсальная скорость); $y^+ = w^* \rho y / \mu$ – параметр расстояния трения (универсальная координата); y – расстояние от стенки, м; $w^* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$ – скорость трения (динамическая скорость), м / с; $\tau_0 = \lambda \rho w_{cp}^2 / 8$ – касательное напряжение трения на стенке, Н / м²; λ – коэффициент сопротивления; w_{cp} – средняя скорость газа, м / с.

При моделировании газовых потоков в цилиндрических трубах на основании универсального профиля (1)...(3) можно построить профиль скорости газа без привлечения дополнительных эмпирических или полуэмпирических зависимостей и коэффициентов из условия обеспечения заданного объемного расхода газа или среднерасходной скорости.

Расход газа в канале складывается из расходов в ламинарном пристенном слое, буферном слое и турбулентном ядре, границы между которыми определяются в соответствии с условиями формул (1)...(3):

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 + W_3 = S_1 w_1 + S_2 w_2 + S_2 w_2 = \\ &= \pi(R^2 - R_1^2)w^*w_1^+ + \pi(R_1^2 - R_2^2)w^*w_2^+ + \pi R_2^2 w^*w_3^+ = \\ &= \frac{2\pi\mu^2}{w^*\rho^2} \left[\int_0^5 y^+ (R^+ - y^+) dy^+ + \int_5^{30} (-3,05 + 5 \ln y^+) \times \right. \\ &\quad \left. \times (R^+ - y^+) dy^+ + \int_{30}^{R^+} (5,5 + 2,5 \ln y^+) (R^+ - y^+) dy^+ \right]. \end{aligned}$$

После интегрирования и преобразований можно получить соотношение между средней и динамической скоростями газа в виде [4]

$$\begin{aligned} w_{cp} &= \frac{W}{\pi R^2} = 2,5 w^* \ln \frac{w^* \rho R}{\mu} + 1,75 w^* - \\ &- 127,792 \frac{\mu}{\rho R} - 10\,603,449 \frac{\mu^2}{w^* \rho^2 R^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

или, через динамический критерий Рейнольдса $Re^* = w^* D \rho / \mu = 2 w^* R \rho / \mu$,

$$\frac{w_{cp}}{w^*} = \frac{Re}{Re^*} = 2,5 \ln Re^* - 255,584 (Re^*)^{-1} - 42\,413,796 (Re^*)^{-2} + 0,017. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) показывают взаимосвязь средней w_{cp} и динамической w^* скоростей газового потока в неявном виде. При заданном значении средней скорости уравнение может быть решено итерационными методами. В качестве начального приближения можно использовать известные оценки характеристик турбулентного потока.

Расчеты и сравнение с экспериментальными данными показывают, что формула (5) при $Re > 10^4$ позволяет рассчитать и другие параметры потока, в частности – коэффициент сопротивления λ и, соответственно, гидравлическое сопротивление канала [4]. Профили скорости газа в координатах $(y/R, w/w_{max})$ и $(y/R, w/w_{cp})$ при различных значениях критерия Рейнольдса Re , рассчитанные по формулам (1)–(3) и (5), показаны на рис. 1.

Уравнения (1)–(3) дают возможность рассчитать градиенты осевой скорости газа по радиусу канала. После подстановки $w^+ = w/w^*$ и $y^+ = y w^* \rho / \mu$ можно получить [4]

$$dw/dy = \rho (w^*)^2 / \mu \text{ при } 0 < y < 5\mu / (w^* \rho),$$

$$dw/dy = 5w^* / y \text{ при } 5\mu / (\rho w^*) < y < 30\mu / (\rho w^*),$$

$$dw/dy = 2,5w^* / y \text{ при } 30\mu / (\rho w^*) < y < R,$$

или, учитывая, что в цилиндрическом канале $y = R - r$ и $dw/dy = -dw/dr$,

$$dw/dr = -2,5w^* / (R - r) \text{ при } 0 < r < R - 30\mu / (\rho w^*),$$

$$dw/dr = -5w^* / (R - r) \text{ при } R - 30\mu / (\rho w^*) < r < R - 5\mu / (\rho w^*),$$

$$dw/dr = -\rho (w^*)^2 / \mu \text{ при } R - 5\mu / (\rho w^*) < r < R.$$

Следует отметить, что полученные соотношения справедливы только для однофазного потока. Однако исходные выражения (1)–(3) можно использовать и для двухфазного потока, если определить его транспортные свойства с учетом влияния дисперсной фазы, зависящего от ее объемной или массовой концентрации [4].

2. Движение частиц в турбулентном потоке. Движение твердых или жидких частиц в турбулентном потоке газа отличается от ламинарного потока большей сложностью

и интенсивностью межфазного взаимодействия. Это обусловлено прежде всего беспорядочными турбулентными пульсациями среды и связанными с ними колебательными движениями частиц и их турбулентной диффузией.

Можно считать, что движение частиц в турбулентном газовом потоке складывается из поступательного движения под действием приложенных сил (в том числе связанных с их обтеканием) и хаотического движения под влиянием турбулентных пульсаций газа. Первое из них подчиняется законам классической механики, второе носит стохастический характер. Используя принцип аддитивности скоростей и движений, мы можем считать, что частица одновременно участвует в двух движениях и рассматривать их основные закономерности отдельно.

На частицу в турбулентном потоке в общем случае действуют силы тяжести, Архимеда, лобового аэродинамического сопротивления, Магнуса – Жуковского, Сэффмена, Тейлора, Буссинеска и силы, возникающие из-за пульсаций давления, скорости и касательных напряжений [4; 6]. Уравнение одномерного движения сферической частицы получено Бассе, Буссинеском и Озееном для случая покоящейся среды [7] и обобщено Ченом [9] для случая среды, движущейся с переменной скоростью [4; 8; 9; 11]:

$$\frac{\pi}{6} \delta^3 \rho_d \frac{du}{dt} = 3\pi \mu \delta (w - u) + \frac{\pi}{6} \delta^3 \frac{dp}{dx} + \frac{\pi}{12} \delta^3 \rho \left(\frac{dw}{dt} - \frac{du}{dt} \right) + \frac{3}{2} \delta^2 \sqrt{\pi \rho \mu} \int_{t_0}^t \left(\frac{dw}{d\tau} - \frac{du}{d\tau} \right) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}}. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо при допущениях, что турбулентность является однородной, невырождающейся и бесконечно протяженной, размер частицы меньше, чем наименьший вихрь в потоке, а скорость движения мала по сравнению со скоростью окружающей ее среды [16]. Первое слагаемое в уравнении выражает силу вязкостного трения (силу сопротивления Стокса), вычисленную в пренебрежении инерцией сплошной фазы, а остальные три связаны с неравномерным характером движения частицы и среды: второе слагаемое отражает влияние градиента давления, третье учитывает дополнительную силу, связанную с относительным ускорением среды вокруг частицы (эффект присоединенной массы), четвертое показывает влияние отклонения течения от установившегося (сила Бассе) [4].

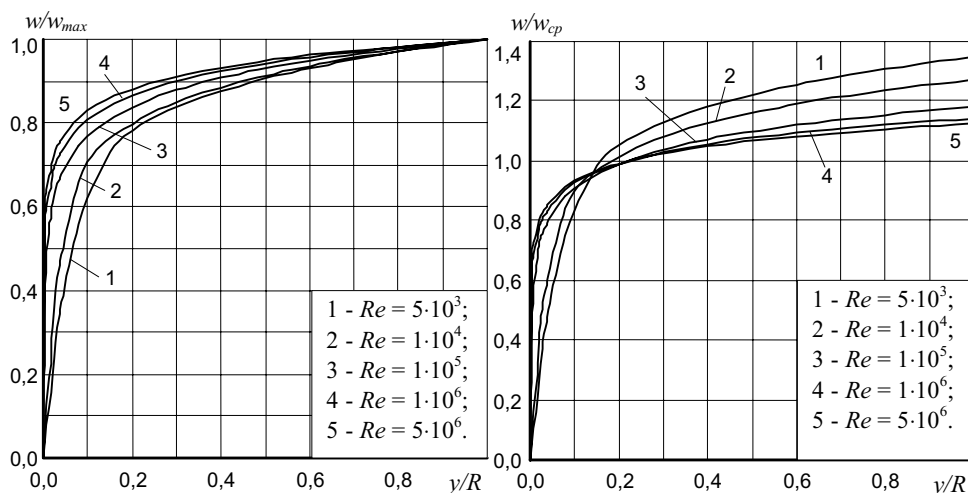


Рис. 1. Профили скорости газа в турбулентном потоке

При больших значениях отношения плотностей дисперсной фазы и среды из всех слагаемых в уравнении (6) первое имеет гораздо большее значение, чем остальные. К примеру, сила Бассе, может быть существенной только в случае очень быстрого ускорения частицы под действием большой внешней силы, как это происходит в ударной волне [15]. Использование для описания движения частицы закона Стокса также не вносит большой погрешности. Так, при $\rho_d / \rho \geq 1000$ решения, полученные по уравнению (6), практически совпадают с рассчитанными по закону Стокса, а при $\rho_d / \rho = 100$ и $1 < Re_d < 6$ погрешность не превышает 5...10 % [11].

С учетом принятых упрощающих допущений уравнение (6) примет вид

$$\frac{du}{dt} = \frac{18\mu}{\delta^2 \rho_d} (w - u). \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) справедливы при небольших относительных скоростях дисперсной фазы и среды и малых размерах частиц, когда сопротивление среды определяется в основном вязкими силами, т. е. силами инерции можно пренебречь, а критерий Рейнольдса $Re_d = |w - u| \delta \cdot \rho / \mu \ll 1$. В этом случае коэффициент аэродинамического (лобового) сопротивления движению частицы (с погрешностью не более 1 % при $Re_d = 0,05$ [11] и 12,5 % при $Re_d = 1$ [12]) определяется формулой Стокса [15]

$$\psi = 24 / Re_d. \quad (8)$$

Соответственно сила аэродинамического (лобового) сопротивления будет

$$F_c = \psi \frac{\pi \delta^2 \rho (w - u)^2}{4 \cdot 2} = 0,44 \frac{\pi \delta^2 \rho (w - u)^2}{4 \cdot 2}. \quad (9)$$

В восходящем или нисходящем потоке можно считать, что при $\rho_d \gg \rho$ на частицу, кроме силы сопротивления, действует только сила тяжести, направленная вдоль вектора скорости (для нисходящего потока) или в противоположную сторону (для восходящего потока). Тогда уравнение движения примет вид

$$\frac{du}{dt} = \frac{3 \rho}{4 \rho_d} \frac{\psi}{\delta} (w - u)((w - u) \pm g) \quad (10)$$

(верхний знак относится к нисходящему потоку, нижний – к восходящему).

При постоянной скорости потока ($w = \text{const}$) и стоксовском режиме обтекания (8) уравнение движения допускает аналитическое решение:

$$u = w \pm g\tau + C \cdot \exp(-t / \tau), \quad (11)$$

где $\tau = \delta^2 \rho_d / 18\mu$ – время релаксации скорости частицы [15], с; C – константа, зависящая от начальных условий. Если при $t = 0$ $u = u_0$, то в уравнении (11) $C = u_0 - w \pm g\tau$, тогда

$$u = w - (w - u_0) \exp(-t / \tau) \pm g\tau [1 - \exp(-t / \tau)]; \quad (12)$$

если при $t = 0$ $u = w$, то в уравнении (11) $C = \pm g\tau$, соответственно

$$u = w \pm g\tau [1 - \exp(-t / \tau)]. \quad (13)$$

Таким образом, что при $t \gg \tau$ (реально, при $t > 5\tau$) скорость относительного движения принимает постоянное максимальное предельное значение $|w - u| = g\tau$ (при этом $u = w \pm g\tau$). Обычные значения времени релаксации частиц диаметром от 0,1 до 100 мкм в газах лежат в преде-

лах от 10^{-8} до 10^{-2} с, значение предельной скорости относительного движения частиц в осевом направлении – в пределах от 10^{-7} до 0,1 м/с, что также значительно меньше обычных скоростей газа, поэтому скорость мелких частиц часто принимается равной скорости газа. Кроме того, в большинстве случаев с некоторой погрешностью при $t \geq \tau$ можно считать движение частицы безынерционным, а производные от их скорости по времени в уравнении движения равными нулю [13].

Если в уравнении движения (10) коэффициент сопротивления выразить в виде степенной эмпирической зависимости общего вида $\psi = a / Re_d^n$, то при $w = \text{const}$ и $v = w - u$ оно примет вид

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{3}{4} a \frac{\rho}{\rho_d \delta} \left(\frac{v}{\delta} \right)^n v^{2-n} \mp g.$$

Тогда установившаяся скорость относительного движения частиц (при $\delta v / \delta t = 0$), равная скорости витания (седиментации), будет

$$v_s = \pm \left(\frac{4 \rho_d g \delta^{n+1}}{3a \rho v^n} \right)^{\frac{1}{2-n}}.$$

При $a = 24$ и $n = 1$ (закон Стокса) $v_s = \pm \frac{\rho_d g \delta^2}{18\mu} = \pm g\tau$, что соответствует уравнению (13) при $t \rightarrow \infty$.

При $a = 0,44$ и $n = 0$ (закон Ньютона) $v_s = \pm 1,74 \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho} g \delta}$.

Наличие градиентов осредненной и пульсационной составляющих скорости газа приводит к появлению специфической формы продольного движения частиц, в результате чего относительная скорость частиц меняет по сечению канала не только свое значение, но и направление. В общем случае в ядре потока локальные скорости частиц могут быть выше скорости газа, а в периферийной области – ниже, причем средняя по сечению скорость частиц может быть меньше средней скорости газа (на 1,5...2 м/с для высокодисперсных и на 8...10 м/с для крупных частиц) [4]. Отставание частиц дисперсной фазы от сплошной не всегда удается объяснить влиянием только силы тяжести, так как, во-первых, оно характерно и для высокодисперсных частиц и, во-вторых, аналогичная картина наблюдается при течении двухфазных систем в горизонтальных каналах. Определенное влияние на величину продольного скольжения частиц оказывают изменение скорости (разгон) частиц по длине канала, взаимодействие частиц друг с другом (концентрация дисперсной фазы) и со стенками канала, однако основную роль, видимо, играют процессы, связанные с перераспределением частиц с разной скоростью по сечению канала: турбулентная диффузия, подъемная и турбулентная поперечная миграция [4].

При обычных параметрах и условиях течения на частицу, кроме сил, связанных с ее обтеканием (силы аэродинамического сопротивления), и силы тяжести (с поправкой на выталкивающую силу Архимеда), действует поперечная сила Магнуса – Жуковского, возникающая при вращении частицы вокруг собственной оси из-за градиента скорости газа [15]:

$$m \frac{du}{dt} = \sum_i F_i = F_{\text{ж}} + F_c + G + F_A,$$

где u – вектор скорости частицы; $F_{\text{ж}}$, $F_{\text{с}}$, G и $F_{\text{А}}$ – векторы сил Магнуса – Жуковского, сопротивления, тяжести и Архимеда соответственно.

Градиент продольной скорости газа приводит к вращению частицы вокруг своей оси и поперечному движению (подъемной миграции) частиц, причиной которого является поперечная сила, действующая на обтекаемое тело при его вращении вокруг оси, перпендикулярной направлению движения (эффект Магнуса), отсюда сила Магнуса – Жуковского [9]:

$$F_{\text{ж}} = \frac{\pi}{8} \rho d^3 [\Omega \times v],$$

где Ω – угловая скорость вращения частицы, с^{-1} ; v – вектор скорости относительного движения частицы, $\text{м} / \text{с}$. Сила Магнуса – Жуковского направлена под прямым углом к вектору относительной скорости частицы в сторону максимального значения суммы тангенциальных составляющих скоростей обтекания и вращения (рис. 2).

Система уравнений двухмерного нисходящего или восходящего движения частицы в газовом потоке в проекциях на оси координат может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_d} \right) &= \frac{\rho}{\rho_d} \frac{dw}{dr} \frac{dr}{dt} - \\ - \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_d} \frac{\psi}{\delta} \left(\frac{dz}{dt} - w \right) \sqrt{\left(\frac{dz}{dt} - w \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2} &\pm \left(1 - \frac{\rho}{\rho_d} \right) g, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_d} \right) &= \frac{\rho}{\rho_d} \left(w - \frac{dz}{dt} \right) \frac{dw}{dr} - \\ - \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_d} \frac{\psi}{\delta} \frac{dr}{dt} \sqrt{\left(\frac{dz}{dt} - w \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Система дифференциальных уравнений (14)–(15) в общем виде при заданных начальных условиях ($t = 0, z = 0, r = r_0, \delta z / \delta t = u_{z0}, \delta r / \delta t = u_{r0}$) в общем виде может быть решена только численными методами. Некоторые результаты численного решения методом Рунге – Кутты второго порядка для восходящего и нисходящего двухфазных потоков представлены на рис. 3.

Анализ результатов расчетов для системы воздух – вода в широких интервалах изменения основных параметров ($D = 10 \dots 100$ мм, $w_{\text{ср}} = 5 \dots 100$ м / с, $\delta = 1 \dots 1000$ мкм, $r_0 / R = 0 \dots 1, u_0 / w(r) = 0 \dots 1$) позволяет сделать следующие выводы:

- в восходящем газодисперсном потоке частицы под действием градиента осевой скорости в целом перемещаются к оси канала, в нисходящем – к стенке. Но для турбулентных потоков, в которых траектории частиц определяются не только детерминированными силами, но и случайными воздействиями турбулентных пульсаций газа, это явление проявляется только как общая тенденция и на больших расстояниях от входа;

- при обычных значениях основных параметров газодисперсных потоков относительная осевая скорость частиц быстро становится равной скорости седиментации;

- подъемная сила Магнуса – Жуковского при обычных значениях основных параметров турбулентного газодисперсного потока может оказывать существенное влияние на движение только достаточно крупных частиц ($\delta > 50 \dots 100$ мкм) с небольшими начальными скоростями и в пределах ламинарного пристенного и буферного слоя.

В реальных условиях поведение дисперсных систем при турбулентном режиме отличается от идеального. Отклонения траекторий дисперсных частиц от расчетных (равновесных) могут быть вызваны турбулентными пульсациями газа, регенерацией свободной поверхности частиц за счет их взаимодействия с поверхностью канала или между собой, а также дробления. Поэтому расчетные зависимости и траектории частиц в турбулентном газодисперсном потоке можно рассматривать только как осредненные или как тенденции поведения частиц.

Полученные результаты расчетов экспериментально подтверждаются данными экспериментальных исследований [4; 11; 16]. Установлено, что в зависимости от направления течения и соотношения плотностей фаз частицы могут перемещаться перпендикулярно оси канала в обоих направлениях. В вертикальном нисходящем течении частицы при $\rho_d / \rho > 1$ перемещаются к стенке, при-

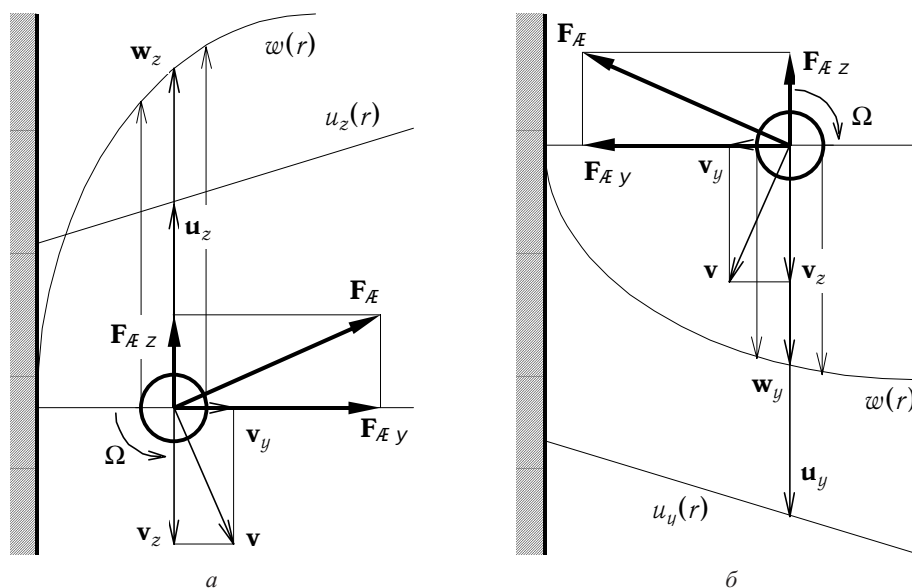


Рис. 2. Схема возникновения подъемной силы в восходящем (а) и нисходящем (б) потоках

чем максимальная концентрация частиц наблюдается при $r/R \approx 0,85$. В восходящем потоке при значениях $Re_d \approx 10$ тяжелые частицы монотонно приближаются к оси трубы, а при $16 < Re_d < 120$ они сначала осциллируют относительно оси [16]. Относительная скорость мелких частиц становится равной скорости витания на расстоянии не более 0,1 м от входа.

Библиографический список

1. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. М. : Высш. шк., 1991. 400 с.
2. Роди, В. Модели турбулентности окружающей среды / В. Роди // Методы расчета турбулентных течений. М., 1984. С. 227–322.
3. Сабуров, Э. Н. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах / Э. Н. Сабуров, С. В. Карпов, С. И. Осташев. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. 276 с.
4. Сугак, Е. В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами / Е. В. Сугак, Н. А. Войнов, Н. А. Николаев. Казань : Школа, 1999. 224 с.
5. Хьюитт, Дж. Кольцевые двухфазные течения / Дж. Хьюитт, Н. Холл-Тейлор. М. : Энергия, 1974. 408 с.
6. Овчинников, А. А. Основы гидромеханики двухфазных сред / А. А. Овчинников, А. Н. Николаев : Казан. гос. технол. ун-т. Казань, 1998. 112 с.
7. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. М. : Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
8. Гилинский, М. М. Сверхзвуковые газодисперсные

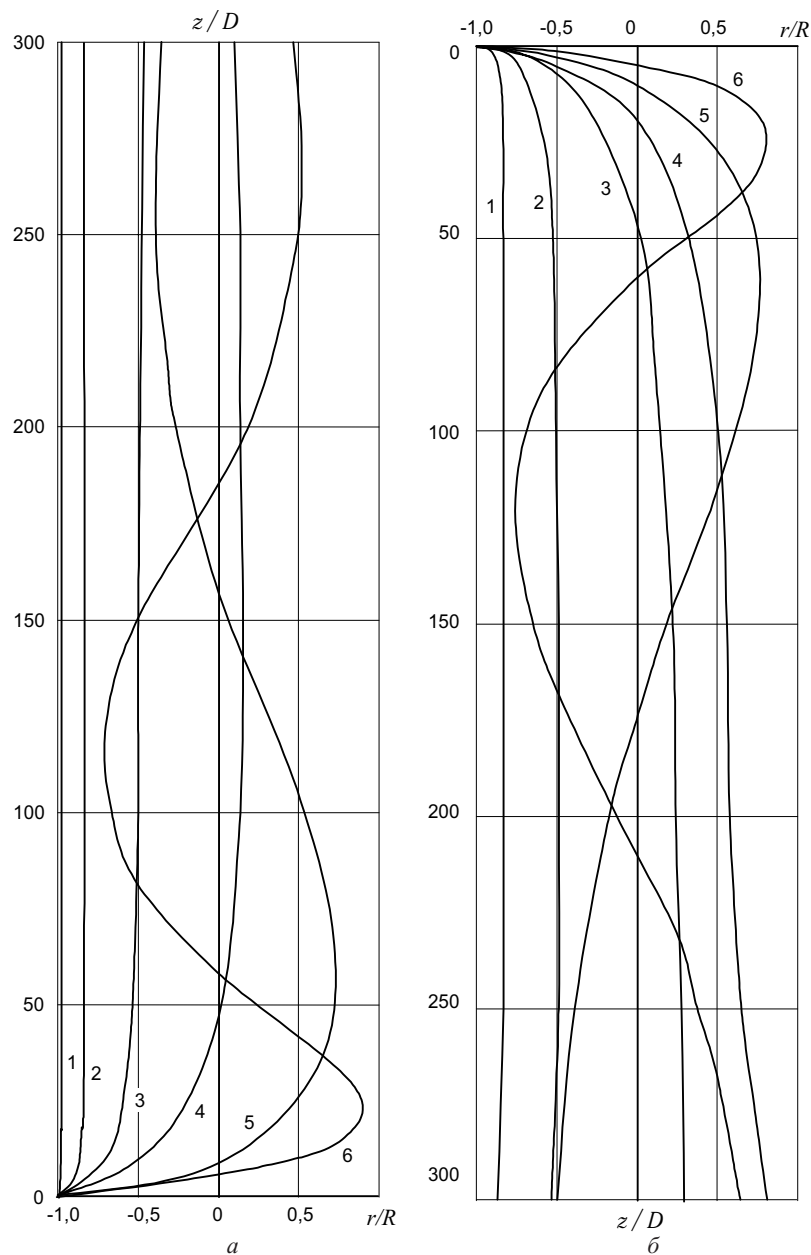


Рис. 3. Равновесные траектории частиц в восходящем (а) и нисходящем (б) потоках для системы воздух – вода при нормальных условиях:
 $y_0 = 0$; $u_0 = 0$; $D = 50$ мм; $w_{cp} = 50$ м / с; $\delta = 20$ мкм (1);
 50 мкм (2); 100 мкм (3); 200 мкм (4); 500 мкм (5); 1 000 мкм (6)

струи / М. М. Гилинский, А. Л. Стасенко. М. : Машиностроение, 1990. 176 с.

9. Протодяконов, И. О. Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость–твердое тело / И. О. Протодяконов, И. Е. Люблинская, А. Е. Рыжков. Л. : Химия. Ленингр. отд-ние, 1987. 336 с.

10. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1 / Р. И. Нигматулин. М. : Наука, 1987. 464 с.

11. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус. М. : Химия, 1981. 616 с.

12. Протодяконов, И. О. Гидромеханические основы процессов химической технологии / И. О. Протодяконов, Ю. Г. Чесноков. Л. : Химия. Ленингр. отд-ние, 1987. 360 с.

13. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. М. : Высш. шк., 1991. 400 с.

14. Soo, S. L. Turbulent pipe flow of magnesia particles in air / S. L. Soo, G. L. Trezek // Ind. and Eng. Chem. Fundam. 1966. Vol. 5, № 3. P. 388–392.

15. Колыхан, Л. И. Тепломассоперенос при фазовых превращениях диссоциирующих теплоносителей / Л. И. Колыхан, В. Ф. Пуляев, В. Н. Соловьев. Минск : Наука и техника, 1984. 256 с.

16. Denson, C. D. Particle migration in shear fields / C. D. Denson, E. B. Christiansen, D. L. Salt // AIChE J. 1966. Vol. 12, № 3. P. 589–595.

E. V. Sugak, E. V. Kuznetsov, S. G. Shakhrai

THE DYNAMICS OF GAS-DISPERSION FLOW IN THE UPTAKE

Questions of the simulation of the motion of dispersed phase in the turbulent gas-dispersion ascending and descending flows are examined. Range of model's application – increase in the effectiveness of processes and apparatuses for removal of gaseous and highly dispersed admixtures from industrial gas wastes in the apparatuses with the intensive hydrodynamic regimes.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Рассмотрены методологические особенности вычисления статической ошибки имитаторов солнечных батарей при широкодиапазонном изменении нагрузки.

Имитаторы солнечных батарей (ИСБ) получили широкое распространение при наземных испытаниях энергосистем космических аппаратов. Для повышения точности испытаний необходимо обеспечивать достаточно малые погрешности воспроизведения имитатором вольт-амперных характеристик (ВАХ) солнечных батарей (СБ). Автором в работе [1] приведены наиболее распространенные структуры ИСБ, и для оценки точности имитаторов предлагается использовать приведенные ошибки.

Рассмотрим методологические особенности вычисления приведенных ошибок воспроизведения ВАХ имитаторов различных структур. Все вычисления проводились в пакете математического моделирования MathCAD 11.

Вольт-амперная характеристика солнечной батареи описывается выражением

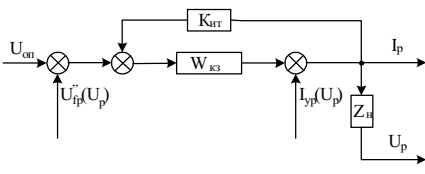
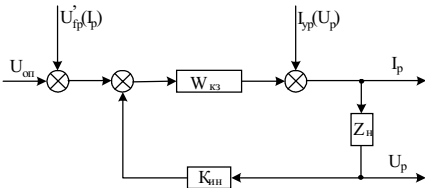
$$I_T(U_T) = I_{к.з} \left[1 - e^{-10 \left(\frac{U_T}{U_{х.х}} - 1 \right)} \right], \quad (1)$$

где $U_{х.х}$ – напряжение холостого хода; $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания; I_T и U_T – требуемые значения тока и напряжения.

Линеаризуя нелинейные уравнения [1], описывающие процессы в ИСБ, получим выражения для реальных токов, напряжений и функциональные схемы ИСБ (см. таблицу).

Приведенная ошибка по току (рис. 1) при одном и том же напряжении нагрузки $U_T = U_p = U$ (рис. 1, а) рассчитывается по следующей формуле:

Характеристики структур имитаторов СБ

Тип структуры	Функциональная схема	Основные атрибуты ИСБ
Стабилизатор тока с функциональной обратной связью по напряжению нагрузки (СТФОН)		Зависимость реального тока нагрузки от напряжения $I_p(U_p) = \frac{[U_{оп} - f_{н.п}(U_p)]W_{к.з} - I_{y.p}(U_p)}{1 + K_{и.т} \cdot W_{к.з}}$ где $K_{и.т}$ – коэффициент передачи измерителя тока; $U_{оп}$ – значение опорного напряжения; $W_{к.з}$ – передаточная функция усилителя мощности в режиме короткого замыкания; $I_{y.p}(U_p) = U_p \cdot b - U_p^2 \cdot k$ – падение тока на внутренней проводимости усилителя мощности; $f_{н.п}(U_p) = K_{и.т}(I_{к.з} - I_T(U_p))$ – характеристика нелинейного преобразователя в цепи по напряжению. Выходной адмитанс ИСБ $Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{ф.п}(U_p) \cdot W_{к.з}}{1 + K_{и.т} \cdot W_{к.з}},$ где $K_{ф.п}(U_p) = \frac{d}{dU_p} f_{н.п}(U_p)$ – коэффициент передачи функционального преобразователя по напряжению; $Y_0(U_p) = \frac{d}{dU_p} I_{y.p}(U_p)$ – проводимость нелинейного элемента в силовой цепи
Стабилизатор напряжения с функциональной обратной связью по току нагрузки (СНФОТ)		Зависимость реального тока нагрузки от напряжения $I_p(U_p) = \frac{[U_{оп} - f_{н.п}(I_p)]W_{к.з} - I_{y0}(U_p)}{1 + K_{и.н} \cdot W_{к.з} \cdot Z_n(U_p)}$ где $f_{н.п}(I_p) = (U_{х.х} - U_T(I_p))K_{и.н}$ – характеристика нелинейного преобразователя в цепи по току; $Z_n(U)$ – сопротивление нагрузки. Выходной адмитанс ИСБ $Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{и.н} \cdot W_{к.з}}{1 + K_{ф.п}(I_p) \cdot W_{к.з}},$ где $K_{ф.п}(I_p) = \frac{d}{dI_p} f_{н.п}(I_p)$ – коэффициент передачи функционального преобразователя по току; $K_{и.н}$ – коэффициент передачи измерителя напряжения

$$\delta_{\text{пр}I}(U) = \left| \frac{I_{\text{т}}(U) - I_{\text{р}}(U) + (Y_{\text{т}}(U) - Y_{\text{р}}(U) \cdot \Delta U)}{I_{\text{к.з}}} \right| 100\%, (2)$$

где $I_{\text{р}}(U)$ – реальное значение выходной величины; $Y_{\text{т}}(U)$ – требуемый адмитанс (полная внутренняя проводимость) СБ; $Y_{\text{р}}(U)$ – выходной адмитанс СБ; ΔU – шаг изменения напряжения.

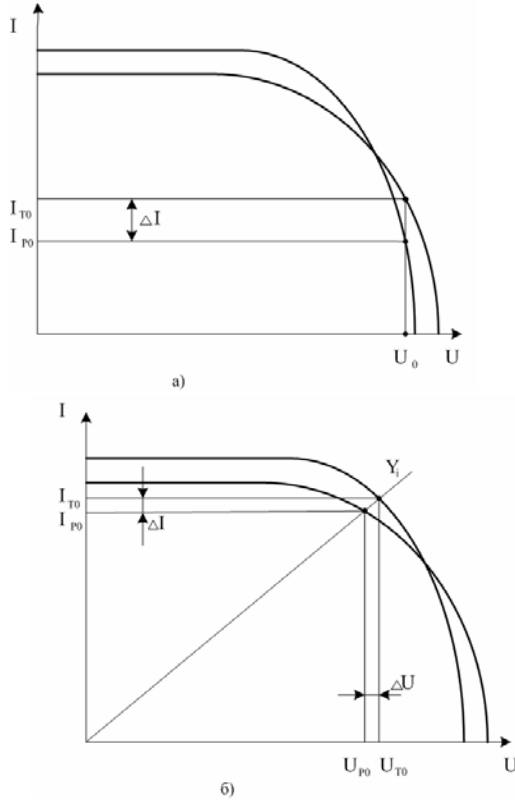


Рис. 1. Нахождение приведенной ошибки: а – при одном и том же напряжении нагрузки; б – при одной и той же проводимости нагрузки

Расчет приведенной ошибки при одной и той же проводимости (рис. 1, б) осуществляется по следующим формулам:

$$\delta_{\text{пр}I}(Y) = \left| \frac{I_{\text{т}}(Y) - I_{\text{р}}(Y) + \left[\frac{d}{dY} I_{\text{т}}(Y) - \frac{d}{dY} I_{\text{р}}(Y) \right] \Delta Y}{I_{\text{к.з}}} \right| 100\%, (3)$$

$$\delta_{\text{пр}U}(Y) = \left| \frac{U_{\text{т}}(Y) - U_{\text{р}}(Y) + \left[\frac{d}{dY} U_{\text{т}}(Y) - \frac{d}{dY} U_{\text{р}}(Y) \right] \Delta Y}{U_{\text{х.х}}} \right| 100\%, (4)$$

$$\delta_{\text{пр}}(Y) = \sqrt{\delta_{\text{пр}I}(Y)^2 + \delta_{\text{пр}U}(Y)^2}, (5)$$

где $I_{\text{т}}(Y)$, $U_{\text{т}}(Y)$, $I_{\text{р}}(Y)$, $U_{\text{р}}(Y)$ – требуемые и реальные значения токов и напряжений при одной и той же проводимости; $\delta_{\text{пр}I}(Y)$, $\delta_{\text{пр}U}(Y)$ – приведенные ошибки по току и напряжению при одной и той же проводимости; ΔY – шаг изменения проводимости; $\delta_{\text{пр}}(Y)$ – полная приведенная ошибка при одной и той же проводимости.

Порядок вычисления приведенной ошибки по току при одном и том же напряжении нагрузки для структуры СТФОН следующий:

1. Найдем значение $K_{\text{и.т}}$:

$$K_{\text{и.т}} = \frac{U_{\text{оп}}}{I_{\text{к.з}}}. (6)$$

2. По известному выражению (1) ВАХ СБ вычислим точные значения тока $I_{\text{т}}(U)$.

3. Определим значения адмитанса СБ $Y_{\text{т}}(U)$ по формуле

$$Y_{\text{т}} = - \left(\frac{d}{dU} I_{\text{т}}(U) \right). (7)$$

4. По функциональной схеме СТФОН (см. таблицу) найдем для тех же значений напряжения нагрузки реальные значения тока $I_{\text{р}}(U)$ и выходного адмитанса $Y_{\text{р}}(U)$.

5. Вычислим значение приведенной ошибки $\delta_{\text{пр}I}(U)$ по формуле (2).

График приведенной ошибки при следующих исходных данных: $U_{\text{х.х}} = 80$, $W_{\text{к.з}} = 1\,000$, $U_{\text{оп}} = 8$, $I_{\text{к.з}} = 25$ – имеет вид (рис. 2).

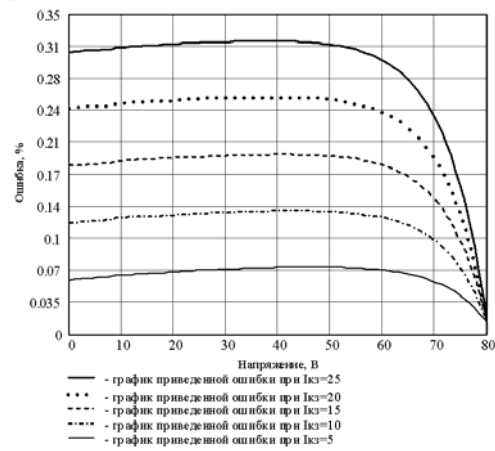


Рис. 2. График приведенной ошибки при одном и том же напряжении для структуры СТФОН

Вычислим приведенную ошибку по току при одном и том же напряжении нагрузки для структуры СНФОТ следующим образом:

1. Найдем значение $K_{\text{и.н}}$:

$$K_{\text{и.н}} = \frac{U_{\text{оп}}}{U_{\text{х.х}}}. (8)$$

2. По выражению (1) ВАХ СБ вычислим точные значения тока $I_{\text{т}}(U)$.

3. Определим значения адмитанса СБ $Y_{\text{т}}(U)$ по формуле (7).

4. Вычислим значения сопротивления нагрузки $Z_{\text{н}}(U)$ по формуле

$$Z_{\text{н}}(U) = \frac{U}{I_{\text{т}}(U)}.$$

5. По функциональной схеме СНФОТ (см. таблицу) найдем для тех же значений напряжения нагрузки реальные значения тока $I_{\text{р}}(U)$ и выходного адмитанса $Y_{\text{р}}(U)$. Формула для определения реального тока с учетом преобразований принимает вид

$$I_{\text{р}}(U) = \frac{[U_{\text{оп}} - (U_{\text{х.х}} - U_{\text{т}}(I_{\text{р}}))] W_{\text{к.з}} - I_{\text{у0}}(U)}{1 + K_{\text{и.н}} \cdot W_{\text{к.з}} \cdot Z_{\text{н}}(U)}. (9)$$

Уравнение (9) неявное, для его решения используем функцию Minerr, которая ищет приближенное решение методом минимизации общей погрешности.

6. Вычислим значение приведенной ошибки $\delta_{\text{пр}I}(U)$ по формуле (2).

Для иллюстрации представим график приведенной ошибки при следующих исходных данных: $U_{x.x} = 80$, $W_{к.з} = 1\,000$, $U_{оп} = 8$, $I_{к.з} = 25$ (рис. 3).

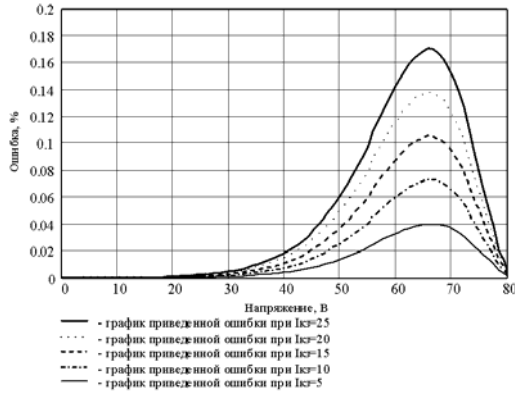


Рис. 3. График приведенной ошибки при одном и том же напряжении для структуры СНФОТ

Порядок вычисления приведенной ошибки при одной и той же проводимости нагрузки для структуры СТФОН таков:

1. Найдем значение $K_{н.т}$ по выражению (6).
2. Для нахождения $I_t(Y)$ решим систему уравнений

$$\begin{cases} I_t = I_{к.з} \left[1 - e^{-10 \left(\frac{U}{U_{x.x}} - 1 \right)} \right] \\ I_t = U \cdot Y. \end{cases} \quad (10)$$

3. Для решения системы уравнений (10) воспользуемся функцией root MathCAD

$$U_t(Y) = \text{root} \left(f_t(U, Y), U, 0, U_{x.x} \right),$$

$$\text{где } f_t(U, Y) = I_{к.з} \left[1 - e^{-10 \left(\frac{U}{U_{x.x}} - 1 \right)} \right] - U \cdot Y. \quad (11)$$

4. Зная зависимость напряжения $U_t(Y)$ от проводимости, найдем зависимость тока $I_t(Y)$ от проводимости по выражению

$$I_t(Y) = U_t(Y) \cdot Y. \quad (12)$$

5. По функциональной схеме СТФОН (см. таблицу) найдем выражения для реальных характеристик $I_p(Y)$ и $U_p(Y)$. Для нахождения $I_p(Y)$ решим систему уравнений

$$\begin{cases} I_p = \frac{U_{оп} - [I_{к.з} - I_t(U)K_{н.т}] - (U \cdot b - U^2 \cdot k)}{1 + K_{н.т} \cdot W_{к.з}}, \\ U_p = \frac{I_p}{Y}. \end{cases}$$

6. Используя функцию root, определим $I_p(Y)$:

$$I_p(Y) = \text{root} \left(f_p(I, Y), I, 0, I_{к.з} \right),$$

$$\text{где } f_p(I, Y) = I - \frac{\left[U_{оп} - I_{к.з} \cdot e^{-10 \left(\frac{I/Y}{U_{x.x}} - 1 \right)} \cdot K_{н.т} \right] W_{к.з} - \left[\frac{I}{Y} b - \left(\frac{I}{Y} \right)^2 k \right]}{1 + K_{н.т} \cdot W_{к.з}}.$$

7. Зная $I_p(Y)$, найдем $U_p(Y)$ по выражению

$$U_p(Y) = \frac{I_p(Y)}{Y}. \quad (13)$$

8. По формуле (3) определим приведенную ошибку по току при одной и той же проводимости.

9. По формуле (4) вычислим приведенную ошибку по напряжению при одной и той же проводимости.

10. По формуле (5) найдем полную приведенную ошибку при одной и той же проводимости.

График приведенной ошибки при следующих исходных данных: $U_{x.x} = 80$, $W_{к.з} = 1\,000$, $U_{оп} = 8$, $I_{к.з} = 25$ – можно представить в следующем виде (рис. 4).

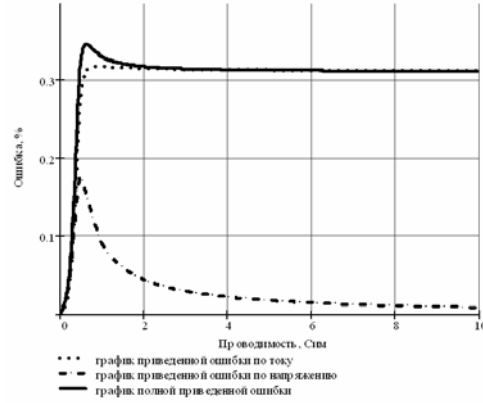


Рис. 4. График приведенной ошибки при одной и той же проводимости для структуры СТФОН

Покажем порядок вычисления приведенной ошибки при одной и той же проводимости нагрузки для структуры СНФОТ:

1. Найдем значение $K_{н.н}$ по выражению (8).
2. Для нахождения $I_t(Y)$ решим систему уравнений (10).
3. Для решения системы уравнений (10) воспользуемся функцией root MathCAD:

$$U_t(Y) = \text{root} \left(f_t(U, Y), U, 0, U_{x.x} \right),$$

где $f_t(U, Y)$ представлено выражением (11).

4. Зная зависимость напряжения $U_t(Y)$ от проводимости, найдем зависимость тока $I_t(Y)$ от проводимости по выражению (12).

5. По функциональной схеме СНФОТ (см. таблицу) находим выражения для реальных характеристик $I_p(Y)$ и $U_p(Y)$. Для нахождения $I_p(Y)$ решим систему уравнений

$$\begin{cases} I_p = \frac{U_{оп} - [U_{x.x} - U_t(I_p)K_{н.н}] - (U \cdot b - U^2 \cdot k)}{1 + K_{н.н} \cdot W_{к.з} \cdot Z_{н}}, \\ U_p = \frac{I_p}{Y}. \end{cases}$$

6. Сопротивление нагрузки определим как величину, обратную проводимости:

$$Z_{н} = \frac{1}{Y}.$$

7. Используя функцию root, найдем $I_p(Y)$:

$$I_p(Y) = \text{root} \left(f_p(I, Y), I, 0, I_{к.з} \right),$$

$$\text{где } f_p(I, Y) = I - \frac{\left[U_{оп} + \frac{U_{x.x}}{10} \ln \left(\frac{I_{к.з} - I}{I_{к.з}} \right) K_{н.н} \right] W_{к.з} - \left[\frac{I}{Y} b - \left(\frac{I}{Y} \right)^2 k \right]}{1 + K_{н.н} \cdot W_{к.з} \cdot 1/Y}.$$

8. Зная $I_p(Y)$, можно найти $U_p(Y)$ по выражению (13).

9. По формуле (3) найдем приведенную ошибку по току при одной и той же проводимости.

10. По формуле (4) определим приведенную ошибку по напряжению при одной и той же проводимости.

11. По формуле (5) вычислим полную приведенную ошибку при одной и той же проводимости.

Представим график приведенной ошибки при следующих исходных данных: $U_{x,x} = 80$, $W_{к.з} = 1\,000$, $U_{оп} = 8$, $I_{к.з} = 25$ (рис. 5).

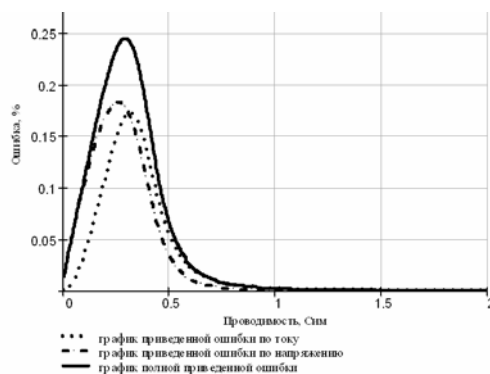


Рис. 5. График приведенной ошибки при одной и той же проводимости для структуры СНФОТ

Таким образом, сделаем следующие выводы:

– разработанное методологическое обеспечение позволяет вычислять установившиеся ошибки воспроизведения нелинейных ВАХ СБ, проводить сравнительный анализ разных типов имитаторов по величине установившейся ошибки, производить выбор параметров имитаторов, обеспечивающих требуемую величину установившейся ошибки;

– структуры СНФОТ и СТФОН имеют примерно одну и ту же точность, и по одному показателю – установившейся ошибке – выбор требуемой структуры имитатора СБ осуществить затруднительно.

Библиографический список

1. Мизрах, Е. А. Методология оценки точности имитаторов первичных источников электроэнергии космических аппаратов / Е. А. Мизрах // Вестн. Сиб. аэрокосмич. акад. им. акад. М. Ф. Решетнева : сб. науч. тр. / под ред. проф. Г. П. Белякова ; Сиб. аэрокосмич. акад. Вып. 2. Красноярск, 2001. С. 59–64.

Е. А. Mizrakh

THE ANALYSIS OF STATIC ACCURACY OF SOLAR BATTERIES SIMULATORS

This article deals with methodical peculiarities of calculation of static accuracy of solar batteries simulators under wide-range variation of loading.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМ

Выполнен анализ существующих разработок для создания систем высокого порядка, оптимальных по быстродействию. Представлена простая методика синтеза, основанная на методе фазовых траекторий, которая включает все этапы создания оптимальной по быстродействию системы, от исходного описания в виде дифференциального уравнения или передаточной функции до формирования корректирующего звена.

При решении задачи создания системы высокого порядка, оптимальной по быстродействию, и наличии ограничений на управляющее воздействие $|U| \leq U_{\max}$ структурная схема системы соответствии с принципом максимума Понтрягина может быть представлена в следующем виде (см. рисунок).

Необходимо определить вид и параметры функции $S(\epsilon)$, при которой система переходит из одного устойчивого состояния в другое за минимальное время.

В дальнейшем под системой высокого порядка будем понимать системы третьего и четвертого порядка. Методика создания систем второго порядка хорошо изучена и не представляет сложностей [1]. Но для систем высокого порядка не существует простой и четко сформулированной методики синтеза, несмотря на то, что различные разработки в этой области ведутся уже давно: они сводятся к получению либо частных решений, либо сложных математических выражений, практически не реализуемых.

Приведем несколько примеров. А. В. Пузаковым была предложена методика синтеза регуляторов релейных следящих преобразователей напряжения по функциям Ляпунова [2], найденным на основании описания силовой части объекта регулирования и задаваемого функционала качества переходных процессов. В [2] также были приведены примеры конкретных вариантов выполнения, которые основывались на методе динамического программирования Беллмана.

Синтез систем высокого порядка, оптимальных по быстродействию, используя аппарат нелинейного программирования, рассматривал К. А. Пупков.

На основе метода фазовых траекторий вел свои разработки А. А. Павлов [4]. Суть его предложений сводится к тому, что если процедура синтеза оптимального управления связана с определением гиперповерхности переключения в n -мерном фазовом пространстве $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ и оптимальная гиперповерхность переключения заполнена фазовыми траекториями, то в первую очередь необходимо найти уравнения проекций этих траекторий. Кроме того, методика синтеза оптимальных систем вы-

сокого порядка предусматривает возможность получения явных функций, но выполнить это затруднительно.

Отметим также, что рассмотренные методы синтеза системы высокого порядка, оптимальной по быстродействию, достаточно сложны в реализации при невысокой точности решений.

Особое место занимают методики синтеза квазиоптимальных систем высокого порядка. Одни из возможных способов построения квазиоптимальных систем автоматического управления состоит в аппроксимации дифференциального уравнения высокого порядка уравнением второго или первого порядка с запаздыванием. Такой способ подробно рассмотрен А. А. Павловым [4] и К. А. Пупковым [3].

Предлагаемая авторами методика синтеза предполагает рассмотрение синтезируемой системы как квазиоптимальной и основана на методе фазовых траекторий.

Закон оптимального управления формируется в виде нелинейной зависимости координаты управления от вектора состояния системы, определяемого функцией переключения (см. рисунок):

$$U = U_{\max} \text{Sign}[S(\epsilon)]. \quad (1)$$

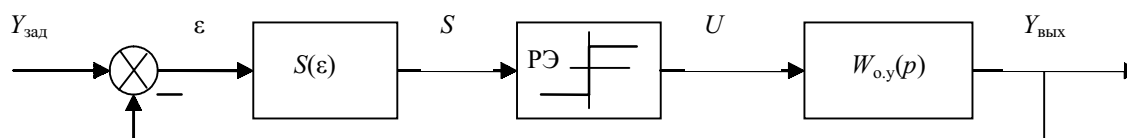
Задача нахождения оптимального управления $U_{\text{оп}}$ сводится к отысканию функции переключения $S(\epsilon)$. Релейный элемент переключается тогда, когда функция переключения меняет знак, отсюда уравнение переключения имеет вид:

$$S(\epsilon) = 0. \quad (2)$$

Данное уравнение для систем второго порядка определяет линию в фазовом пространстве, для систем третьего порядка – поверхность, а для систем порядка выше третьего – гиперповерхность в координатах ошибки и ее производных.

Предлагаемая методика синтеза системы высокого порядка, оптимальной по быстродействию, состоит из следующих этапов [5]:

- определение описания гиперповерхности переключения;
- аппроксимация поверхности;



Структурная схема системы: $W_{\text{о.у}}(p)$ – передаточная функция объекта управления;

РЭ – релейный элемент, обеспечивающий ступенчатое изменение управляющего воздействия

U от $-U_{\max}$ до $+U_{\max}$ и наоборот, $S(\epsilon)$ – блок, реализующий определенную функцию переключения

релейного элемента S в функции ошибки системы

– формирование коррекции.

Описание поверхности переключения следует находить в виде набора точек в n -мерном фазовом пространстве. В этом случае необходимо решить систему дифференциальных уравнений с применением принципа обратного времени на определенном интервале времени $t_0 - t_k$. Сложность решения последующей задачи аппроксимации при удовлетворении требования квазиоптимальности определяется значением t_k . Чтобы получить наилучший результат, выбираем границу интервала времени t_k , исходя из порядка системы и вида корней характеристического уравнения объекта управления.

Проведенные исследования выявили следующие результаты:

1) для системы третьего порядка:

а) три отрицательных действительных корня:
 $t_k \approx 1 \dots 1,5\tau$, где τ – коэффициент, вычисляемый как

$$\tau = \sqrt[n]{c_n}, \quad (3)$$

здесь c_n – коэффициент при старшей производной дифференциального уравнения системы; n – порядок системы;

б) один отрицательный действительный корень и два отрицательных мнимых: $t_k \approx 3 \dots 4\tau$;

2) для системы четвертого порядка:

а) четыре отрицательных действительных корня:
 $t_k \approx 2,5 \dots 4\tau$;

б) четыре отрицательных мнимых корня: $t_k \approx 3,5 \dots 5\tau$.

в) два отрицательных действительных корня и два отрицательных мнимых корня (в системе происходят автоколебания).

На втором этапе проводится аппроксимация поверхности переключения некоторым аналитическим выражением с использованием уже имеющихся точек поверхности. Остановимся на выборе выражения для аппроксимации. Его выбор влияет на сложность реализации коррекции в системе. Поэтому выражение должно быть простым, и по возможности, близким к реальной поверхности. В литературе предлагается множество различных способов аппроксимации. Рассмотрим основные из них.

В качестве первого способа предлагается способ аппроксимации, основанный на разложении в ряд по функциям одной переменной [6]. Аппроксимация ведется с помощью суммы функций одной переменной:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_{k0}(x_k), \quad (4)$$

где $\Phi_{k0}(x_k)$ – некоторые функции.

Следующий способ основан на представлении поверхности переключения отрезком степенного ряда. При этом способе аппроксимации уравнение аппроксимированной поверхности ищется в виде

$$x_n = c_{10}x_1 + \dots + c_{n0}x_n + c_{11}x_1^2 + \dots + c_{12}x_1x_2 + \dots + c_{n1}x_nx_1 + \dots, \quad (5)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ – переменные; $c_{10}, \dots, c_{n0}, c_{11}, c_{12}, \dots, c_{n1}$ – коэффициенты.

Третий способ – аппроксимация поверхности переключения с помощью полиномов. А. М. Летовым предложен полином в виде квадратичной формы [7]:

$$\sum_{i,j=1}^n A_{ij}x_ix_j, \quad (6)$$

где x_i, x_j – переменные; A_{ij} – коэффициенты.

Самый простой способ – это аппроксимация полиномом первой степени:

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i, \quad (7)$$

где x_i – переменные; a_i – коэффициенты. Применение выражения (7) для аппроксимации поверхности переключения означает аппроксимацию гиперповерхности гиперплоскостью. Несмотря на серьезное упрощение аналитического выражения поверхности переключения, полином первой степени более других подходит для систем третьего и четвертого порядка, оптимальных по быстродействию, так как он позволяет получить высокие результаты при простом корректирующем устройстве.

Выбор метода аппроксимации не оказывает значительного влияния на точность результатов. Для получения аналитического выражения поверхности переключения можно использовать метод наименьших квадратов. Рассмотрим использование этого метода подробнее.

Выражение (7) при использовании сигнала ошибки примет вид

$$\sum_{i=0}^{n-1} a_i \epsilon^{(i)}, \quad (8)$$

где $\epsilon^{(i)}$ – i -я производная ошибки системы; n – порядок системы.

Значения всех производных ошибки известны, и требуется найти коэффициенты a_i . Поэтому формируем нормальную систему метода наименьших квадратов, используя зависимость ϵ^0 от остальных производных:

$$\sum_{j=0}^n \left(\sum_{i=0}^n \epsilon_i^{j+k} \right) a_j = \sum_{i=0}^n \epsilon_i^0 \cdot \epsilon_i^k, \quad (9)$$

где $k=1, 2, \dots, n$.

Полученная система (9) – это система алгебраических уравнений относительно неизвестных $a_0, a_1, \dots, a_n$. Решение нормальной системы найдем методом Гаусса:

$$a = A^{-1}B, \quad (10)$$

где a – вектор коэффициентов уравнения гиперповерхности переключения; A – матрица левой части системы уравнений частных производных; B – вектор правой части системы уравнений частных производных.

Сформировав поверхность переключения в виде

$$\sum_{i=0}^{n-1} a_i \epsilon^{(i)} = 0, \quad (11)$$

перейдем к третьему этапу методики.

Поверхности переключения (11) соответствует звено коррекции с передаточной функцией:

$$W_k(p) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i p^i. \quad (12)$$

Передаточная функция звена коррекции (12) лишь теоретически заставляет систему работать нужным образом. На практике реализация передаточной функции, у которой порядок числителя больше порядка знаменателя, не применяется из-за того, что в реальной системе всегда присутствуют различные сигналы шума и применение дифференцирования ведет к потере полезного сигнала. Поэтому реализуем звено коррекции с передаточной функцией:

$$W_k(p) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} a_i p^i}{\sum_{i=0}^{n-1} b_i p^i}. \quad (13)$$

Это интегро-дифференциальное звено. Для реализации коррекции необходимо подобрать коэффициенты b_i в знаменателе таким образом, чтобы на каком-то участке частотной характеристики звено вело себя как дифференцирующее, обеспечивая оптимальность по быстродействию, а на высоких частотах как обыкновенное усильтельное. Предлагаем следующую последовательность действий:

1. Вычислим вспомогательный коэффициент aT_{n-1} и извлечем из него корень $(n-1)$ степени:

$$aT_{n-1} = \sqrt[n-1]{a_{n-1}}. \quad (14)$$

2. Вычислим вспомогательный коэффициент bT_{n-1} :

$$bT_{n-1} = \frac{aT_{n-1}}{kp}, \quad (15)$$

где kp – коэффициент, зависящий от порядка уравнения и его корней. Проведенные исследования соотношения (15) дали следующие результаты по определению значения kp : для системы второго порядка $kp = 10 \dots 20$; для системы третьего порядка $kp = 20 \dots 60$; для системы четвертого порядка $kp = 30 \dots 100$.

3. Знаменатель передаточной функции (13) сформируем как произведение $(n-1)$ звеньев

$$\sum_{i=0}^{n-1} b_i p^i = \prod_{i=1}^{n-1} (bT_{n-1} p + 1). \quad (16)$$

Как показывают исследования, формирование знаменателя передаточной функции коррекции (13) в форме (16) облегчает в дальнейшем ее практическую реализацию.

В итоге сформирована передаточная функция корректирующего устройства, обеспечивающего системе квазиоптимальность по быстродействию, которое может быть построено на операционных усилителях.

Таким образом, предложена методика синтеза систем высокого порядка (третьего и четвертого), оптимальных по быстродействию. Данная методика достаточно проста, в связи с чем проектирование систем высокого порядка может быть легко автоматизировано с помощью широко применяемых математических пакетов.

Библиографический список

1. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. М. : Высш. шк., 1989. 262 с.
2. Пузаков, А. В. Синтез регуляторов импульсных стабилизаторов напряжения следящего типа / А. В. Пузаков, А. Б. Остапчук, Т. Б. Остапчук // Техн. электродинамика. 1992. № 6. С. 31–39.
3. Пупков, К. А. Методы синтеза оптимальных систем автоматического управления: учеб. для вузов / К. А. Пупков, Н. В. Фалдин, Н. Д. Егупов ; под ред. Н. Д. Егупова. М. : Изд-во МГТУ, 2000. 511 с.
4. Павлов, А. А. Синтез релейных систем, оптимальных по быстродействию: Метод фазового пространства / А. А. Павлов. М. : Наука, 1966. 390 с.
5. Замятин, Д. В. Синтез систем высокого порядка, оптимальных по быстродействию / Д. В. Замятин, А. Н. Ловчиков // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Вып. 5. Красноярск, 2004. С. 225–230.
6. Иванов, В. А. Теория оптимальных систем автоматического управления / В. А. Иванов, Н. В. Фалдин. М. : Наука, 1981. 331 с.
7. Куропаткин, П. В. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов / П. В. Куропаткин. М. : Высш. шк., 1980. 287 с.

D. V. Zamyatin, A. N. Lovchikov

THE TIME OPTIMAL SYSTEMS SYNTHESIS METHODIC

The analysis of existing development for creation of systems of the high order time optimal is executed. The simple technique of synthesis based on a method of phase trajectories is submitted. The offered technique includes all stages of creation of optimum system on time from the initial description as the differential equation or transfer function before formation of an adjusting link.

В. В. Шайдуров, Г. И. Щепановская

К ВОПРОСУ О СНИЖЕНИИ ПЛОТНОСТИ В НАБЕГАЮЩЕМ ПОТОКЕ ПЕРЕД ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Рассматриваются вопросы математического и численного моделирования уменьшения сопротивления летательных аппаратов при сверхзвуковом обтекании.

Расчет сопротивления движущихся тел в среде со сверхзвуковой скоростью является одной из основных проблем аэродинамики больших скоростей. В работах [1; 2] приведены результаты по полному сопротивлению звездообразных конфигураций в равномерном сверхзвуковом потоке с учетом всех его составляющих: волнового, вязкого и донного сопротивлений. Изучение тел с лучевой структурой показало большие возможности существенно пространственных форм в решении вопроса снижения волнового сопротивления. И наоборот, вязкая составляющая сопротивления таких тел по сравнению с эквивалентной по объему осесимметричной формой значительно больше. Вопрос об оптимальности звездообразных конфигураций по сравнению с осесимметричным эквивалентом решается с помощью многочисленных вычислительных экспериментов по параметрическому анализу [1].

В последние годы исследователями проявляется значительный интерес к изучению влияния неравномерностей распределения газодинамических параметров в потоке на сопротивление тел при их движении со сверх- и гиперзвуковыми скоростями. Этот интерес связан с тем, что иногда с помощью относительно небольших затрат энергии или вещества можно изменить структуру течения. Особое внимание уделяется решению задачи активного управления обтеканием тела посредством энергетического и силового воздействия на набегающий поток, в частности посредством локального воздействия на сверхзвуковые течения перед телом. Для технической реализации предлагается использование лазерного и СВЧ-излучения, электрического разряда. Уменьшение аэродинамического сопротивления связывается с уменьшением плотности газа в набегающем потоке, что подтверждено расчетами и непосредственными измерениями [3; 4]. Экспериментально найдено, что при использовании мощного импульсного оптического разряда перед телом (конусом, сферой), обтекаемым сверхзвуковым потоком, его аэродинамическое сопротивление уменьшается при увеличении частоты следования импульсов лазерного излучения. В работах [3; 4] нестационарные явления, возникающие в объеме газа при мгновенном локальном подводе энергии, рассматриваются как правило, на основе решения уравнений Эйлера. Для численного расчета двумерных нестационарных течений развивается метод Годунова на основе TVD- и ENO-схем. Показано значительное влияние воздействий, связанных с нелинейной природой явлений. Отмечается, что невязкий механизм перестройки сверхзвукового течения отличает бесконечная длина разреженного канала [4].

В данной статье предлагается математическое и численное моделирование нестационарного распространения

импульса энергии большой мощности в вязком теплопроводном газе. В этом случае рассматривается полная система уравнений Навье–Стокса для вязкого теплопроводного сжимаемого газа. Также изучается характер эволюции тепловых пятен в набегающем потоке: уменьшение плотности в тепловом пятне приводит к падению давления в рассматриваемой области и, как следствие, уменьшению волнового сопротивления летательного аппарата, что в свою очередь снижает сопротивление тела в целом.

Постановка задачи. Рассмотрим математическую модель нестационарного распространения локального импульса энергии большой мощности в вязком теплопроводном газе [5; 6]. Для этого выпишем полную систему уравнений вязкого теплопроводного газа в декартовой системе координат для двумерного случая в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u \frac{\partial e}{\partial x} + \rho v \frac{\partial e}{\partial y} +$$

$$+ p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + \Phi, \quad (4)$$

$$p = (\gamma - 1) \rho e, \quad \mu = c_3 e^\omega, \quad 0.5 \leq \omega \leq 1. \quad (5)$$

Здесь искомыми величинами являются плотность $\rho(t, x, y)$, компоненты вектора скорости $u(t, x, y)$, $v(t, x, y)$, внутренняя энергия единицы массы $e(t, x, y)$, давление $p(t, x, y)$ и динамический коэффициент вязкости μ . Диссипативная функция Φ определяется как положительная функция:

$$\Phi = \frac{\mu}{\text{Re}} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right].$$

Компоненты тензора напряжений определяются как

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

$$\tau_{xy} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right),$$

а компоненты вектора теплового потока как

$$q_x = -\frac{\gamma}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \mu \frac{\partial e}{\partial x}, \quad q_y = -\frac{\gamma}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \mu \frac{\partial e}{\partial y},$$

где $Q(t, x, y)$ – заданное распределение импульса энергии (мощность источника); Re, Pr – числа Рейнольдса и Прандтля соответственно; γ – отношение удельных теплоемкостей.

Начальные и краевые условия. Начальные условия определяет покоящийся газ с соответствующей плотностью и температурой ($u = v = 0, p = 1, e = e_0$ при $t = 0$), давление и динамический коэффициент вязкости находятся согласно уравнениям (5). Мощность и положение источника в начальный момент времени соответствуют заданному режиму.

В рассматриваемом случае растекание локального импульса энергии большой мощности осуществляется в безграничное пространство, заполненное покоящимся вязким теплопроводным газом. Поэтому в качестве краевого условия необходимо выполнение условия затухания вектора скорости u в бесконечно удаленной точке, которое записывается следующим образом:

$$u \rightarrow 0 \text{ при } R \rightarrow \infty, R = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Аналогично все искомые газодинамические величины должны стремиться к состоянию в покоящемся газе в бесконечном удалении от источника.

Будем искать приближенное решение для u, v, p, ρ, e, μ на прямоугольнике $[0, t_{\text{fin}}] \times [0, 1] \times [0, 1]$. На границе Γ прямоугольника $\Omega = (0, 1) \times (0, 1)$ для всех $t \in [0, t_{\text{fin}}]$ задаются следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} n_x + \tau_{xy} n_y &= p n_x - p_{\text{ext}} n_x \text{ на } (0, t_{\text{fin}}) \times \Gamma, \\ \tau_{yy} n_y + \tau_{xy} n_x &= p n_y - p_{\text{ext}} n \text{ на } (0, t_{\text{fin}}) \times \Gamma, \end{aligned} \quad (6)$$

где $n(x, y) = (n_x(x, y), n_y(x, y))$ – вектор единичной внешней нормали к Γ в точке (x, y) , $p_{\text{ext}}(t, x, y)$ – заданное внешнее давление на границе расчетной области. Эти краевые условия являются неотражающими с вычислительной точки зрения, поскольку они пропускают импульс через границу Γ без влияния на течение внутри области. Выполнение условий (6) определяет задание условия Неймана на внутреннюю энергию на границе расчетной области:

$$\nabla e \cdot n = 0 \text{ на } \Gamma. \quad (7)$$

Кроме того, для корректной постановки задачи предполагается, что поток на Γ направлен вне области Ω и выполняется следующее условие:

$$u \cdot n \geq 0 \text{ на } [0, t_{\text{fin}}] \times \Gamma. \quad (8)$$

Представленные условия естественным образом вытекают из интегральных законов сохранения массы, импульса и энергии [7].

Аппроксимация дифференциальной задачи. Введем равномерную разностную сетку по времени с шагом $\tau = \tau_{\text{fin}} / m$:

$$\bar{\omega}_r = \{t_k : t_k = k\tau, k = 0, \dots, m\},$$

а в замыкании области Ω – равномерную разностную сетку с шагом $h = 1/n$:

$\bar{\Omega}_h = \{(x_i, y_j) : x_i = ih, i = 0, \dots, n; y_j = jh, j = 0, \dots, n\}$, и обозначим

$$\Omega_h = \bar{\Omega}_h \cap \Omega, \Gamma_h = \bar{\Omega}_h \cap \Gamma.$$

Далее проведем дискретизацию двумерной задачи (1)...(5) по пространству методом конечных элементов. При этом применен метод Бубнова–Галеркина для вариационной постановки в комбинации с методом линий. В качестве пробных функций рассмотрены кусочно-билинейные функции на прямоугольниках. Для вычисления интегралов использована формула метода трапеций и ее многомерные аналоги. Этот подход дает схемы второго порядка точности по пространству.

Линеаризация вариационно-разностных уравнений.

Полученные разностные уравнения в результате аппроксимации дифференциальной задачи являются нелинейными относительно искомых функций. Проведем следующую линеаризацию по времени. На $(k+1)$ шаге по времени зададим неизвестные функции-коэффициенты нелинейных членов их значениями с предыдущего шага. В результате уравнение (1) аппроксимируется следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tau} \rho_{k+1,i,j} - \rho_{k,i,j} + \\ & + \frac{1}{2h} (u_{k,i+1,j} \rho_{k+1,i+1,j} - u_{k,i-1,j} \rho_{k+1,i-1,j} + \\ & + v_{k,i,j+1} \rho_{k+1,i,j+1} - v_{k,i,j-1} \rho_{k+1,i,j-1}) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение (2) для составляющей u вектора скорости преобразуется к виду

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tau} \rho_{k+1,i,j} u_{k+1,i,j} - \frac{1}{\tau} \rho_{k+1,i,j}^{1/2} \rho_{k,i,j}^{1/2} u_{k,i,j} + \\ & + \frac{1}{4h} ((\rho_{k+1,i+1,j} u_{k,i+1,j} + \rho_{k+1,i,j} u_{k,i,j}) u_{k+1,i+1,j} - \\ & - (\rho_{k+1,i-1,j} u_{k,i-1,j} + \rho_{k+1,i,j} u_{k,i,j}) u_{k+1,i-1,j}) + \\ & + \frac{1}{4h} ((\rho_{k+1,i,j+1} v_{k,i,j+1} + \rho_{k+1,i,j} v_{k,i,j}) u_{k+1,i,j+1} - \\ & - (\rho_{k+1,i,j-1} v_{k,i,j-1} + \rho_{k+1,i,j} v_{k,i,j}) u_{k+1,i,j-1}) + \\ & + \frac{2}{3h^2} (u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i-1,j}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i-1,j}) + \\ & + \frac{2}{3h^2} (u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i+1,j}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i+1,j}) + \\ & + \frac{1}{6h^2} (\mu_{k,i+1,j} (v_{k+1,i+1,j+1} - v_{k+1,i+1,j-1}) - \\ & - \mu_{k,i-1,j} (v_{k+1,i-1,j+1} - v_{k+1,i-1,j-1})) + \\ & + \frac{1}{2h^2} (u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i,j-1}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i,j-1}) + \\ & + \frac{1}{2h^2} (u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i,j+1}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i,j+1}) - \\ & - \frac{1}{4h^2} (\mu_{k,i,j+1} (v_{k+1,i+1,j+1} - v_{k+1,i-1,j+1}) - \\ & - \mu_{k,i,j-1} (v_{k+1,i+1,j-1} - v_{k+1,i-1,j-1})) + \\ & + \frac{1}{2h} (p_{k,i+1,j} - p_{k,i-1,j}) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнение (3) количества движения для составляющей u вектора скорости будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\tau} \rho_{k+1,i,j} v_{k+1,i,j} - \frac{1}{\tau} \rho_{k+1,i,j}^{1/2} \rho_{k,i,j}^{1/2} v_{k,i,j} + \\
 & + \frac{1}{4h} ((\rho_{k+1,i+1,j} u_{k+1,i,j} + \rho_{k+1,i,j} u_{k,i,j}) v_{k+1,i+1,j} - \\
 & - (\rho_{k+1,i-1,j} u_{k+1,i,j} + \rho_{k+1,i,j} u_{k,i,j}) v_{k+1,i-1,j}) + \\
 & + \frac{1}{4h} ((\rho_{k+1,i,j+1} v_{k+1,i,j} + \rho_{k+1,i,j} v_{k,i,j}) v_{k+1,i,j+1} - \\
 & - (\rho_{k+1,i,j-1} v_{k+1,i,j} + \rho_{k+1,i,j} v_{k,i,j}) v_{k+1,i,j-1}) - \\
 & - \frac{1}{4h^2} (\mu_{k,i+1,j} (u_{k+1,i+1,j+1} - u_{k+1,i+1,j-1}) - \\
 & - \mu_{k,i-1,j} (u_{k+1,i-1,j+1} - u_{k+1,i-1,j-1})) + \\
 & + \frac{1}{2h^2} (v_{k+1,i,j} - v_{k+1,i-1,j}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i-1,j}) + \\
 & + \frac{1}{2h^2} (v_{k+1,i,j} - v_{k+1,i+1,j}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i+1,j}) + \\
 & + \frac{2}{3h^2} (v_{k+1,i,j} - v_{k+1,i,j-1}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i,j-1}) + \\
 & + \frac{2}{3h^2} (v_{k+1,i,j} - v_{k+1,i,j+1}) (\mu_{k,i,j} + \mu_{k,i,j+1}) + \\
 & + \frac{1}{6h^2} (\mu_{k,i,j+1} (u_{k+1,i+1,j+1} - u_{k+1,i-1,j+1}) - \\
 & - \mu_{k,i,j-1} (u_{k+1,i+1,j-1} - u_{k+1,i-1,j-1})) + \\
 & + \frac{1}{2h} (p_{k,i,j+1} - p_{k,i,j-1}) = 0.
 \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнение (4) для внутренней энергии в свою очередь преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\tau} \rho_{k+1,i,j} e_{k+1,i,j} - \frac{1}{\tau} \rho_{k,i,j} e_{k,i,j} + \\
 & + \frac{1}{2h} (e_{k+1,i+1,j} \rho_{k+1,i+1,j} u_{k+1,i,j} - e_{k+1,i-1,j} \rho_{k+1,i-1,j} u_{k+1,i,j}) + \\
 & + \frac{1}{2h} (e_{k+1,i,j+1} \rho_{k+1,i,j+1} v_{k+1,i,j} - e_{k+1,i,j-1} \rho_{k+1,i,j-1} v_{k+1,i,j}) + \\
 & + \frac{1}{2h} p_{k,i,j} (u_{k+1,i+1,j} - u_{k+1,i-1,j} + v_{k+1,i,j+1} - v_{k+1,i,j-1}) + \\
 & + \frac{1}{2h^2} (e_{k+1,i,j} - e_{k+1,i-1,j}) (\tilde{\mu}_{k,i,j} + \tilde{\mu}_{k,i-1,j}) + \\
 & + \frac{1}{2h^2} (e_{k+1,i,j} - e_{k+1,i+1,j}) (\tilde{\mu}_{k,i,j} + \tilde{\mu}_{k,i+1,j}) + \\
 & + \frac{1}{2h^2} (e_{k+1,i,j} - e_{k+1,i,j-1}) (\tilde{\mu}_{k,i,j} + \tilde{\mu}_{k,i,j-1}) + \\
 & + \frac{1}{2h^2} (e_{k+1,i,j} - e_{k+1,i,j+1}) (\tilde{\mu}_{k,i,j} + \tilde{\mu}_{k,i,j+1}) = \\
 & = Q_{i,j}^t + \frac{1}{3h^2} \mu_{k,i,j} (u_{k+1,i+1,j} - u_{k+1,i,j})^2 + \\
 & + \frac{1}{3h^2} \mu_{k,i,j} (u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i-1,j})^2 + \\
 & + \frac{1}{3h^2} \mu_{k,i,j} (v_{k+1,i,j+1} - v_{k+1,i,j})^2 + \\
 & + \frac{1}{3h^2} \mu_{k,i,j} (v_{k+1,i,j} - v_{k+1,i,j-1})^2 + \\
 & + \frac{1}{4h^2} \mu_{k,i,j} ((v_{k+1,i+1,j} - v_{k+1,i,j} + u_{k+1,i,j+1} - u_{k+1,i,j})^2 +
 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 & + (v_{k+1,i,j} - v_{k+1,i-1,j} + u_{k+1,i,j+1} - u_{k+1,i,j})^2 + \\
 & + (v_{k+1,i+1,j} - v_{k+1,i,j} + u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i,j-1})^2 + \\
 & + (v_{k+1,i,j} - v_{k+1,i-1,j} + u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i,j-1})^2) + \\
 & + \frac{1}{6h^2} \mu_{k,i,j} ((u_{k+1,i+1,j} - u_{k+1,i,j} - v_{k+1,i,j+1} + v_{k+1,i,j})^2 + \\
 & + (u_{k+1,i+1,j} - u_{k+1,i,j} - v_{k+1,i,j} + v_{k+1,i,j-1})^2 + \\
 & + (u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i-1,j} - v_{k+1,i,j} + v_{k+1,i,j-1})^2 + \\
 & + (u_{k+1,i,j} - u_{k+1,i-1,j} - v_{k+1,i,j+1} + v_{k+1,i,j})^2).
 \end{aligned}$$

Линеаризация проведена таким образом, что выполняется закон сохранения массы и энергии на сеточном уровне для всей системы в целом, т. е. разностные уравнения и после линеаризации согласованы в смысле законов сохранения. Нетрудно заметить, что уравнения (9)...(12) распадаются согласно физическим законам сохранения. Так, система уравнений (2) на $(k+1)$ шаге по времени разрешается относительно искомых $\rho_{k+1,i,j}$, поскольку коэффициенты $u_{k,i,j}$ и $v_{k,i,j}$ известны с предыдущего шага. Аналогично система алгебраических уравнений (10), (11) на $(k+1)$ шаге по времени разрешается относительно искомых величин $u_{k+1,i,j}$, $v_{k+1,i,j}$, поскольку $\rho_{k+1,i,j}$, $p_{k,i,j}$, $u_{k,i,j}$, $v_{k,i,j}$ являются известными функциями. В системе алгебраических уравнений (12) известными являются $\rho_{k+1,i,j}$, $u_{k+1,i,j}$, $v_{k+1,i,j}$, $p_{k,i,j}$, а также $u_{k,i,j}$, $v_{k,i,j}$, динамический коэффициент вязкости $\mu_{k,i,j}$, который во всех уравнениях берется с предыдущего шага по времени. Таким образом, возможно раздельное рассмотрение системы уравнений (9)...(12) на каждом шаге по времени, что существенно сокращает порядок системы алгебраических уравнений в каждом отдельно взятом случае.

Сеточный аналог закона сохранения массы. Система линейных алгебраических уравнений (9) на $(k+1)$ шаге по времени может быть записана в следующем виде (опустим индекс k):

$$\begin{aligned}
 & \alpha_{\rho}^{i,j} \rho_{i,j} + \alpha_{\rho}^{i+1,j} \rho_{i+1,j} + \alpha_{\rho}^{i-1,j} \rho_{i-1,j} + \\
 & + \alpha_{\rho}^{i,j+1} \rho_{i,j+1} + \alpha_{\rho}^{i,j-1} \rho_{i,j-1} = F_{\rho}^{i,j}, \\
 & \forall i = 1, \dots, n-1, \forall j = 1, \dots, n-1.
 \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $\rho_{i,j}$ – искомые значения плотности в узлах сетки, α – коэффициенты при неизвестных.

Запишем уравнение (13) в матричном виде:

$$A^h \rho^h = F_{\rho}^h, \quad (14)$$

где A^h – сильно разреженная матрица, имеющая отличные от нуля элементы на пяти диагоналях, включая главную диагональ.

Сеточный аналог закона сохранения импульса. Система линейных алгебраических уравнений (10), (11) может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \alpha_u^{i,j} u_{i,j} + \alpha_u^{i+1,j} u_{i+1,j} + \alpha_u^{i-1,j} u_{i-1,j} + \\
 & + \alpha_u^{i,j+1} u_{i,j+1} + \alpha_u^{i,j-1} u_{i,j-1} + \\
 & + \beta_u^{i+1,j+1} v_{i+1,j+1} + \beta_u^{i+1,j-1} v_{i+1,j-1} + \\
 & + \beta_u^{i-1,j+1} v_{i-1,j+1} + \beta_u^{i-1,j-1} v_{i-1,j-1} = F_u^{i,j},
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \alpha_v^{i,j} v_{i,j} + \alpha_v^{i+1,j} v_{i+1,j} + \alpha_v^{i-1,j} v_{i-1,j} + \\ & + \alpha_v^{i,j+1} v_{i,j+1} + \alpha_v^{i,j-1} v_{i,j-1} + \\ & + \beta_v^{i+1,j+1} u_{i+1,j+1} + \beta_v^{i+1,j-1} u_{i+1,j-1} + \\ & + \beta_v^{i-1,j+1} u_{i-1,j+1} + \beta_v^{i-1,j-1} u_{i-1,j-1} = F_v^{i,j}, \\ & \forall i = 1, \dots, n-1, \forall j = 1, \dots, n-1, \end{aligned} \quad (16)$$

где $u_{i,j}$ и $v_{i,j}$ – искомые компоненты скорости в узлах сетки; α и β – коэффициенты при неизвестных.

Особенностью уравнений (15), (16) является то, что их решение необходимо искать одновременно для обеих компонент скорости u и v . В данном случае матричный вид системы (15), (16) будет следующий:

$$A_u^h u^h + B_u^h v^h = F_u^h, \quad B_v^h u^h + A_v^h v^h = F_v^h, \quad (17)$$

где A_u^h, A_v^h – пятидиагональные матрицы; B_u^h, B_v^h – четырехдиагональные матрицы. Здесь вдоль главной диагонали матрицы располагаются коэффициенты α_u и α_v , а вдоль главной диагонали верхнего правого и нижнего левого квадрантов – коэффициенты β_u и β_v .

Сеточный аналог закона сохранения энергии. Система линейных алгебраических уравнений (12) может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \alpha_e^{i,j} e_{i,j} + \alpha_e^{i+1,j} e_{i+1,j} + \alpha_e^{i-1,j} e_{i-1,j} + \\ & + \alpha_e^{i,j+1} e_{i,j+1} + \alpha_e^{i,j-1} e_{i,j-1} = F_e^{i,j}, \\ & \forall i = 1, \dots, n-1, \forall j = 1, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (18)$$

Во всех случаях уравнения для граничных точек и узлов, т. е. для таких точек, у которых $i = 0, i = n, j = 0$ и $j = n$, также входят в систему, но коэффициенты при неизвестных, чьи индексы выходят за границу интервала $[0, n]$, обнуляются.

Система линейных алгебраических уравнений (18) может быть записана также в виде

$$A_e^h e^h = F_e^h, \quad (19)$$

где A_e^h – также матрица, имеющая отличные от нуля элементы на пяти диагоналях, включая главную диагональ.

Для решения сеточных задач (14), (17), (19) на каждом временном шаге воспользуемся итерационным методом типа Якоби:

$$x_{m+1} = x_m - D^{-1}(A^h x_m - F^h),$$

где $A^h x = F^h$ – исходная система уравнений; D^{-1} – итерационный множитель, совпадающий с соответствующим элементом главной диагонали матрицы.

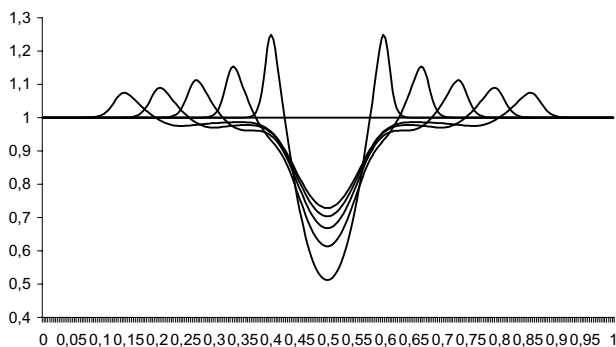


Рис. 1. Распределение плотности как функции пространственной переменной для моментов времени $t = 0; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0$

Среднее количество итераций, необходимое для получения решения при $n=300$, составляет в зависимости от начальных данных от 15 до 100.

Вычислительный эксперимент. Приведем расчеты газодинамических величин для характерных чисел Маха $M=4$ и Рейнольдса $Re = 10^5$ [8] (рис. 1, 2).

Таким образом, отметим, что в данной работе для уравнений вязкого теплопроводного газа впервые получены граничные условия (6) и многосеточный метод, позволяющие существенно уменьшить время счета при достижении четвертого порядка точности для приближенного решения. Кроме того, полученный программный продукт используется для решения важной задачи построения воздушного разреженного коридора в набегающем потоке перед летательным аппаратом путем использования периодических источников энергии большой мощности.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Университеты России» (проект № УР.03.01.101).

Библиографический список

1. Щепановский, В. А. Газодинамическое конструирование в проблеме сопротивления / В. А. Щепановский, Г. И. Щепановская // Газодинамическое конструирование в проблеме сопротивления. Новосибирск : Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 216 с.
2. Щепановский, В. А. Вычислительное моделирование воздушно-космических систем / В. А. Щепановский, Г. И. Щепановская // Модели, методы, технологии. Т. 1. Новосибирск : Сиб. изд. фирма «Наука» РАН, 2000. 232 с.
3. Коротаева, Т. А. Пространственное сверхзвуковое обтекание заостренного тела при подводе энергии перед ним / Т. А. Коротаева, В. М. Фомин, А. П. Шашкин // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 5. С. 116–121.
4. Зудов, В. Н. Сверхзвуковое обтекание импульсного источника энергии большой мощности / В. Н. Зудов ; ИТПМ. Новосибирск, 2000. 5 с.
5. Шайдуров, В. В. Математическое моделирование нестационарного распространения импульса энергии большой мощности в вязком теплопроводном газе / В. В. Шайдуров, Г. И. Щепановская // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6. Ч. 2. Спец. вып. С. 693–698.
6. Shaidurov, V. V. Solution to viscous heat-conductive gas equations based on multiprocessor computer system /

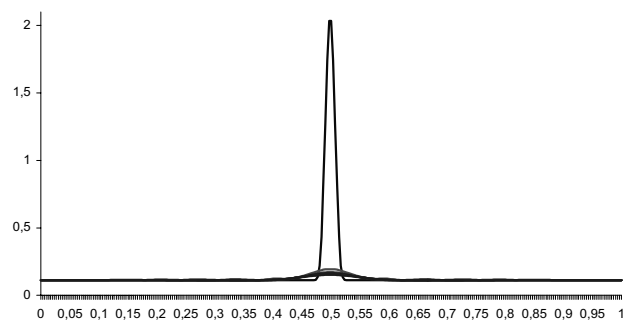


Рис. 2. Распределение внутренней энергии как функции пространственной переменной для моментов времени $t = 0; 0.4; 0.8; 1.2; 1.6; 2.0$

V. V. Shaidurov, G. I. Shchepanovskaya // Proceedings of the International Conference on Computational Mathematics. Novosibirsk : ICM & MG Publisher, 2002. Pt. 1. P. 83–87.

7. Шайдуров, В. В. Математическое и численное моделирование нестационарного распространения импульса энергии большой мощности в вязком теплопроводном газе. Ч. 1. Математическая постановка задачи / В. В. Шайдуров, Г. И. Щепановская ; Ин-т вычисл. моде-

лирования Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. Красноярск, 2003. 50 с. Деп. в ВИНТИ 24.10.03, № 1860-B2003.

8. Малышев, А. В. Повышение точности приближенного решения при расчете плотности в тепловом пятне / А. В. Малышев, В. В. Шайдуров, Г. И. Щепановская // Вычисл. технологии. 2003. Т. 8. Регион. вестн. Востока. 2003. № 3. (Совмест. вып. Ч. 2). С. 178–190.

V. V. Shaidurov, G. I. Shchepanovskaya

THE PROBLEM OF DENSITY DECREASE FOR FILLING FLOW IN FRONT OF AIRCRAFT

Mathematical and numerical modeling of impedance decrease of aircrafts in supersonic flow is realized.

МАКРОСЕТЬ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННЫХ И ИНТЕРПРЕТИРОВАННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРАВИЛ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОНОМНОМ УПРАВЛЕНИИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Предлагается способ представления правил принятия решений бортовыми средствами автономного управления космическими аппаратами связи, ретрансляции и навигации. Модель автономного управления представлена в виде макросети, формируемой из специализированных схем переходов и интерпретаций позиций сетей Петри (Petri nets). Макросеть позволяет решать причинно-следственные связи процессов автономного управления в пространстве условий состояний бортовых систем и целей управления.

Автономность современных космических аппаратов связи и навигации является важнейшим свойством, обеспечивающим высокую вероятность функционирования космических аппаратов (КА) в течение длительного срока активного существования при ограниченных затратах на привлечение наземного комплекса управления. Осуществляющие автономное управление бортовые средства принятия решений используют модель управления, которая должна обеспечивать процесс управления совокупностью большого количества функциональных элементов, характеризующихся многочисленными причинно-следственными связями между множеством параллельно протекающих асинхронных, но взаимосвязанных процессов. Для реализации этой модели целесообразно применение сетей Петри, которые являются мощным средством моделирования дискретных систем [1] и используются в самых различных областях техники [2...4; 6; 8], в том числе и при моделировании процессов управления и контроля космических аппаратов [5; 7].

В соответствии с [1; 3], сеть Петри задается совокупностью множеств $N = (P, T, \alpha, \beta, \bar{M}_0)$, где P – множество позиций, $P \neq \emptyset$, $|P| = m$; T – множество переходов, $T \neq \emptyset$, $|T| = n$, $P \cap T = \emptyset$; α – функция входных инцидентов; β – функция выходных инцидентов; $\bar{M}_0$ – вектор начального маркирования.

Функции входных и выходных инцидентов задают отношения между позициями и переходами сети. При этом используются следующие обозначения:

- для $t \in T$ $t = \{P \in P / \alpha(P, t) \neq 0\}$ и $t = \{P \in P / \beta(P, t) \neq 0\}$;
- для $P \in P$ $P = \{t \in T / \beta(P, t) \neq 0\}$ и $P = \{t \in T / \alpha(P, t) \neq 0\}$.

Множество $t(t)$ называется множеством входных (выходных) позиций перехода t , а множество $P(P)$ – множеством входных (выходных) переходов позиции P . Вектор $\bar{M}_0$ ставит в соответствие каждой позиции сети целое неотрицательное число.

Графически сеть Петри представляет собой ориентированный двудольный граф с двумя типами вершины: позиций и переходов. В содержательном плане позициям соответствуют некоторые условия, а переходам – события. Входные позиции перехода определяют набор условий, необходимых для того, чтобы событие могло произойти. В свою очередь, в результате события появляются новые условия, определяемые выходными позициями перехода. Таким образом, сеть Петри позволяет отсле-

живать причинно-следственные связи моделируемого процесса управления в пространстве условий и событий.

Для решения поставленных задач широкое применение нашла такая разновидность сетей Петри, как E -сети. E -сеть определяется в работе [3] как связанная конфигурация позиций посредством разрешаемых схемами переходов и задается совокупностью множеств $E = (L, P, R, A, \bar{M}_0)$, где L – конечное непустое множество позиций; P – множество периферийных позиций; R – множество решающих позиций; A – конечное непустое множество переходов $\{a_i\}$, $a_i = \{S, t(a_i), q\}$, здесь S – схема перехода, $t(a_i)$ – время перехода, q – процедура перехода; $\bar{M}_0$ – начальное маркирование.

Еще большими возможностями обладают макро- E -сети, построенные на более сложных элементах с формальным определением в терминах E -сетей.

Но анализ известных интерпретаций сетей Петри показал, что они не обеспечивают универсальности и наглядности описания элементов, образующих модель управления. Поэтому для представления процессов управления космическими аппаратами ретрансляции и связи необходимо расширить и интерпретировать понятия сетей Петри, т. е. ввести специализированные схемы переходов и интерпретации позиций, определив таким образом конкретное понятие макросети описания модели автономного управления.

При определении понятия макросети необходимо, чтобы представленная ею модель управления обеспечивала однозначное описание параллельных процессов управления. Процесс управления состоит в пошаговом движении изображающей точки, характеризующей состояние объекта управления, в заданную область. При этом состояние объекта в каждый момент времени характеризуется точкой в фазовом пространстве x_n , а положение управляющих функций – точкой $U = (U_1, \dots, U_r)$ в пространстве управлений U размерности r . Технические ограничения приводят к выделению в пространстве управлений U области допустимых управлений U_d .

В фазовом пространстве координат x_n для каждой точки x_i можно выделить систему $B_i(E)$ областей E , из которых возможен переход в точку x_i при $U \in U_d$. Для реальных объектов необходимо говорить не о конечной точке x_i , а о конечной области Q_i . Задача управления состоит в том, чтобы в заданный момент времени t сформировать такое $U \in U_d$, которое обеспечит переход изображающей точки в конечную область Q_i при условии, что начальное положение $x_0 \in B_i(E)$.

Количество областей Q существенно меньше количества областей E , поэтому для каждого задаваемого состояния целесообразно определить все возможные переходы из $E \in B_i(E)$.

Заданное состояние определяет номер первого шага N_i . Из-за взаимнооднозначного соответствия Q_i и N_i задание Q_i может быть сведено к заданию N_i . Шаг включает определение принадлежности текущего состояния объекта управления $x(t)$ области $E_k \in B_i(E)$. Управляющее воздействие на объект управления формируется как функция от E_k и определяет следующий шаг, также соответствующий E_k .

Физические характеристики объекта управления приводят к необходимости временных задержек между шагами. Величина задержки также является функцией от E . Определение принадлежности $x(t)$ области E в соответствии с теоремой об изоморфности булевой алгебры множеств булевой алгебре функций можно представить в виде вычислений логической формулы, элементами которой являются одноместные двужначные предикаты нахождения параметров в определенных состояниях и операции дизъюнкции, конъюнкции и отрицания, создающие функционально полную систему.

Кроме параметров, характеризующих состояние объекта управления, необходимо учитывать состояние взаимовлияющих процессов управления, для чего необходимы специальные внутренние параметры, состояние которых изменяется по мере выполнения соответствующих процессов управления.

Контроль протекания процессов управления внешним контуром управления проводится по выходным параметрам, формирование которых также осуществляется при реализации процессов управления.

С учетом вышеизложенного автором введена следующая интерпретация позиций:

$$P = P_{и.п} \cup P_{у.п} \cup P_{у.в} \cup P_{в.п},$$

где $P_{и.п}$ – множество позиций типа «инициализация процесса»; $P_{у.п}$ – множество позиций типа «управление переходом», соответствующих решающей позиции E -сетей; $P_{у.в}$ – множество позиций типа «управляющее воздействие», обозначающих связи процесса с исполнительными органами; $P_{в.п}$ – множество позиций типа «выходной параметр», обозначающих информационную связь с внешним контуром управления.

Также были определены переходы T следующих типов: $T_{в.п}$ – временной переход; $T_{о.п}$ – организация процесса; $T_{п.р}$ – предикатный переход; $T_{у.п}$ – управляемый переход:

$$T = T_{в.п} \cup T_{о.п} \cup T_{п.р} \cup T_{у.п}.$$

Множество временных переходов $T_{в.п}$ (рис. 1) предназначено для обеспечения описания временных задержек, отображающих характеристики реальных процессов управления: $T_i \in T$. Для $t_i \in T_{в.п}$ $|t| = 1$, $|t| \geq 1$, $\alpha(t, t_i) = 1$, $\beta(t_i, t) = 1$ $|t| \in P_{и.п}$, $|t| \in P_{у.в} \cup P_{у.п} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}$. Срабатывание перехода безусловное, через интервал времени τ от момента возбуждения:

$$\forall P \in P \{M(P) - \alpha(\beta, t_i) \wedge (\tau_R = \tau_i)\},$$

где τ_R – время, прошедшее с момента возбуждения перехода.

Множество переходов «организация процессов» $T_{о.п}$ предназначено для обеспечения возможности распараллеливания процессов. Для $T_i \in T_{о.п}$ $|t| = 1$, $|t| \geq 1$, $\alpha(t, t_i) = 1$, $\beta(t_i, t) = 1$ $|t| \in P_{и.п}$, $|t| \in P_{и.п}$. Срабатывание безусловное: $\forall P \in P \{M(P) - \alpha(P, t_i) \geq 0\}$. Время от момента возбуждения перехода до срабатывания $\tau_{о.п}$.

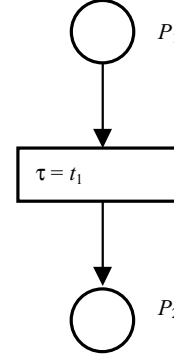


Рис. 1. Переход $T_{в.п}$

Эквивалентом перехода типа «организация процессов» $T_{о.п}$ является фрагмент базовой сети Петри с двумя переходами t_1 и t_2 , где t_1 – временной переход с $\tau = \tau_{о.п}$; t_2 – переход с мгновенным срабатыванием (рис. 2).

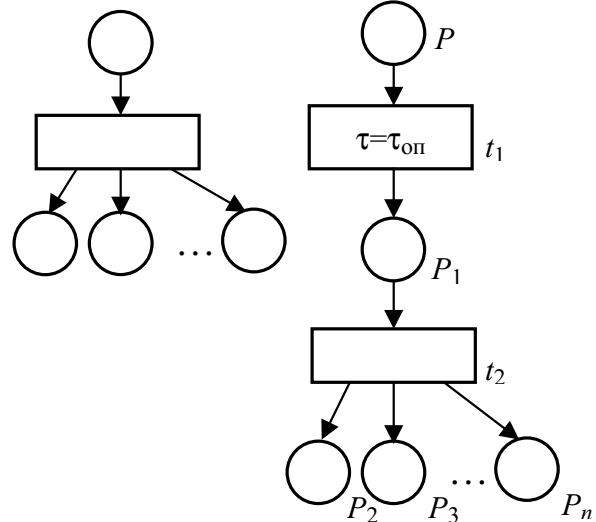


Рис. 2. Переход $T_{о.п}$ и эквивалентный ему фрагмент сети Петри

Входные и выходные функции инцидентий для перехода $T_{о.п}$ следующие:

$$\begin{aligned} \alpha(t_1, t_1) &= 1, \\ \beta(t_1, P_1) &= 1, \\ \alpha(P_1, t_2) &= 1, \\ \beta(t_2, P_2) &= 1, \\ \beta(t_2, P_3) &= 1, \\ &\dots \\ \beta(t_2, P_n) &= 1. \end{aligned}$$

$$\tau_{о.п} = \tau(\bar{M} = \{1, 0, 0, \dots, 0\} \rightarrow \bar{M} = \{0, 0, 1, \dots, 1\}).$$

Множество переходов типа «предикатный переход» – $T_{п.р}$ предназначено для обеспечения принятия решений на выдачу управляющего воздействия и инициализацию сле-

дующего шага. Для $T_i \in T_{\text{пр}} \mid |t| = 1, |t'| \geq 1, \alpha(t_i, t_i) = 1, \beta(t_i, t') = 1, |t| \in P_{\text{и.п}}, |t'| \in P_{\text{и.п}} \cup P_{\text{у.в}} \cup P_{\text{у.п}} \cup P_{\text{в.п}}$.

Переходу t_i соответствует предикат $P_r(t_i)$.

Нормальное срабатывание перехода происходит при $P_r(t_i) = \text{true}$ с интервалом времени от момента возбуждения до момента срабатывания $t_{\text{ср}}$. $P_r(t)$ в общем случае является составным предикатом: $P_r(t) = \bigwedge_{i=1}^m (\bigwedge_{j=1}^{n_i} P_{r_j})$, где P_{r_j} – элементарный предикат, представляющий собой высказывание о нахождении отдельного параметра КА в конкретном состоянии.

При $P_r(t_i) = \text{false}$ происходит срабатывание перехода типа «сброс» через интервал времени $\tau_{\text{сбр}}$, при этом маркеры во входные позиции не переходят.

Эквивалентом перехода предикатного типа является фрагмент базовой сети Петри с тремя переходами t_1, t_2, t_3 , где t_1 – временной переход с $\tau = \tau_{\text{ср}}$; t_2 – предикатный переход с мгновенным срабатыванием; t_3 – временной переход с $\tau = \tau_{\text{сбр}}$ (рис. 3).

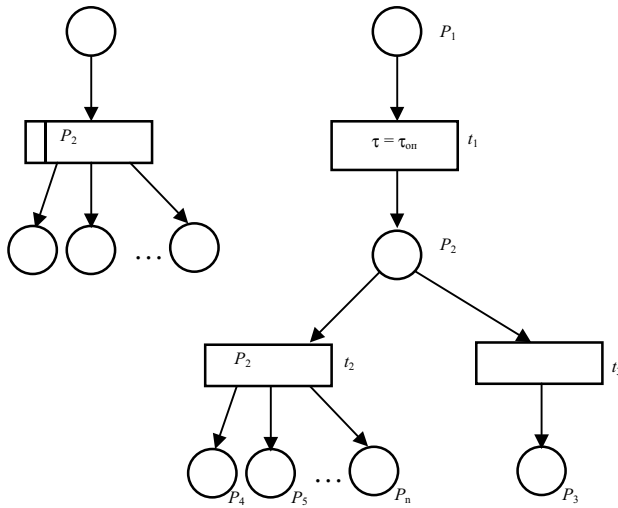


Рис. 3. Предикатный переход $T_{\text{пр}}$ и эквивалентный ему фрагмент сети Петри

Входные и выходные функции инцидентий перехода $T_{\text{пр}}$ следующие:

$$\begin{aligned} \alpha(P_1, t_1) &= 1, \\ \beta(t_1, P_2) &= 1, \\ \alpha(P_2, t_2) &= 1, \\ \alpha(P_2, t_3) &= 1, \\ \beta(t_3, P_3) &= 1, \\ \beta(t_2, P_4) &= 1, \\ \beta(t_2, P_5) &= 1, \\ &\dots \\ \beta(t_2, P_n) &= 1. \end{aligned}$$

$$\tau_{\text{ср}} = \tau(\bar{M} = \{1, 0, k, 0, \dots, 0\} \rightarrow \bar{M} = \{0, 0, k, 1, \dots, 1\}),$$

$$\tau_{\text{сбр}} = \tau(\bar{M} = \{1, 0, k, 0, \dots, 0\} \rightarrow \bar{M} = \{0, 0, k+1, 0, \dots, 0\}),$$

где $k \rightarrow \infty$.

Множество управляемых переходов $T_{\text{уп}}$ предназначено для обеспечения возможности моделирования взаимодействия асинхронных параллельных процессов. Управ-

ляемый переход имеет три входа a, b, c , где a – прямой вход; b – обратный вход, c – иницирующий вход. Управляемые переходы являются переходами предикатного типа, а состояние предиката определяется фактом поступления маркера на прямой или обратный входы определения предиката. Состояние сохраняется до прихода маркера на противоположный вход определения предиката. Возбужденным переходом является с момента появления маркера на иницирующем входе: $T_{\text{уп}} \in T$. Для $t_1 \in T_{\text{уп}}$, $|t| = 3, |t'| \geq 1, t_a \in P_{\text{у.п}}, t_b \in P_{\text{у.п}}, t_c \in P_{\text{и.п}}, t_a \cup t_b \cup t_c = t$, где t_a – прямой вход; t_b – обратный вход; t_c – иницирующий вход, $t \in P_{\text{у.в}} \cup P_{\text{у.п}} \cup P_{\text{в.п}}$.

Нормальное срабатывание перехода происходит при поступлении маркера на вход t_c и при $P_r(t_i) = \text{true}$, т. е. если последний маркер (для входов t_a и t_b) поступил на вход t_a . Срабатывание происходит через интервал времени $\tau_{\text{ср}}$.

При $P_r(t_i) = \text{false}$, т. е. если последний маркер поступил на вход t_b , происходит срабатывание перехода типа «сброс» через интервал времени $\tau_{\text{сбр}}$. При этом маркеры в выходные позиции не переходят.

Эквивалентом управляемого перехода является фрагмент базовой сети Петри, состоящий из 8 переходов, где t_1, t_2, t_5, t_6 и t_8 – переходы с мгновенным срабатыванием, t_3, t_4, t_7 – временные переходы с задержками срабатывания соответственно $\tau_{\text{обр}}, \tau_{\text{сбр}}, \tau'_{\text{сбр}}$, где $\tau_{\text{сбр}} = \tau'_{\text{сбр}} + \tau_{\text{обр}}$ (рис. 4).

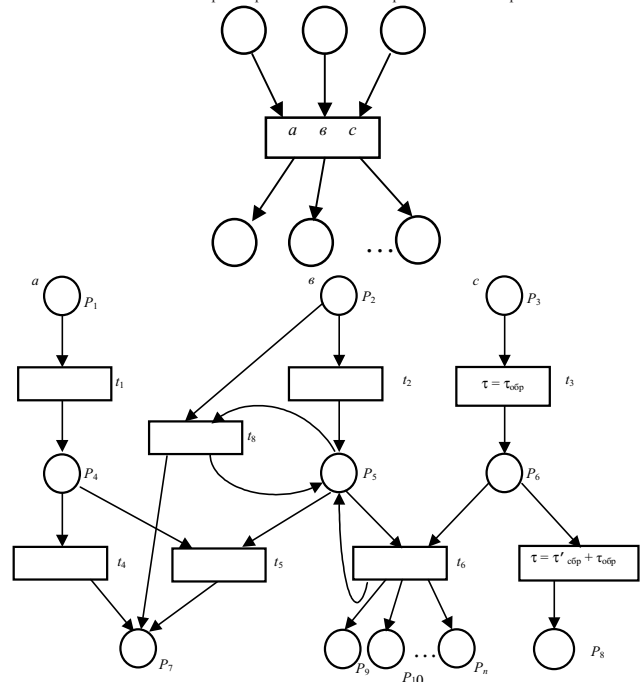


Рис. 4. Управляемый переход и эквивалентный ему фрагмент сети Петри

Входные и выходные функции инцидентий $T_{\text{уп}}$ следующие:

$$\begin{aligned} \alpha(P_1, t_1) &= 1, \\ \alpha(P_2, t_2) &= 1, \\ \alpha(P_3, t_3) &= 1, \\ \beta(t_1, P_4) &= 1, \\ \beta(t_2, P_5) &= 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \beta(t_3, P_6) &= 1, \\
 \alpha(P_4, t_4) &= 1, \\
 \alpha(P_4, t_5) &= 1, \\
 \alpha(P_5, t_5) &= 1, \\
 \alpha(P_5, t_6) &= 1, \\
 \alpha(P_6, t_6) &= 1, \\
 \alpha(P_6, t_7) &= 1, \\
 \beta(t_4, P_7) &= 1, \\
 \beta(t_5, P_7) &= 1, \\
 \beta(t_6, P_5) &= 1, \\
 \beta(t_7, P_8) &= 1, \\
 \beta(t_6, P_9) &= 1, \\
 \beta(t_6, P_{10}) &= 1, \\
 &\dots \\
 \beta(t_6, P_n) &= 1, \\
 \alpha(P_2, t_8) &= 1, \\
 \beta(t_8, P_7) &= 1, \\
 \beta(t_8, P_5) &= 1, \\
 \alpha(P_5, t_8) &= 1.
 \end{aligned}$$

Процесс изменения состояния при переходе «true–false» следующий:

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{0, 1, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\},
 \end{aligned}$$

а процесс изменения состояния при переходе «false–true» имеет вид

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{1, 0, 0, 0, 0, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 1, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_3 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k+1, m, 0, 0, \dots, 0\}.
 \end{aligned}$$

Процесс подтверждения состояния «true» можно представить в виде

$$\bar{M}_2 = \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k+1, m, 0, 0, \dots, 0\},$$

а процесс подтверждения состояния «false» – в виде

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{1, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 1, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_3 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k+1, m, 0, 0, \dots, 0\}, \tau(\bar{M}_0 \rightarrow \bar{M}_3) = \tau_{сбр}.
 \end{aligned}$$

Процесс срабатывания перехода при состоянии «true» описывается как

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{0, 0, 1, 0, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_2 &= \{0, 0, 0, 0, 1, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \tau(\bar{M}_1 \rightarrow \bar{M}_2) = \tau_{сбр}, \\
 \bar{M}_3 &= \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k, m, 1, 1, \dots, 1\},
 \end{aligned}$$

а процесс срабатывания перехода при состоянии «false» – как

$$\begin{aligned}
 \bar{M}_0 &= \{0, 0, 0, 0, 0, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\}, \\
 \bar{M}_1 &= \{0, 0, 1, 0, 1, 0, k, m, 0, 0, \dots, 0\},
 \end{aligned}$$

$$\bar{M}_2 = \{0, 0, 0, 0, 1, 1, k, m, 0, 0, \dots, 0\},$$

$$\bar{M}_3 = \{0, 0, 0, 0, 1, 0, k+1, m, 1, 1, \dots, 1\},$$

$$\tau(\bar{M}_1 \rightarrow \bar{M}_3) = \tau_{сбр} + \tau'_{сбр} = \tau_{сбр}.$$

Введенные интерпретации позиций и определения переходов позволяют представить модель управления космическими аппаратами ретрансляции и связи в виде макросети с ограниченным числом типов элементов. В общем случае модель определяется следующим выражением:

$$N = (P_{у.в}, P_{и.п}, P_{у.п}, P_{в.п}, T_{вр}, T_{о.п}, T_{пр}, T_{у.п},$$

$$\alpha_{вр}, \alpha_{о.п}, \alpha_{пр}, \alpha_{у.п}, \beta_{вр}, \beta_{о.п}, \beta_{пр}, \beta_{у.п}, \bar{M}_0),$$

$$\text{где } |P_{у.в}| \cup |P_{и.п}| \cup |P_{у.п}| \cup |P_{в.п}| \neq 0;$$

$$|T_{вр}| \cup |T_{о.п}| \cup |T_{пр}| \cup |T_{у.п}| \neq 0, |P_{и.п}| \neq 0;$$

$$|T_{пр}| \cup |T_{у.п}| \neq 0; |\alpha_{вр}| : P_{и.п} \times T_{вр},$$

$$\beta_{ср} : (P_{у.в} \cup P_{у.п} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}) \times T_{вр}; \alpha_{о.п} : P_{и.п} \times T_{о.п};$$

$$\beta_{о.п} : P_{и.п} \times T_{о.п}; \alpha_{пр} : P_{и.п} \times T_{пр};$$

$$\beta_{пр} : (P_{и.п} \cup P_{у.в} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}) \times T_{пр}; \alpha_{у.п} : P_{и.п} \times T_{у.п};$$

$$\beta_{у.п} : (P_{у.в} \cup P_{у.п} \cup P_{и.п} \cup P_{в.п}) \times T_{у.п}.$$

Анализ основных свойств расширенных сетей Петри затруднен [2] и возможен только в случае их сведения к обычным сетям Петри. Рациональным является сведение к наиболее изученным подклассам, из которых представляют интерес *FC*-сети (Free Choice) – сети свободного выбора. Каждая дуга, исходящая из позиции, является единственным выходом из нее либо единственным входом в переход. Иными словами, если переход имеет общую входную позицию с другим переходом, то эта входная позиция единственная:

$$\forall P \forall t(P, t) \Rightarrow [P = \{t\} \vee t = \{P\}].$$

Макросеть может быть представлена в виде совокупности эквивалентных фрагментов, объединенных операциями наложения. Эта операция – обычное теоретическое множественное объединение графов, дополненное правилом формирования разметки.

Если $N_1 = (P_1, T_1, \alpha_1, \beta_1, M_{0_1})$

и $N_2 = (P_2, T_2, \alpha_2, \beta_2, M_{0_2})$, то

$$N = (N_1, N_2) = (P_1 \cup P_2, T_1 \cup T_2, \alpha_1 \cup \alpha_2, \beta_1 \cup \beta_2, M_0),$$

где

$$M_0(P) = \begin{cases} M_{0_1}(P), & \text{если } P \in P_i, \text{ где } i=1, 2 \text{ и } P \in P_1 \cap P_2, \\ \min(M_{0_1}(P), M_{0_2}(P)), & \text{если } P \in P_1 \cap P_2. \end{cases}$$

Для переходов типа «временной переход», «организация процессов», «предикатный переход» эквивалентные фрагменты базовой сети Петри относятся к классу *FC*-сетей. Поэтому доказательство принадлежности макросетей к *FC*-сетям сводится к преобразованию перехода типа «управляемый переход» в *FC*-сеть. Фрагмент, эквивалентный элементу типа «управляемый переход», по конфигурации удовлетворяющий требованиям *FC*-сетей, приведен на рис. 5.

Относительно начального представления фрагмента добавились переходы $t'_1, t'_2, t'_3, t'_4, t'_5, t'_6$ и позиции $P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5, P'_6$. Все переходы являются переходами безусловного мгновенного срабатывания, а все позиции – иницирующими.

Таким образом, представленный выше метод представления посредством специально определенной макросети модели управления, лежащей в основе бортовой

системы принятия решений, обеспечивает возможность однозначного описания и анализа параллельных, асинхронных и взаимосвязанных процессов управления.

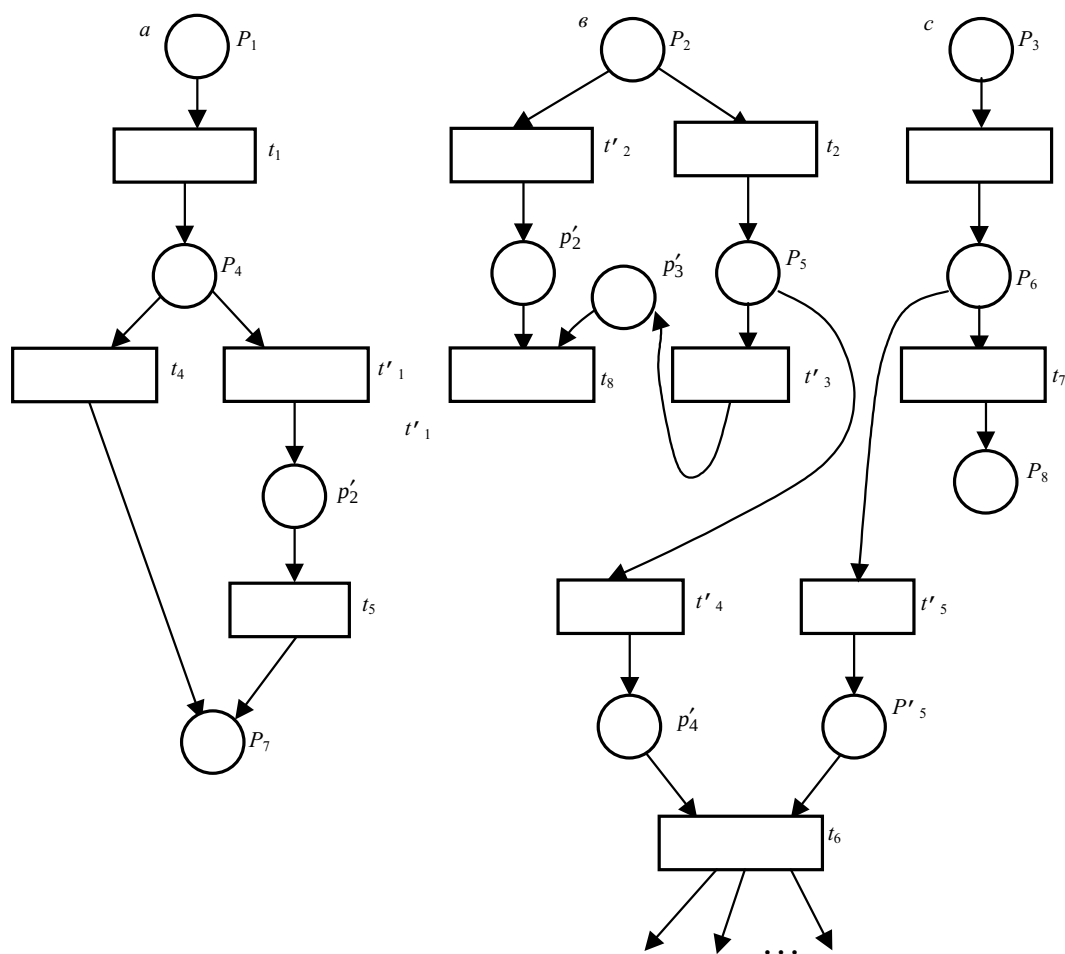


Рис. 5. Фрагмент FC-сети, эквивалентный управляемому переходу

Библиографический список

1. Никонов, В. В. Применение сетей Петри / В. В. Никонов, Ю. Е. Подчурский // Зарубежная радиоэлектроника. 1986. № 11.
2. Никонов, В. В. Сети Петри, теория, применение / В. В. Никонов, Ю. Е. Подчурский // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 4.
3. Бандман, О. Л. Методы параллельного микропрограммирования / О. Л. Бандман. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1981.
4. Котов, В. Е. Алгебра регулярных сетей Петри / В. Е. Котов ; ВЦ Сиб. отд-ния АН СССР. Новосибирск, 1978. № 98.
5. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко [и др.]. М. : Сов. радио, 1973.
6. Дмитриев, А. К. Основы теории построения и контроля сложных систем / А. К. Дмитриев, П. А. Мальцев. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.
7. Leiden Stevan, H. Building of expert systems using Petri nets as a representation of knowledge flow / H. Leiden Stevan // 6 th Annu. Int. Phoenix Conf. Comput. and Commun., 25–27 febr. 1987, Washington. Washington, 1987. P. 561–565.
8. Юдицкий, С. А. Сети Петри – формальный аппарат моделирования динамики сложных систем / С. А. Юдицкий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2003. № 8.

V. V. Khartov

THE MACRONET ON THE BASES OF ENLARGED AND INTERPRETED PETRI NETS TO PROVIDE CANONS OF ARRIVAL AT A DECISION WHEN BACKUP CONTROL BY SPACECRAFTS

The method proposed serves the representation of the regulations of decision-making by on-board off-line control means of the spacecrafts of communication, retransmission, and navigation. The off-line control model is presented in the form of the macro-net which is made of the specific in operation specialized transition circuits and the versions of Petri nets positions. The macro-net allows solving the cause-and-effect relations of the off-line control processes in the area of conditions of the on-board systems states and the control purposes.

СЕАНСНО-ВРЕМЕННОЙ МЕТОД АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматриваются проблемы автономного управления космическими аппаратами ретрансляции, связи и навигации в части логического управления бортовыми системами, обеспечивающего выполнение программы работы космического аппарата в течение всего периода автономности. Вводится определение сеансно-временного метода автономного управления, позволяющего достигать заданную в программе цель с вероятностью, стремящейся к вероятности сохранения такой технической возможности. Представлен подход к реализации метода бортовыми системами принятия решений продукционного типа, определены требования к моделям автономного управления.

Определение сеансно-временного метода автономного управления. Космические системы связи и ретрансляции являются важнейшим элементом инфраструктуры любого современного государства, но особенно важное, стратегическое значение такие космические системы имеют для России. На ее огромной территории зачастую отсутствует какая-либо альтернатива космическим каналам связи, а состояние отечественных космических систем, их технический уровень в существенной степени определяют уровень информатизации, а следовательно, и безопасности нашей страны. Экономическая эффективность космических комплексов связи и ретрансляции в существенной степени определяется свойством космического аппарата выполнять свои задачи в космосе при минимальном привлечении наземных средств управления.

В общем случае достижение автономного функционирования космических аппаратов (КА) обеспечивается при автономном решении навигационных задач; решении задач автономного поддержания технического состояния бортовых систем; решении задач автономного управления, обеспечивающего целенаправленное функционирование космического аппарата. Автономное навигационное определение предполагает решение самостоятельного комплекса баллистических задач. Автономное поддержание систем изделия в работоспособном состоянии обеспечивается соответствующими методами автономного контроля и диагностики сложных технических систем. Третья составляющая автономности, которой и посвящена данная статья, – это автономное управление, понимаемое как логическое управление бортовыми системами, обеспечивающее выполнение программы работы космического аппарата в течение всего периода автономности [1].

Анализ показывает, что достижение эффективности автономного управления возможно при использовании метода, обеспечивающего отработку программы, элементами которой являются пары $\{t_k, Q_k\}$, где Q_k – область нахождения вектора выходных параметров в интервале времени от t_k до t_{k+1} , т. е. цель управления. Такой метод должен обладать свойствами адаптивности, позволяющими реализовать процедуру достижения цели с учетом текущего реального состояния изделия. Иными словами, при реализации такого метода на борту на каждом шаге управления определяется управляющее воздействие U_k :

$$U_k = F(x(t_{k-1}), Q_k, Z).$$

Тогда, при условии $U_k \in U_d$, где U_d – область допустимых управлений, вероятность автономной работы будет

стремиться теоретически к единице. На практике вероятность автономной работы определяется количеством функциональных элементов и степенью резервирования в бортовых системах, в связи с чем

$$P_{oy} = P_{zhy}(T_0, T^*),$$

где P_{zhy} – вероятность отсутствия возмущения, не устранимого на области допустимых управлений U_d . При параллельно-последовательной надежностной схеме средств обеспечения сеансов связи неустранимое возмущение P_{zhy} – это отказ всех комплектов одного и более функциональных элементов. Поэтому

$$P_{oy} = \prod_{j=1}^n P_j(T_0, T^*),$$

где P_j – вероятность безотказной работы (с учетом резервирования) j -го функционального элемента на интервале автономности T_0, T^* .

На основании вышеизложенного для космических аппаратов связи и ретрансляции автором определен сеансно-временной метод автономного управления (СВМ). *Сеансно-временной метод* – это метод адаптивного автономного управления, позволяющий по заданным в программе автономного управления параметрам сеансов целевой работы либо параметрам других типовых циклограмм управления определять и реализовывать управляющие воздействия, обеспечивающие выполнение программы независимо от текущего состояния изделия.

Эффективность использования метода зависит от конкретных особенностей построения бортовых систем космических аппаратов ретрансляции и связи. Так, функциональный элемент при наличии ненагруженного резерва и средств переключения на резерв является элементом с восстановлением. Восстановление функционального элемента происходит с вероятностью x .

При реализации переключателя на централизованных сбоеустойчивых средствах, определяющих работоспособность и живучесть изделия в целом, вероятность безотказной работы переключателя можно условно принять за единицу. В таком случае величина определяется следующим выражением:

$$\chi = P_{дост} \cdot P(\tau_{вост} \leq \tau_{доп}),$$

где $P_{дост}$ – вероятность достоверного определения текущего состояния; $\tau_{вост}$ – время восстановления текущего элемента; $\tau_{доп}$ – допустимое время задержки начала сеанса либо допустимое время перерыва.

Время восстановления текущего элемента находится по формуле

$$\tau_{\text{вост}} = \tau_{\text{об}} + \tau_{\text{ан}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{перех}},$$

где $\tau_{\text{об}}$ – время обнаружения отказа, определяемое периодом контроля; $\tau_{\text{ан}}$ – время, затрачиваемое на принятие решения о выдаче управляющего воздействия; $\tau_{\text{выд}}$ – время реализации управляющих воздействий; $\tau_{\text{перех}}$ – время приведения резервного элемента в рабочее состояние.

Достоверность определения текущего состояния определяется достоверностью информации о состоянии параметров бортовых систем. Повышение достоверности приводит к увеличению загрузки вычислительных средств, влияющей на время обнаружения отказа, время принятия решения и время реализации управляющих воздействий.

Таким образом, вероятность выполнения интервала автономности для СВМ стремится к вероятности сохранения работоспособного сочетания комплектов при наличии достаточно полной модели управления и обеспечении реализации этой модели с приемлемыми временными характеристиками и показателями достоверности.

Кроме того, независимость программы автономной работы от текущего состояния бортовых систем означает возможность закладки на борт КА программ работы с помощью различных независимых источников, не владеющих информацией о текущем состоянии космического аппарата ретрансляции и связи. Таким образом, создается предпосылка для построения систем ретрансляции с децентрализованным доступом абонентов, что резко повышает живучесть системы в целом, увеличивает оперативность доведения до борта заявок на проведение сеансов связи.

При оценке эффективности СВМ интервале времени подготовки к автономному функционированию необходимо учесть, что для СВМ величина интервала подготовки к автономности не включает получение и анализ информации о текущем состоянии объекта управления (ОУ) для ее учета при разработке плана. Величина интервала определяется следующим выражением:

$$\tau_{\text{па}} = \tau_{\text{прог}}^* l \sum_{i=1}^m |K'_{\text{пл}_i}|,$$

где $\tau_{\text{прог}}^*$ – темп закладки программы средствами ВКУ; m – число сеансов в программе; l – величина элемента программы; $K'_{\text{пл}_i}$ – подмножество элементов программы, определяющее цель управления, т. е. параметры i -го сеанса,

$$|K'_{\text{пл}_i}| = |K'_{\text{реж}_i}| + |K'_{\text{конф}_i}|,$$

здесь $K'_{\text{реж}_i}$ – подмножества элементов программы, определяющие параметры i -го сеанса.

Таким образом, величина периода подготовки к автономности для СВМ определяется только размером элемента программы и количеством элементов программы, необходимых для задания параметров единичного сеанса, и при использовании конкретных технических средств закладки является минимальной.

Принципы реализации сеансно-временного метода.

В основе реализации СВМ должна лежать бортовая система принятия решений. Современной тенденцией в этой области является использование экспертных систем (ЭС). В частности, осуществляется разработка таких ЭС, как SICON [2], ЭС для космической станции [3]. Отличитель-

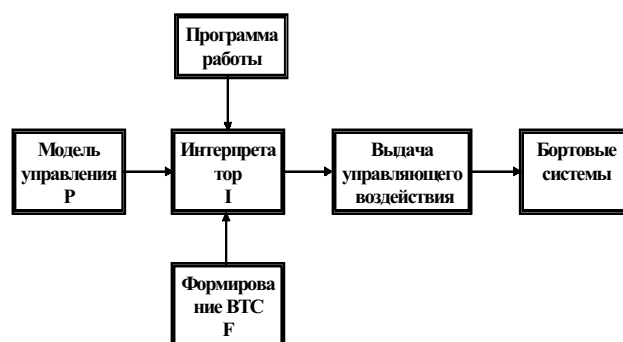
ной чертой этих проектов является то, что в качестве основы-оболочки ЭС принимаются коммерческие варианты средств построения ЭС: PICON фирмы «LISP Machine Inc.», XCON фирмы «Digital Equipment Corporation». Как правило, эти средства написаны на языке LISP и требуют для своей работы сопроцессоров, которые подключаются к БЦВМ. Другой особенностью, которая, по всей видимости, является следствием первой, является то, что в этих ЭС в качестве параметра управления отсутствует время, несмотря на то что основное внимание уделяется большей реактивности системы.

На основании анализа типичных форм представления знаний в ЭС, таких как логическая модель, модель, основанная на использовании правил (продукционная модель), модель, основанная на использовании фреймов, модель семантической сети и др., автором сделан вывод о том, что наилучшими характеристиками обладает предложенная модель, отличающаяся простотой создания и понимания отдельных правил, простотой пополнения и модификации, а также простотой механизма логического вывода.

Поэтому для принятия в рамках реализации метода бортовыми средствами решений на выдачу управляющих воздействий целесообразно использование продукционных систем [4]. При этом продукционная система PS определяется следующим образом:

$$PS = \langle F, P, I \rangle,$$

где F – рабочая память системы (база данных), которая включает значения параметров, характеризующих текущее состояние изделия и соответственно рабочие поля, определяющая состояние продукционной системы; P – база знаний, содержащая множество продукций (правил вида «условие–действие»), образующих модель управления; I – интерпретатор, реализующий процедуры вывода. Продукционная система связана с изделием через средства формирования информации о текущем состоянии изделия и средства выдачи управляющих воздействий на изделия. Интерпретатор выполняет множество правил, которые удовлетворяются на некотором наборе текущих данных и выполняет действия, предусмотренные этими правилами. Так как множество целей является конечным, то аналогично ряду систем [4] поиск решения целесообразно осуществлять в направлении от цели к данным (см. рисунок).



Функциональная схема средств реализации СВМ

Программа работы определяет текущую цель управления; интерпретатор модели управления на основании цели управления и текущего состояния ОУ планирует и

реализует процедуру достижения цели в соответствии со знаниями об объекте управления, представленными моделью управления. Для решения задачи такого рода, т. е. задачи планирования действий в заранее не полностью известной среде, необходимо разбиение задачи на шаги во времени. Таким образом, модель должна обеспечивать развертывание во времени диаграмм включения и выключения систем, элементов систем и их режимов в соответствии с заданной в программе автономной работы целью управления и текущим (для каждого шага) состоянием изделия.

В связи со спецификой применения бортовой ЭС особые требования предъявляются таким ее элементам, как база знаний, подсистема логического вывода и интерфейс со средой управления. Средства приобретения знаний и объяснения принятых решений в этой ЭС существуют в той степени, которая определяет потребность в их использовании в процессе функционирования космических систем связи и ретрансляции. Но определяющей проблемой, которую необходимо решить для системы, реализующей СВМ, является проблема представления знаний, т. е. представления модели автономного управления. Это объясняется тем, что форма представления знаний оказывает существенное влияние на характеристики и свойства системы, полноту реализации потенциальных возможностей СВМ.

Требования к модели автономного управления. Исходя из особенностей автономного управления спутниками-ретрансляторами, необходимо разработать требования к модели автономного управления, которые должны обеспечить максимальное использование потенциальных возможностей сеансно-временного метода. Часть этих требований к модели автоматически выполняются за счет применения продукционной системы. Это такие факторы, как однородность знаний и простота организации знаний, обусловленная использованием обратного вывода.

Применение модели автономного управления непосредственно на борту КА определяет жесткие требования к объему требуемых вычислительных ресурсов. Одним из методов достижения минимальных информационных затрат является введение в систему команд типовых алгоритмических процедур [6; 7]. При этом запись последовательности обычных машинных команд заменяется на одну новую конструкцию. Оценка сокращения объема программ может быть проведена с использованием метрик Холстеда [5]:

$$V = N \log(N) + M \log(M),$$

где N – количество адресуемых операндов; M – количество используемых типов операндов, при этом $N \gg M$.

Степень сокращения модели при ее представлении с использованием макрокоманд, а не непосредственного программирования, можно оценить по частотным характеристикам типовых процедур.

Обозначим через P_i сокращение длины записи одного элемента модели в модели объемом V_i при введении соответствующих бортовых структур: $P_i = V_i / V'_i$, а через a_i – количество записей данного элемента в модели. Тогда сокращение объема модели будет равно

$$dV = \sum_i a_i (V_i - V'_i) = \sum_i a_i (1 - 1/P_i).$$

Степень сокращения объема модели будет

$$W = V / V_1 = V / (V - dV) = 1 / (1 - a_i / V(1 - 1/P_i)).$$

Введя вес элемента в модели, получим выражение

$$W = 1 / (1 - f_i(1 - 1/P_i)).$$

Допустив упрощение, заключающееся в принятии средней записи элемента, равного P , а средний вес в программе $\sum f_i = F$, представим выражение (1) в виде

$$W = 1 / (1 - F(1 - 1/P)). \quad (1)$$

Отсюда следует, что минимальный объем памяти, занимаемой моделью автономного управления, будет при $F = 1$, т. е. при построении всей модели только с применением типовых элементов, и при максимальном значении P , т. е. при предельно компактных структурах обозначения типовых элементов.

Выполнение элементов возможно как при соответствующем расширении системы команд бортовой вычислительной машины, так и путем применения специальных программ-интерпретаторов. В первом случае отсутствуют дополнительные затраты памяти на построение интерпретатора и уменьшаются затраты машинного времени, но такой подход затруднителен при использовании универсальных вычислительных средств, решающих широкий круг задач. С другой стороны, при $N \gg M$ объем памяти, занимаемой интерпретатором, несуществен. Поэтому для работы с моделью автономного управления целесообразно построение бортового интерпретатора.

Специфика современных космических аппаратов ретрансляции и связи обуславливает необходимость представления в модели автономного управления параллельных процессов, имеющих многочисленные асинхронные участки, периодически взаимодействующие друг с другом. Это требует дополнения конструкций продукционных правил управляющими структурами, позволяющими отобразить взаимодействия и взаимоисключения, критические участки по обращению к общим ресурсам и данным.

Принятие решений по управлению должно обеспечиваться в реальном масштабе времени, для чего в конструкциях модели автономного управления должны быть предусмотрены элементы работы со временем.

Таким образом, изложенный в статье подход к определению метода автономного управления и требований к средствам его реализации обеспечил дальнейшую разработку бортовых программных комплексов автономного управления, доказавших свою эффективность при эксплуатации более 10 космических аппаратов из состава российской орбитальной группировки.

Библиографический список

1. США. Разработка средств искусственного интеллекта для управления КА // Ракетно-космическая техника. 2000. № 6–7. С. 8.
2. Leinweber, D. The PICON real-time expert system tool / D. Leinweber, D. Carleton // Proc. IEEE Nat. Aerosp. and Elektron. Conf., 19–23 May 1986, Dayton, Ohio. Vol. 4. New York, 1986. P. 1198–1210.
3. Boarnet, M. AI applications for the Space. Station / M. Boarnet, C. Culbert, R. T. Savely // Proc. IEEE Int. Conf.

Rob. and Autom., 31 March–3 Apr. 1987, Raleigh, N. C. Vol. 1. Washington, D. C., 1987. P. 131–136.

4. Элти, Дж. Экспертные системы: концепции и примеры / Дж. Элти, М. Кумбе. М. : Финансы и статистика, 1987.

5. Холстед, М. Х. Начала науки о программах / М. Х. Холстед. М. : Финансы и статистика, 1981.

6. Байцер, Б. Архитектура вычислительных комплексов / Б. Байцер. М. : Мир, 1974.

7. Берштейн, А. С. Исследования систем команд и их влияние на архитектуру современных ЭВМ / А. С. Берштейн, А. А. Пакштас, И. В. Шагаев // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 7, 8.

V. V. Khartov

THE TIME-SESSION OFF-LINE CONTROL METHOD

The off-line control problems of the spacecrafts of communication, retransmission, and navigation in terms of the on-board systems logic control that provides the spacecraft mission fulfillment for the whole period of autonomy are considered. The definitions of the time-session off-line control method that allows reaching the purpose given in the program with such a probability that aspires to the probability of this technical possibility retaining are introduced. The approach to realization of the method of decision-making by the on-board systems in the production type is presented and the requirements to the off-line control models are defined.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ СИНТЕЗА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматривается проблема синтеза систем электропитания космических аппаратов. Предлагается автоматизированная система научных исследований для синтеза систем электропитания космических аппаратов, с помощью которой проводятся исследования систем электропитания различных типов.

В настоящее время разработано множество структурных решений систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА), однако выделить из них лучшую структуру, которую можно было бы использовать во всех случаях, невозможно. Поэтому при проектировании СЭП требуется выбирать оптимальное сочетание ее структуры и значений внутренних параметров для каждой проектируемой СЭП индивидуально, что требует многократного решения задач структурной и параметрической оптимизации. При синтезе СЭП сначала следует отобрать те решения, которые обеспечивают требуемое качество выходного напряжения. Если таких решений окажется несколько, то можно ввести дополнительные ограничения, например по массе, объему, КПД, быстродействию, стоимости и т. д., стараясь удовлетворить их наибольшему количеству.

Для решения задачи синтеза необходимы математические модели структур СЭП, связывающие входные (значения параметров элементов) и выходные (например, значения показателей качества выходного напряжения, КПД, массу, объем, стоимость и т. д.) параметры.

Разработка и анализ математических моделей СЭП и решение с их помощью задач оптимизации – довольно трудоемкий процесс, который занимает много времени и сопряжен с громоздкими математическими вычислениями. Поэтому авторами было принято решение автоматизировать этот процесс. Для этой цели была разработана автоматизированная система научных исследований (АСНИ) для синтеза СЭП КА. Данная система позволяет разрабатывать и анализировать математические модели СЭП КА, связывающие значения внутренних параметров СЭП КА: мощность первичного источника $P_{ист}$, емкость выходного фильтра C_{ϕ} , количество секций стабилизатора напряжения N и емкость нагрузки C_n с показателями качества выходного напряжения: временем регулирования $T_{рег}$, величиной перерегулирования σ и амплитудой пульсаций δ .

Для построения математических моделей, определяющих связь между показателями качества напряжения и внутренними параметрами СЭП, необходим набор экспериментальных данных. Проведение экспериментов на реальном объекте требует существенных временных и экономических затрат, поэтому для получения экспериментальных данных можно использовать имитационные модели, созданные в какой-либо системе схемотехнического моделирования. В качестве входных данных в АСНИ используются файлы, генерируемые системой схемотехнического моделирования OrCAD 9.2, в которых содержится информация о значениях параметров элементов схемы и переходного процесса дискретизированного по времени.

К основным возможностям данной системы (рис. 1) можно отнести следующие:

- обработка файлов, генерируемых системой OrCAD 9.2, и получение набора экспериментальных данных;
- построение математических моделей, описывающих зависимость показателей качества выходного напряжения от значений параметров СЭП КА двух типов: в виде регрессионных уравнений и в виде нейронной сети;
- визуализация полученных моделей;
- поиск оптимальных параметров СЭП, обеспечивающих требуемое качество выходного напряжения.

Для получения и анализа математических моделей СЭП КА необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- 1) разработать имитационную модель СЭП КА в системе схемотехнического моделирования OrCAD 9.2;
- 2) с помощью системы OrCAD 9.2 получить набор переходных процессов в виде текстовых файлов;
- 3) с помощью программы-обработчика получить набор экспериментальных данных;
- 4) с помощью модуля построения регрессионной модели или модуля построения нейросетевых моделей построить математическую модель требуемого типа;
- 5) добавить полученные модели в файл-проект программы анализа моделей и поиска оптимальных параметров СЭП.



Рис. 1. Схема взаимодействия модулей программного комплекса автоматизированной системы научных исследований

Возможность построения математических моделей двух типов: регрессивных и нейросетевых включена в АСНИ не случайно. Регрессионные модели позволяют получить достаточно высокую точность аппроксимации при относительно небольшом количестве экспериментального материала, а также позволяют проводить поиск оптимального сочетания внутренних параметров СЭП в аналитическом виде. Для получения нейросетевых моделей требуется гораздо большее количество эксперимен-

тов, но точность нейросетевых моделей существенно выше, что при построении мощных СЭП может оказаться решающим.

Поскольку этап построения математических моделей в системе полностью автоматизирован, основной проблемой в исследовании СЭП остается разработка имитационных моделей и получение набора переходных процессов при различных значениях входных параметров.

С помощью разработанной авторами АСНИ были построены и исследованы математические модели следующих СЭП КА:

- СЭП с многофазным шунтовым секционным стабилизатором напряжения (МШССН);
- СЭП с импульсно-дискретным шунтовым секционным стабилизатором напряжения (ИДШССН);
- СЭП с шунтовым секционным стабилизатором напряжения с управлением по избытку тока (ШССНУИТ).

Приведем структурные схемы и имитационные модели исследуемых СЭП и опишем принципы функционирования этих схем.

Прежде всего рассмотрим структурную схему СЭП с МШССН (рис. 2).

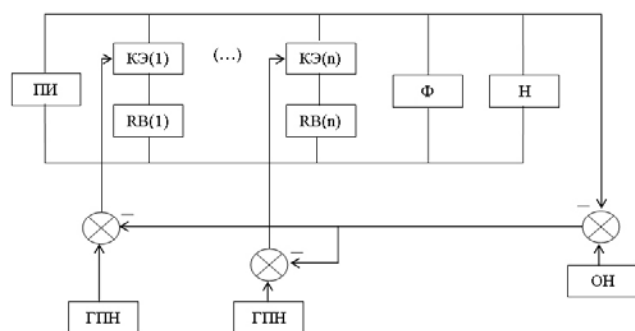


Рис. 2. Структурная схема СЭП с многофазным шунтовым секционным стабилизатором напряжения: ПИ – первичный источник; КЭ(n) – ключевые элементы; RB(n) – балластное сопротивление; Ф – фильтр; Н – активная нагрузка; ОН – опорное напряжение; ГПН – генератор пилообразного напряжения

Сигнал управления КЭ(n) формируется следующим образом:

$$a_n = U_{ГПН(n)} - U_{ОН} + U, \quad (1)$$

где $U_{ГПН(n)}$ – напряжение на генераторе пилообразного напряжения (ГПН) n -й секции; $U_{ОН}$ – опорное напряжение; U – выходное напряжение.

Если a_n больше некоторого порогового значения, то происходит коммутация n -й секции с балластным сопротивлением. Заметим, что частота пилы всех ГПН должна быть одинаковой, но со сдвигом по фазе

$$\Delta = \frac{T_{\Pi}}{N}, \quad (2)$$

где T_{Π} – период преобразования; N – количество секций с балластными сопротивлениями.

Имитационная модель СЭП с двухсекционным МШССН имеет следующий вид (рис. 3).

Рассмотрим далее структурную схему СЭП с ИДШССН (рис. 4).

Первая секция этого стабилизатора управляется по одному из законов широтно-импульсной модуляции.

Скважность γ ($\gamma = \frac{T_o}{T_{\Pi}}$, где T_o – время открытого состояния ключа) первого ключевого элемента, пропорциональная мощности, которая выделяется на балластном сопротивлении, является управляющим сигналом для подключения и отключения дополнительных секций. Если $\gamma > 0,95$, то на выходе системы управления дополнительными секциями (СУДС) должен быть сформирован сигнал включения дополнительной секции, если же $\gamma < 0,05$, то сигнал отключения. Для того чтобы избежать ложных коммутаций дополнительных секций во время переходных процессов, условия переключения этих секций должны выполняться в течение определенного времени. Это равносильно введению линий задержки на выходе СУДС. Блок управления ключевыми элементами (БУКЭ) должен формировать сигналы управления КЭ в зависимости от того, сколько сигналов включения и отключения было получено от СУДС. При отключении нагрузки дополнительные секции подключаются последовательно одна за другой до достижения суммарной мощностью величины, равной мощности активной нагрузки. При подключении нагрузки дополнительные секции отключаются последовательно, начиная с последней подключенной.

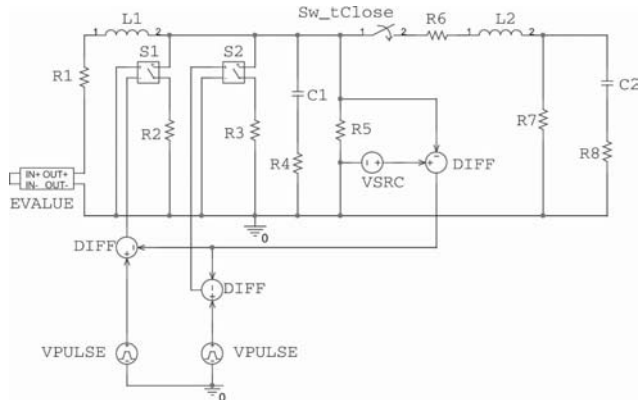


Рис. 3. Имитационная модель СЭП с МШССН

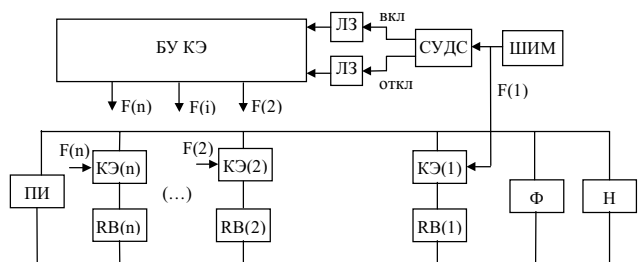


Рис. 4. Структурная схема СЭП с импульсно-дискретным шунтовым стабилизатором напряжения: ПИ – первичный источник; КЭ(i) – i -й ключевой элемент; RB(i) – i -е балластное сопротивление; Ф – емкостной фильтр; Н – нагрузка; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; $F(i)$ – сигнал управления i -м ключевым элементом; СУДС – система управления дополнительными секциями; ЛЗ – линия задержки; БУКЭ – блок управления ключевыми элементами

Система управления дополнительными секциями была реализована с помощью четырех суммирующих счетчиков (микросхема 74160). На базе этих счетчиков, с помощью каскадирования, было получено два 8-разряд-

ных счетчика, способных считать до 100 (10×10). На суммирующий вход этих счетчиков подаются импульсы с периодом, равным $0,95T/100$, где T – период преобразования. Импульсы, управляющие КЭ(1), поступают на управляющий вход обоих счетчиков, тем самым разрешая или запрещая счет какому-либо из них. Другими словами, для первого счетчика сигнал «ключ замкнут» разрешает счет, а для второго запрещает счет, и наоборот.

Таким образом, при $\gamma > 0,95$ на выходе переноса первого счетчика появляется импульс, информирующий о том, что необходимо подключить дополнительную секцию. А при $\gamma < 0,05$ на выходе переноса другого счетчика появляется импульс, отвечающий за отключение одной секции. Если эта информация сохраняется некоторое время, то она поступает в БУКЭ.

Блок управления КЭ реализован с помощью реверсивного счетчика 74192 и дешифратора 74141. Сигналы, отвечающие за подключение дополнительных секций, подаются на суммирующий вход реверсивного счетчика, а сигналы отключения дополнительных секций поступают на вычитающий вход. На выходе реверсивного счетчика в двоичном виде хранится информация о том, сколько дополнительных секций должно быть подключено в данный момент. Двоичный код поступает на вход дешифратора, а далее с помощью несложной логики, реализованной с помощью логических элементов «Или», формируются управляющие сигналы для КЭ(i).

Линии задержки были реализованы с помощью одновибратора 74121. Сигнал включения или отключения на выходе СУДС запускает одновибратор. Если одновибратор запущен, то импульсы, поступающие от СУДС, игнорируются.

Имитационную модель СЭП с ИДШССН можно представить, например, таким образом (рис. 5).

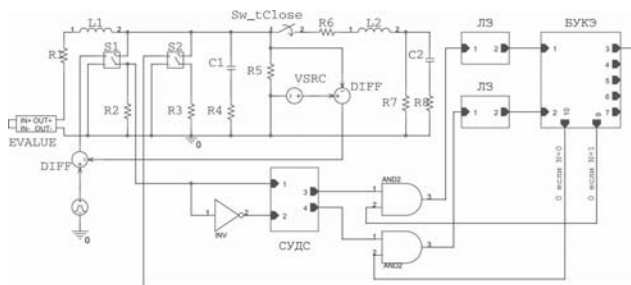


Рис. 5. Имитационная модель СЭП с двухсекционным ИДШССН

В заключение рассмотрим структурную схему СЭП с ШССНУИТ (рис. 6).

Первая секция данного стабилизатора управляется по одному из законов широтно-импульсной модуляции. Разница токов ИТ1 и ИТ2 является управляющим сигналом для подключения и отключения дополнительных секций. Эта разница показывает, на сколько ток, генерируемый ПИ, больше, чем ток, потребляемый на нагрузке. Если разделить эту разницу на ток, потребляемый одной дополнительной секцией с балластным сопротивлением, то мы получим количество дополнительных секций, которые должны быть подключены для стабилизации напряжения (мощности всех дополнительных секций равны). В

БУКЭ реализуется расчет необходимого количества дополнительных секций и формируются управляющие сигналы $F(i)$, где $i = \overline{2, N}$.

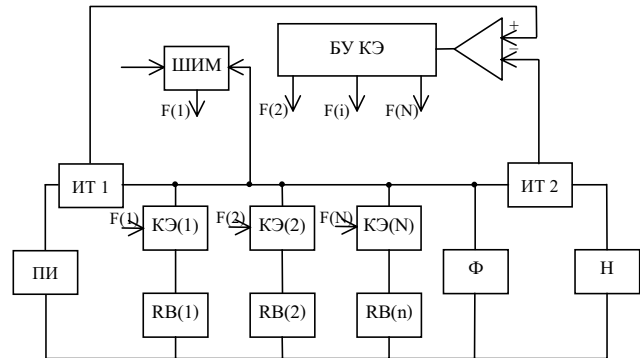


Рис. 6. Структурная схема СЭП с шунтовым секционным стабилизатором напряжения с управлением по избытку тока: ПИ – первичный источник; КЭ (i) – i -й ключевой элемент; $R_b(i)$ – i -е балластное сопротивление; Ф – емкостной фильтр; Н – нагрузка; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; $F(i)$ – сигнал управления i -м ключевым элементом; БУКЭ – блок управления ключевыми элементами; ИТ – измеритель тока; N – количество секций с балластным сопротивлением

Пример имитационной модели СЭП с ШССНУИТ приведен на рис. 7.

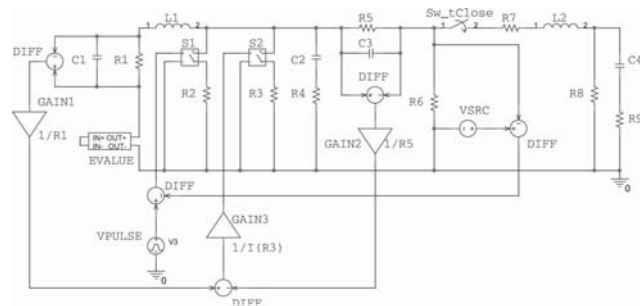


Рис. 7. Имитационная модель СЭП с двухсекционным ШССНУИТ

После того как разработаны имитационные модели, можно приступить к формированию набора экспериментальных данных. Сначала с помощью АСНИ нужно построить план проведения экспериментов, задав интервалы варьирования значений параметров СЭП. Затем, в соответствии с полученным планом, провести эксперименты на разработанных имитационных моделях и получить набор файлов с переходными процессами, генерируемых системой OrCAD 9.2. При получении экспериментальных данных рассматривался переходный процесс, наблюдаемый при коммутации активной нагрузки мощностью 95 % от максимальной.

Рассмотрим далее процесс построения регрессионных моделей, реализованный в АСНИ.

Поскольку количество секций является дискретной величиной, а все остальные факторы – непрерывными величинами, то использование ее в построении модели заведомо негативно скажется на точности предсказания выходных величин. Поэтому целесообразно исключить этот параметр из набора факторов регрессионной моде-

ли и строить модель для каждого значения N в отдельности. Таким образом, регрессионная модель СЭП в АСНИ представлена не тремя регрессионными уравнениями, а восемнадцатью:

$$\begin{aligned} T_{\text{рег } i} &= F_1(P_{\text{ист}}, C_{\text{ф}}, C_{\text{нагр}}), \\ \sigma_i &= F_2(P_{\text{ист}}, C_{\text{ф}}, C_{\text{нагр}}), \\ \delta_i &= F_3(P_{\text{ист}}, C_{\text{ф}}, C_{\text{нагр}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $i = \overline{1, N}$; $N = 6$.

При построении регрессионных моделей для создания плана экспериментов используется центральный композиционный план второго порядка, который позволяет получать регрессионные уравнения второй степени.

Любую математическую модель после построения нужно проверить на адекватность. В АСНИ для этой цели используется критерий Фишера. Точность полученной модели определяется по относительным отклонениям функций отклика от экспериментальных значений. Относительные отклонения аппроксимируемых величин для регрессионной модели СЭП с МШССН приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценки точности аппроксимации регрессионной модели исследуемых СЭП

Параметры	Значение	МШССН	ИДШССН	ШССНУИТ
$T_{\text{рег}}, \%$	Макс.	8,92	9,98	7,48
	Среднее	3,57	3,72	2,41
	Мин.	0,03	0,009	0,06
$\delta, \%$	Макс.	14,46	29,86	31,82
	Среднее	1,51	3,02	3,13
	Мин.	0,007	0,002	0,002
$\sigma, \%$	Макс.	7,01	7,05	23,05
	Среднее	1,39	1,54	2,38
	Мин.	0,002	0,01	0,006

Поскольку построенные по критерию Фишера регрессионные модели являются адекватными и их точность довольно высока, они могут быть использованы для анализа зависимостей между значениями параметров элементов СЭП и показателями качества выходного напряжения.

Как уже упоминалось ранее, наряду с регрессионными моделями в разработанной АСНИ имеется возможность строить математические модели СЭП с помощью

теории искусственных нейронных сетей. Рассмотрим, каким образом в АСНИ реализован процесс построения нейросетевых моделей.

Для качественной настройки весовых коэффициентов нейросети необходимо как можно больше опытов. От количества опытов зависит то, насколько точно нейросеть будет аппроксимировать данные. Для построения адекватной нейросетевой модели СЭП КА необходимо иметь экспериментальные данные, как минимум, в центре и крайних точках интервалов варьирования. Таким образом, общее количество необходимых экспериментов равно 162. Для настройки весовых коэффициентов нейросети в АСНИ включен программный эмулятор нейромикрокомпьютера «Neural Network Wizard 1.7», разработанный компанией «BaseGroup». Рекомендуемые настройки эмулятора: количество слоев – 1; количество нейронов на слое – 30; параметр сигмиды – 0,5; момент – 0,9.

После настройки весовых коэффициентов сети программа сохраняет файл с обученной нейронной сетью в файл *.npw. Эта сеть и является собственно математической моделью СЭП КА. Оценка точности аппроксимации исследуемых СЭП нейросетевой моделью представлена в табл. 2.

Таблица 2

Оценки точности аппроксимации нейросетевыми моделями исследуемых СЭП

Параметры	Значение	МШССН	ИДШССН	ШССНУИТ
$T_{\text{рег}}, \%$	Макс.	7,37	2,68	9,55
	Среднее	0,51	0,42	0,82
	Мин.	0,002	0,001	0,004
$\delta, \%$	Макс.	14,08	8,77	12,9
	Среднее	0,87	0,89	1,13
	Мин.	0,001	0,008	0,004
$\sigma, \%$	Макс.	15,07	2,86	3,89
	Среднее	0,50	0,32	0,84
	Мин.	0,004	0,001	0,0003

Точность построенных нейросетевых моделей высока, поэтому они могут быть использованы для анализа зависимостей между значениями параметров элементов СЭП и показателями качества выходного напряжения.

После того как все математические модели построены и проверены на адекватность, их можно использовать

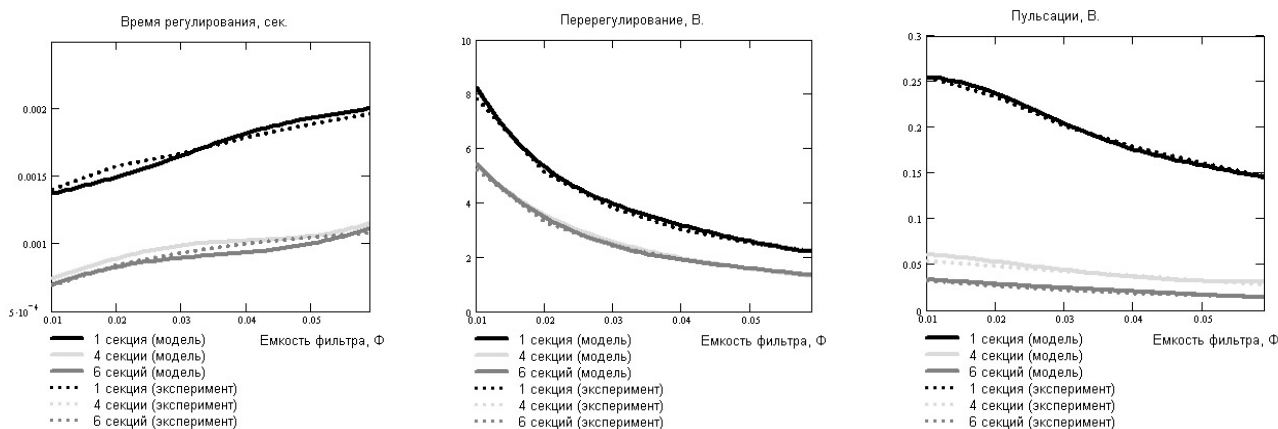


Рис. 8. Оценка зависимости показателей качества выходного напряжения от емкости фильтра при мощности ПИ = 10 кВт и емкостной составляющей нагрузки 6,25 мФ

для анализа зависимостей между входными и выходными параметрами. Разработанная АСНИ позволяет визуализировать полученные математические модели, что существенно упрощает процедуру их анализа. Графики сравнения нейросетевой модели СЭП с МШССН с экспериментальными данными (рис. 8) отображают зависимость выходных параметров от выбранного параметра СЭП, остальные входные параметры фиксируются на некотором уровне, заданном пользователем.

Автоматизированная система научных исследований также позволяет находить по построенным математическим моделям значения параметров СЭП, которые обеспечивают требуемое качество выходного напряжения, т. е. она осуществляет синтез СЭП КА. Для решения задачи синтеза необходимо указать требуемые показатели качества напряжения, а также мощность ПИ и максимальную емкость активной нагрузки. Решение задачи синтеза СЭП КА демонстрируют табл. 3, 4.

Таблица 3

Задание на синтез СЭП

Характеристики	Параметр	Требуемое значение
Требуемые показатели качества напряжения	$T_{\text{рег}}, \text{с}$	0,0035
	$\sigma, \text{В}$	0,01
	$\delta, \text{мВ}$	7
Известные параметры СЭП	$P_{\text{ист}}, \text{Вт}$	5 000
	$C_{\text{н}}, \text{Ф}$	0,006

Подводя итог, сформулируем основные результаты работы в виде следующих выводов:

– авторами разработана методика построения математических моделей СЭП КА, связывающих значения внутренних параметров СЭП КА и значения показателей качества выходного напряжения;

– разработана АСНИ для синтеза СЭП КА, позволяющая создавать и исследовать математические модели СЭП КА любых типов, а также производить поиск значений внутренних параметров систем электропитания КА, обеспечивающих требуемое качество выходного напряжения, т. е. производить синтез СЭП КА;

– в качестве примера представлены математические модели трех типов СЭП КА: с многофазным шунтовым секционным стабилизатором напряжения, с импульсно-дискретным шунтовым секционным стабилизатором напряжения и с шунтовым секционным стабилизатором напряжения с управлением по избытку тока.

Таблица 4

Найденные решения

Структура СЭП	N	C_{ϕ}
МШССН	5	(0,055; 0,06)
	6	(0,051; 0,06)
ШССНУИТ	3	(0,021; 0,06)
	4	(0,018; 0,06)
	5	(0,017; 0,06)
	6	(0,013; 0,06)

A. N. Lesnykh, V. A. Sarychev

COMPUTER-AIDED SYSTEM OF RESEARCH ACTIVITIES FOR SYNTHESIS OF SPACECRAFTS POWER-SUPPLY SYSTEMS

The paper says about features of synthesis of spacecrafts power-supply systems. The computer-aided system of research activities for synthesis of spacecrafts power-supply systems is proposed with that help power-supply systems of various types are researched.

СПОСОБЫ РАСЧЕТА ГРАНИЦЫ ЗОНЫ ВИДИМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИИ И РАЗМЕРАХ ТЕЛЕСНОГО УГЛА НАБЛЮДЕНИЯ

Рассматривается проблема расчета зоны видимости поверхности Земли с космического аппарата, имеющего ориентируемую ось антенны с заданной диаграммой телесного угла наблюдения. Описана методика и алгоритм точного и оптимального расчета этой зоны для использования при графическом отображении на электронных картах.

Задача, связанная с определением наблюдаемой зоны поверхности Земли с космического аппарата (КА) при различной ориентации и размерах телесного угла наблюдения, является одной из распространенных задач баллистико-навигационного обеспечения определенного класса КА. В частности, к таким космическим аппаратам можно отнести КА связи и КА, используемые для визуального наблюдения поверхности Земли и околоземного пространства.

Основным результатом решения данной задачи являются координаты замкнутой линии – границы зоны наблюдаемости (ЗН), которые могут быть вычислены с использованием предлагаемого в данной статье алгоритма.

При описании алгоритма используются следующие обозначения и допущения. В качестве математическим представлении поверхности Земли принят двусосный эллипсоид вращения в *гринвичской системе координат* (ГСК) $(0, x_G, y_G, z_G)$. Уравнения этого эллипсоида в матричной форме может быть представлено в виде

$$q_G^T \cdot A_G \cdot q_G = 1, \quad (1)$$

$$\text{где } A_G = \begin{pmatrix} 1/a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/b^2 \end{pmatrix}, \quad q_G = \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} - \text{соответ-$$

ственно матрица квадратичной формы размерности 3×3 и 3-мерный вектор координат x_G, y_G, z_G в ГСК; a, b – соответственно размеры большой и малой полуосей эллипсоида.

Для упрощения и наглядности математических преобразований в данной статье используются четыре специальных декартовых системы координат (СК), начала которых совпадают и находятся в центре масс КА, в точке с координатами (x_K, y_K, z_K) в ГСК.

Навигационная орбитальная система координат (НОСК) $(0, x_N, y_N, z_N)$ – это такая СК, в которой ось Oz_N совпадает с направлением линии от центра ГСК к центру НОСК, ось Ox_N перпендикулярна оси Oz_N и лежит в плоскости, содержащей центр Земли и вектор скорости КА, ось Oy_N дополняет систему до правой системы координат. Направление оси Ox_N выбирается по условию, что угол между осью Ox_N и вектором скорости КА $V = (Vx_K, Vy_K, Vz_K)$ в ГСК минимален. Формула перевода координат из ГСК (q_G) в НОСК (q_N) имеет следующий вид:

$$q_N = M_N \cdot q_G - M_N \cdot q_K, \quad (2)$$

где $q_K = (x_K, y_K, z_K)^T$, M_N – соответственно радиус вектор КА в ГСК и матрица направляющих косинусов,

элементы $m_N(i, j)$, $i, j = \overline{1, 3}$ которой вычисляются по формулам

$$m_N(2, 1) = d_1/d, \quad m_N(2, 2) = d_2/d, \quad m_N(2, 3) = d_3/d,$$

$$m_N(3, 1) = x_K a / R, \quad m_N(3, 2) = y_K a / R,$$

$$m_N(3, 3) = z_K a / R, \quad m_N(1, 1) =$$

$$= m_N(2, 2)z_K a / R - m_N(2, 3)y_K a / R,$$

$$m_N(1, 2) = m_N(2, 3)x_K a / R - m_N(2, 1)z_K a / R,$$

$$m_N(1, 3) = m_N(2, 1)y_K a / R - m_N(2, 2)x_K a / R,$$

$$\text{здесь } d_1 = y_K \cdot Vz_K / R - z_K \cdot Vy_K / R,$$

$$d_2 = z_K \cdot Vx_K / R - x_K \cdot Vz_K / R,$$

$$d_3 = x_K \cdot Vy_K / R - y_K \cdot Vx_K / R,$$

$$d = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2}, \quad R = \sqrt{x_K a^2 + y_K a^2 + z_K a^2}.$$

Конструкторская декартовая система координат (КСК) $(0, x_K, y_K, z_K)$ имеет оси, ориентированные по осям симметрии КА. Эта система координат используется для задания ориентации системы наблюдения КА. Перевод координат из КСК q_K в НОСК q_N осуществляется по формуле

$$q_N = M_K \cdot q_K, \quad (3)$$

в которой матрица направляющих косинусов M_K зависит от ориентации осей КА в НОСК.

Предполагается, что система наблюдения КА обеспечивает обзор поверхности Земли и околоземного пространства в пределах конуса, имеющего определенные угловые размеры. В качестве параметров, определяющих размерность и ориентацию конуса наблюдения, можно взять телесный угол конуса, равный 2γ , где γ – угол между центральной осью и образующей конуса; азимут оси конуса α – угол, отсчитываемый от оси Ox_K против часовой стрелки в плоскости $Ox_K y_K$; угол места β – угол, отсчитываемый от плоскости $Ox_K y_K$ против часовой стрелки в направлении от оси Oz_K в КСК.

Конусная система координат (КнСК) $(0, x_{KN}, y_{KN}, z_{KN})$ – система координат, в которой ось Oz_{KN} лежит на фокальной оси конуса и направлена от центра Земли. Ось Ox_{KN} перпендикулярна оси Oz_{KN} и лежит в плоскости, заданной в КСК уравнением $x_K \cos \alpha - y_K \sin \alpha = 0$. Ось Oy_{KN} дополняет систему до правой. Формула перевода координат из КнСК q_{KN} в КСК q_K имеет вид

$$q_K = M_{KN} \cdot q_{KN}, \quad (4)$$

$$\text{где } M_{KN} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}.$$

Плоскостная система координат (ПлСК) $(0, x_p, y_p, z_p)$ – это такая система координат, в которой ось Oz_p совпадает с осью Oz_{KN} . ПлСК в начальном положении ($\omega = 0$) полностью совпадает с КнСК. При значениях $\omega \neq 0$ ось Ox_p сориентирована таким образом, что угол между векторами Ox_{KN} и Ox_p в КнСК равен ω , а ось Oy_p дополняет систему до правой. Формула перевода координат из ПлСК q_p в КнСК q_{KN} имеет вид

$$q_{KN} = M_p(\omega) \cdot q_p, \quad (5)$$

$$\text{где } M_p(\omega) = \begin{pmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Формулы обратного перевода координат для указанных четырех систем координат получаются как решение уравнений (2)...(5) относительно векторов q_G, q_K, q_{KN}, q_p .

Учитывая введенные обозначения, можно утверждать, что искомая ЗН должна быть образована пересечением эллипсоида вращения и конуса. Следовательно, ЗН есть решение системы уравнений

$$\begin{cases} q_{KN}^T \cdot A_{KN} \cdot q_{KN} - 2 \cdot q_{KN}^T \cdot A_{KN} \cdot q_{CKN} + q_{CKN}^T \cdot A_{KN} \cdot q_{CKN} = 1, \\ x_{KN}^2 + y_{KN}^2 - tg^2 \gamma \cdot z_{KN}^2 = 0, \end{cases} \quad (6)$$

которые представлены в КнСК. Это несложно сделать с учетом введенных выше систем координат. В частности, первое уравнение – уравнение эллипсоида – имеет такой вид благодаря тому, что матрица квадратичной формы эллипсоида в КнСК имеет вид $A_{KN} = D^T \cdot A_G \cdot D$, где $D = M_N^T \cdot M_K \cdot M_{KN}$ – матрица перевода координат из ГСК в КнСК, а вектор координат q_{CKN} центра эллипсоида в КнСК можно получить по формуле $q_{CKN} = D^T (-qka)$.

Приведение указанных уравнений в КнСК позволяет записать уравнение конуса в канонической форме, что упрощает совместное решение системы.

В реальной обстановке при различной ориентации осей КА и оси конуса в КСК часть образующих конуса могут не пересекать поверхность эллипсоида. Это приводит к тому, что для определения ЗН необходимо решать описанную выше задачу при некоторых ограничениях. Все решения системы (6) делятся на два типа. Одни решения принадлежат видимой (наблюдаемой с КА) зоне – это множество V , другие – и теневой (не наблюдаемой с КА) зоне – это множество T . В итоге определение границы ЗН сводится к нахождению всех решений системы уравнений

$$\begin{cases} q_{KN}^T \cdot A_{KN} \cdot q_{KN} - 2q_{KN}^T \cdot A_{KN} \cdot q_{CKN} + q_{CKN}^T \cdot A_{KN} \cdot q_{CKN} = 1, \\ x_{KN}^2 + y_{KN}^2 = tg^2 \gamma \cdot z_{KN}^2, \\ (x_{KN}, y_{KN}, z_{KN}) \in V. \end{cases} \quad (7)$$

где $A_{KN} = M_p^T(\omega) A_G \cdot M_p(\omega)$, здесь $M_p(\omega)^T$ – транспонированная матрица $M_p(\omega)$, вследствие ортогональности обратная к ней.

Множество V состоит из точек (x_v, y_v, z_v) , координаты которых в ГСК удовлетворяют условию того, что данная точка является ближайшим решением к точке (xka, yka, zka) системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{x - x_v}{x_v - xka} = \frac{y - y_v}{y_v - yka} = \frac{z - z_v}{z_v - zka}, \\ \frac{x_v^2}{a^2} + \frac{y_v^2}{a^2} + \frac{z_v^2}{b^2} = 1. \end{cases}$$

Задача определения границы ЗН сводится к определению координат точек границы – решений системы уравнений (7). Для этого необходимо решать систему (6) и при этом контролировать степень пересечения конуса и двусосного эллипсоида.

Далее через фокальную ось конуса будем проводить всевозможные плоскости. Каждая из плоскостей, определяемая заданной матрицей перехода $M_p(\omega)$ в КнСК, будет содержать сечение эллипсоида, при этом возможны случаи отсутствия пересечения с эллипсоидом (рис. 1). Решение общей задачи сводится к построению этих плоскостей и определению координат точек пересечения эллипсоида и образующих конуса, лежащих в данной плоскости. Количество плоскостей и их «равномерность» относительно угла разворота относительно фокальной оси конуса определяет точность линии границы ЗН. Вне зависимости от количества учитываемых плоскостей они должны быть расположены равномерно относительно вращения вокруг фокальной оси конуса. Это означает, что углы между любыми двумя соседними (с точки зрения вращения) плоскостями должны быть одинаковыми.

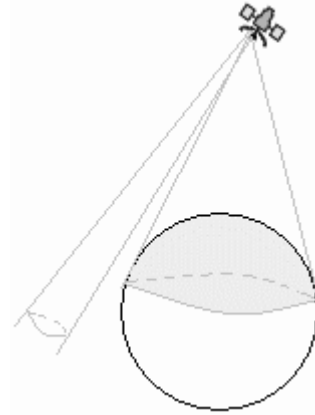


Рис. 1. Сечение Земли. Отсутствие пересечения

Дальнейшее решение задачи будем производить в плоскостях, заданных уравнением $y_p = 0$ в ПлСК для выбранных значений ω . Вначале нужно определить, пересекает ли данная плоскость эллипсоид. Затем в данной плоскости необходимо определить, пересекает ли сечение эллипсоида образующие конуса KC и KD (рис. 2).

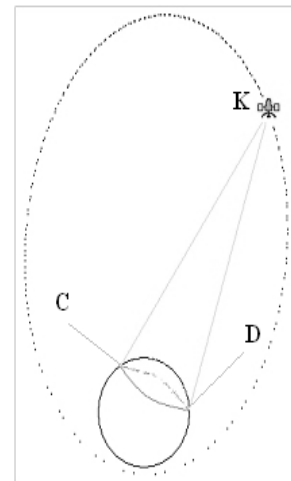


Рис. 2. Определение ЗН

Задача определения координат точек C и D сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} q_p^T \cdot A_p \cdot q_p - 2q_p^T \cdot A_p \cdot q_{CP} + q_{CP}^T \cdot A_p \cdot q_{CP} = 1, \\ x_p = \pm \operatorname{tg} \gamma z_p, \quad y_p = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Далее будем решать уравнение (8), проверяя принадлежность точек решения к множеству V . Проведя простое преобразование, получим первое уравнение в следующем виде:

$$a_{\omega}[1]x^2 + 2a_{\omega}[3]x \cdot z + a_{\omega}[9]z^2 - 2c_1 \cdot x - 2c_3 \cdot z + d = 0,$$

где $\{a_{\omega}\}$ – матрица эллипсоида вращения в ПлСК;

$$c_1 = a_{\omega}[1]xc + a_{\omega}[2]yc + a_{\omega}[3]zc,$$

$$c_3 = a_{\omega}[7]xc + a_{\omega}[8]yc + a_{\omega}[9]zc,$$

$$d = a_{\omega}[1]xc^2 + 2a_{\omega}[2]xc \cdot yc + a_{\omega}[5]yc^2 +$$

$$+ 2a_{\omega}[3]xc \cdot zc + 2a_{\omega}[6]yc \cdot zc + a_{\omega}[9]zc^2 - 1.$$

Итак, система уравнений примет вид

$$\begin{cases} a_{\omega}[1]x^2 + 2a_{\omega}[3]x \cdot z + a_{\omega}[9]z^2 - 2c_1 \cdot x - 2c_3 \cdot z + d = 0, \\ x = \pm \operatorname{tg} \gamma z, \end{cases}$$

что позволяет, подставив второе уравнение в первое, получить квадратное уравнение относительно z :

$$(a_{\omega}[1]\operatorname{tg}^2 \gamma + 2a_{\omega}[3]\operatorname{tg} \gamma + a_{\omega}[9])z^2 - 2(c_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma + c_3)z + d = 0.$$

Запишем дискриминант данного уравнения. Только вместо константы $\operatorname{tg} \gamma$ будем использовать переменную t . Получим

$$\operatorname{Discr}(t) = 4 \times$$

$$\times ((c_1^2 - a_{\omega}[1]d)t^2 - 2(a_{\omega}[3]d - c_1 \cdot c_3)t + c_3^2 - d \cdot a_{\omega}[9]).$$

Значения параметра t , при которых $\operatorname{Discr}(t) = 0$, будут равны тангенсам наклона тех прямых, которые являются касательными к сечению двусосного эллипсоида в данной плоскости. При этом если $\operatorname{Discr}(t) < 0$, то это означает, что данная плоскость не пересекает поверхность двусосного эллипсоида Земли.

В случае если

$A = (a_{\omega}[3]d - c_1 \cdot c_3)^2 - (c_1^2 - a_{\omega}[1]d)(c_3^2 - d \cdot a_{\omega}[9]) \geq 0$, то данная плоскость будет пересекать поверхность земли и переменные t_1, t_2 будут соответственно меньшим и большим из двух чисел:

$$\frac{a_{\omega}[3]d - c_1 \cdot c_3 \pm \sqrt{A}}{c_1^2 - a_{\omega}[1]d}.$$

Если выполняется хотя бы одно из условий: $\operatorname{tg} \gamma \in (-t_2, -t_1)$ или $\operatorname{tg} \gamma \in (t_1, t_2)$, то хотя бы одна из

образующих конуса, лежащих в данной плоскости, пересекает Землю. Это означает, что хотя бы одна из двух образующих конуса, лежащих в данной плоскости, пересекает поверхность двусосного эллипсоида.

Для некоторых задач необходимо контролировать, пересекает ли фокальный луч конуса поверхность эллипсоида. Для этого в ПлСК нужно определить, имеет ли уравнение $a_{\omega}[1]x^2 + 2a_{\omega}[3]x \cdot z + a_{\omega}[9]z^2 - 2c_1 \cdot x - 2c_3 \cdot z + d = 0$ решение при условии $x = 0$. Если $c_3 \cdot c_3 - d \cdot a_{\omega}[9] \geq 0$, то фокальный луч пересекает поверхность Земли.

В случае пересечения одной из образующих поверхность эллипсоида решение в ПлСК имеет вид

$$x_{PLSK} = t_1^* \cdot M - xc,$$

$$y_{PLSK} = -yc, \quad z_{PLSK} = M - zc,$$

где $M = \frac{t_1^* \cdot c_1 + c_3 + \sqrt{\operatorname{Discr}(t_1^*)/4}}{a_{\omega}[1](t_1^*)^2 + 2a_{\omega}[3]t_1^* + a_{\omega}[9]}$; $t_1^* = \min(t_1, -\operatorname{tg} \gamma)$ – тангенс угла наклона образующей, в случае если образующая конуса не пересекает поверхность Земли t_1^* – тангенс наклона касательной, проведенной из центра масс КА к поверхности Земли в данной плоскости. Для второй образующей решение может быть получено по той же формуле, только вместо параметра t_1^* нужно использовать параметр $t_2^* = \max(t_2, \operatorname{tg} \gamma)$.

Рассмотренную процедуру вычислений необходимо произвести для всех принятых к учету плоскостей. Далее необходимо перевести координаты граничных точек в ГСК. Для этого построим матрицу перевода из ПлСК в ГСК. Координаты точек границы в ГСК, полученных при сечении эллипсоида плоскостями в КнСК можно вычислить по формуле

$$\begin{pmatrix} x_{GSK} \\ y_{GSK} \\ z_{GSK} \end{pmatrix} = mD \cdot mP_{\alpha}^T \begin{pmatrix} x_{PLSK} \\ y_{PLSK} \\ z_{PLSK} \end{pmatrix}.$$

Точка с координатами $(x_{GSK}, y_{GSK}, z_{GSK})$ принадлежит поверхности Земли. Остается лишь произвести перевод координат из ГСК в геодезические координаты для дальнейшего нанесения точек границы на карту плоской проекции поверхности Земли.

Таким образом, предложенная методика и алгоритм решения задачи позволяют получить точные результаты и существенно оптимизировать расчет зоны наблюдаемости для использования в геоинформационных системах.

V. V. Demenko

THE METHODS OF ESTIMATION OF VISIBILITY ZONES ON EARTH SURFACE FROM A SPACE VEHICLE FOR DIFFERENT ORIENTATIONS AND SOLID ANGLE VALUES

The article considers a problem of estimation of visibility zones on Earth surface from SV with orientable axis of antenna with given diagram of visibility solid angle. The methodology and algorithm of exact and optimal calculation of mentioned zones are described for use during graphic mapping onto electronic maps.

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИМИТАТОРОВ ПЕРВИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрен метод синтеза, позволяющий создавать имитаторы первичных источников электроэнергии космических аппаратов с требуемой динамической точностью.

В общем случае имитатор первичного источника электроэнергии (ИПИЭ) космического аппарата (КА) [1] представляет собой многоконтурную и нелинейную систему автоматического регулирования. В связи с этим возникают такие проблемы, как проблема обеспечения устойчивости при работе на переменную нагрузку и проблема качества воспроизведения динамических характеристик ПИЭ. Разработчики ИПИЭ обычно решают только проблему устойчивости на основе общих методов теории автоматического управления, без увязки устойчивости с качеством воспроизведения динамических характеристик ПИЭ. В данной статье рассмотрен метод синтеза, позволяющий решить эти проблемы совместно.

Концепция метода состоит в следующем:

– динамические свойства ПИЭ полностью определяются его полным внутренним сопротивлением (импедансом) или полной внутренней проводимостью (адмитансом) (их обобщающее название – иммитансные характеристики);

– если имитатор воспроизводит иммитансные характеристики ПИЭ, то вопросы устойчивой работы имитатора на переменную нагрузку идентичны вопросам работы самого ПИЭ на аналогичную нагрузку;

– обеспечение устойчивости имитаторов ПИЭ следует вести с позиции воспроизведения требуемых иммитансных характеристик ПИЭ.

Устойчивая работа источника электрической энергии с нагрузкой в общем случае определяется характеристическими уравнениями вида

$$1 + Y_i(s) \cdot Z_n(s) = 0 \text{ или } 1 + Z_i(s) \cdot Y_n(s) = 0,$$

где $Y_i(s) = \frac{\partial I_n}{\partial U_n}$ и $Z_i(s) = \frac{\partial U_n}{\partial I_n}$ – соответственно адмитанс и импеданс ИПИЭ; $Z_n(s)$, $Y_n(s)$ – иммитансные характеристики нагрузки; U_n , I_n – ток и напряжение нагрузки соответственно.

Линеаризуя нелинейные характеристики звеньев в обобщенных функциональных схемах ИПИЭ [2], найдем обобщенные функциональные схемы ИПИЭ для приращений, позволяющие определить иммитансные характеристики ИПИЭ.

В соответствии с обобщенными схемами (рис. 1), используя топологическую формулу Мэзона [3], можно непосредственно по функциональным схемам имитаторов записать реальные выражения импеданса и адмитанса.

Для схемы с усилителем мощности – эквивалентным генератором напряжения (ЭГН) (рис. 1, а) выражения для нахождения импеданса имеют вид

$$Z_{p0}(I_0) = \frac{\Delta U_n}{\Delta I_n} = G \cdot Z_{n.p}(I_0) + \frac{Z_i(I_0) + AK_{н.т} W_{x.x} + CK_{п.у}(I_0) W_{x.x}}{\Delta_U}, \quad (1)$$

$$\Delta_U = 1 + E \cdot Y_{н.п}(U_0) [Z_i(I_0) + W_{x.x} (AK_{н.т} + CK_{п.у}(I_0))] + [BK_{н.т} + DK_{п.у}(U_0)] W_{x.x}, \quad (2)$$

где I_0 , U_0 – ток и напряжение нагрузки в точке линеаризации нелинейной вольт-амперной характеристики ПИЭ.

Для схемы с усилителем мощности – эквивалентным генератором тока (ЭГТ) (рис. 1, б) выражения для нахождения адмитанса имеют вид

$$Y_{p0}(U_0) = \frac{\Delta I_n}{\Delta U_n} = G \cdot Y_{н.п}(U_0) + \frac{Y_i(U_0) + AK_{н.п} W_{к.з} + C \cdot K_{п.л}(U_0) \cdot W_{к.з}}{\Delta_I}, \quad (3)$$

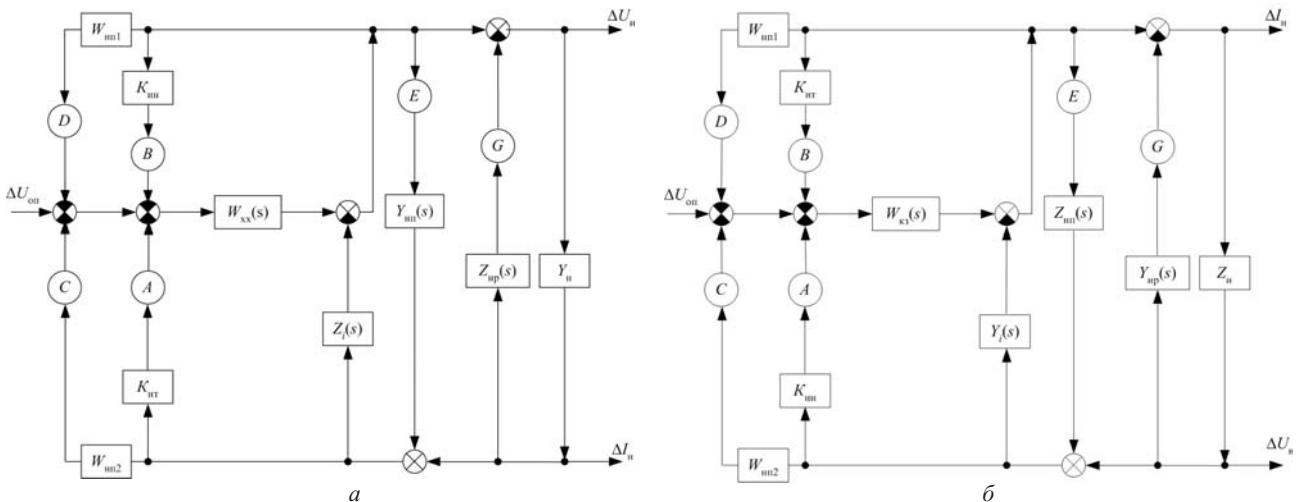


Рис. 1. Линеаризованные обобщенные функциональные схемы имитаторов ПИЭ: а – усилитель мощности – эквивалентный генератор напряжения; б – усилитель мощности – эквивалентный генератор тока

$$\Delta_I = 1 + EZ_{н.р.}(I_0) \left[Y_i(U_0) + (AK_{н.н} + CK_{п.}(U_0))W_{к.з.} \right] + [BK_{н.т.} + D \cdot K_{п.}(I_0)]W_{к.з.} \quad (4)$$

Наиболее распространенные структуры имитаторов с иллюстрацией коэффициентов связей представлены в табл. 1.

На основании табл. 1 и с учетом выражений иммитансных характеристик можно записать выражения импеданса и адмитанса для конкретных структур имитаторов (табл. 2).

Таблица 1

Коэффициенты связей обобщенных схем имитаторов

Вид обобщенной схемы	Коэффициенты						Вид конкретной структуры
	A	B	C	D	E	G	
Усилитель мощности в виде ЭГН	0	1	1	0	0	0	СНФОТ
	1	0	0	0	1	0	СТФП
	1	0	0	1	0	0	СТФОН
	0	1	0	0	0	1	СНФР
Усилитель мощности в виде ЭГТ	0	1	1	0	0	0	СТФОН
	1	0	0	0	1	0	СНФР
	1	0	0	1	0	0	СНФОТ
	0	1	0	0	0	1	СТФП

Примечание. В табл. 1 приняты следующие сокращения: СНФОТ – стабилизатор напряжения с функциональной обратной связью по току нагрузки; СТФОН – стабилизатор тока с функциональной обратной связью по напряжению нагрузки; СТФП – стабилизатор тока с функциональной проводимостью в цепи нагрузки; СНФР – стабилизатор напряжения с функциональным резистором в цепи нагрузки.

Сравнительный анализ выражений иммитансных характеристик позволяет сделать следующие выводы:

1. В случае использования усилителя мощности в виде эквивалентного генератора напряжения ИПИЭ целесообразно строить на основе стабилизатора напряжения с функциональной обратной связью по току нагрузки (СНФОТ) или с функциональным резистором, последовательно включенным с нагрузкой (СНФР).

2. В случае использования усилителя мощности в виде эквивалентного генератора тока ИПИЭ следует строить на основе стабилизатора тока с функциональной обратной связью по напряжению нагрузки (СТФОН) или с функциональной проводимостью, включенной параллельно нагрузке (СТФП). В обоих этих случаях характеристический полином (знаменатель) иммитансной характеристики не содержит нелинейных членов, что существенно упрощает синтез имитаторов.

3. В указанных выше случаях выражения иммитансных характеристик представляют собой сумму иммитансов собственно стабилизатора и слагаемого, определяемого нелинейным преобразователем.

Например, для импеданса $Z_{им}(s)$ СНФОТ в соответствии с табл. 2 можно записать

$$Z_{им}(s) = Z_{н.п.}(s) + Z_{с.н.}(s), \quad (5)$$

где

$$Z_{н.п.}(s) = \frac{W_{х.х.} \cdot W_{н.п.}(s)}{1 + K_{н.н.} \cdot W_{х.х.}(s)} \quad (6)$$

– слагаемое, определяемое нелинейной обратной связью по току нагрузки;

$$Z_{с.н.}(s) = \frac{Z_i(s)}{1 + K_{н.н.} \cdot W_{х.х.}(s)} \quad (7)$$

– импеданс стабилизатора напряжения.

Таблица 2

Иммитансные характеристики структур имитаторов

Вид обобщенной схемы	Вид конкретной структуры	Иммитансная характеристика
Усилитель мощности в виде ЭГН	СНФОТ	$Z_{им}(s) = \frac{W_{х.х.} \cdot W_{н.п.}(s) + Z_i(s)}{1 + K_{н.н.} \cdot W_{х.х.}(s)}$
	СТФП	$Z_{им}(s) = \frac{Z_i(s) + K_{н.т.} \cdot W_{х.х.}(s)}{1 + W_{н.п.}(s) \cdot (Z_i(s) + K_{н.т.} \cdot W_{х.х.}(s))}$
	СТФОН	$Z_{им}(s) = \frac{Z_i(s) + K_{н.т.} \cdot W_{х.х.}(s)}{1 + W_{х.х.} \cdot W_{н.п.}(s)}$
	СНФР	$Z_{им}(s) = W_{н.п.}(s) + \frac{Z_i(s)}{1 + K_{н.н.} \cdot W_{х.х.}(s)}$
Усилитель мощности в виде ЭГТ	СТФОН	$Y_{им}(s) = \frac{W_{к.з.} \cdot W_{н.п.}(s) + Y_i(s)}{1 + K_{н.т.} \cdot W_{к.з.}(s)}$
	СНФР	$Y_{им}(s) = \frac{Y_i(s) + K_{н.н.} \cdot W_{к.з.}(s)}{1 + W_{н.п.}(s) \cdot (Y_i(s) + K_{н.н.} \cdot W_{к.з.}(s))}$
	СНФОТ	$Y_{им}(s) = \frac{Y_i(s) + K_{н.н.} \cdot W_{к.з.}(s)}{1 + W_{к.з.} \cdot W_{н.п.}(s)}$
	СТФП	$Y_{им}(s) = W_{н.п.}(s) + \frac{Y_i(s)}{1 + K_{н.т.} \cdot W_{к.з.}(s)}$

Адмитанс $Y_{им}(s)$ СТФОН также представляется в виде двух слагаемых:

$$Y_{им}(s) = Y_{н.п}(s) + Y_{с.т}(s), \quad (8)$$

где

$$Y_{н.п}(s) = \frac{W_{к.з} \cdot W_{н.п}(s)}{1 + K_{н.т} \cdot W_{к.з}(s)} \quad (9)$$

– слагаемое, определяемое нелинейной обратной связью по напряжению нагрузки;

$$Y_{с.т}(s) = \frac{Y_i(s)}{1 + K_{н.т} \cdot W_{к.з}(s)} \quad (10)$$

– адмитанс стабилизатора тока.

В выражении (6) произведение $K_{н.т} \cdot W_{к.з}(s)$ представляет собой передаточную функцию (ПФ) разомкнутого контура стабилизации напряжения, определяющую точность и устойчивость стабилизатора. Для обеспечения высокой точности в рабочем диапазоне частот обычно выполняется условие

$$|K_{н.т} \cdot W_{к.з}(j\omega)| \gg 1. \quad (11)$$

С учетом (11) по (6) и (7) получим импедансные частотные характеристики (ИЧХ):

$$Z_{н.п}(j\omega) \approx \frac{W_{н.п}(j\omega)}{K_{н.т}}; \quad Z_{с.т}(j\omega) \approx \frac{Z_i(j\omega)}{K_{н.т} \cdot W_{к.з}(j\omega)}. \quad (12)$$

Выражения (12) могут быть использованы для динамического синтеза имитаторов следующим образом.

В диапазоне частот, где выполняется условие

$$|Z_{н.п}(j\omega)| > |Z_{с.т}(j\omega)|, \quad (13)$$

выходной импеданс СНФОТ определяется импедансом нелинейного преобразователя:

$$Z_{им}(j\omega) = Z_{н.п}(j\omega). \quad (14)$$

В диапазоне частот, где модуль стабилизатора напряжения больше модуля нелинейного преобразователя:

$$|Z_{н.п}(j\omega)| < |Z_{с.т}(j\omega)|, \quad (15)$$

выходной импеданс СНФОТ равен импедансу стабилизатора напряжения.

$$Z_{им}(j\omega) = Z_{с.т}(j\omega). \quad (16)$$

По выражению (12) следует, что высокочастотную область импеданса СНФОТ наиболее рационально формировать за счет импеданса стабилизатора напряжения, так как в области низких частот модуль $|Z_{с.т}(j\omega)|$ весьма мал. Низкочастотную же область должно обеспечить слагаемое $Z_{н.п}(j\omega)$, т. е., по существу, импеданс нелинейного преобразователя.

Представим требуемый импеданс СНФОТ в виде произведения ИЧХ для низкочастотной области $Z_{нч}(j\omega)$ и высокочастотной области $Z_{вч}(j\omega)$:

$$Z_{им}(j\omega) = Z_{нч}(j\omega) \cdot Z_{вч}(j\omega). \quad (17)$$

Приравняем частотные характеристики $Z_{нч}(j\omega) = Z_{н.п}(j\omega)$ и $Z_{вч}(j\omega) = Z_{с.т}(j\omega)$. В результате получим:

$$W_{н.п}(j\omega) = Z_{нч}(j\omega) K_{н.т}, \quad (18)$$

$$W_{к.з}(j\omega) = \frac{Z_i(j\omega)}{K_{н.т} \cdot Z_{вч}(j\omega)}. \quad (19)$$

Выражения (18), (19) позволяют определить требования к частотным свойствам нелинейного преобразователя и стабилизатора напряжения при известных ИЧХ $Z_i(j\omega)$, $Z_{нч}(j\omega)$, $Z_{вч}(j\omega)$ и коэффициенте $K_{н.т}$ обратной связи.

Передаточная функция $W_{к.з}(s)$ обобщает динамические характеристики всего канала усиления стабилизатора. Выделяя в $W_{к.з}(s)$ ПФ последовательного корректирующего устройства $W_{к.у}(s)$ и ПФ усилителя мощности $W_{у.м}$:

$$W_{к.з}(s) = W_{к.у}(s) \cdot W_{у.м}(s), \quad (20)$$

найдем ПФ последовательного корректирующего устройства, обеспечивающего устойчивость и требуемый вид ИЧХ имитатора:

$$W_{к.у}(j\omega) = \frac{Z_i(j\omega)}{K_{н.т} \cdot Z_{нч}(j\omega) \cdot W_{у.м}(j\omega)}. \quad (21)$$

В выражении (9) произведение $K_{н.т} \cdot W_{к.з}(s)$ представляет собой ПФ разомкнутого контура стабилизации тока и определяет точность и устойчивость стабилизатора. Для обеспечения высокой точности в рабочем диапазоне частот обычно выполняется условие

$$|K_{н.т} \cdot W_{к.з}(j\omega)| \gg 1. \quad (22)$$

С учетом (22) по (9) и (10) получим адмитансные частотные характеристики (АДЧХ) нелинейного преобразователя и стабилизатора тока:

$$Y_{н.п}(j\omega) \approx \frac{W_{н.п}(j\omega)}{K_{н.т}}, \quad Y_{с.т}(j\omega) \approx \frac{Y_i(j\omega)}{K_{н.т} \cdot W_{к.з}(j\omega)}. \quad (23)$$

В диапазоне частот, где выполняется условие

$$|Y_{н.п}(j\omega)| > |Y_{с.т}(j\omega)|, \quad (24)$$

выходной адмитанс СТФОН определяется адмитансом нелинейного преобразователя:

$$Y_{им}(j\omega) = Y_{н.п}(j\omega). \quad (25)$$

В диапазоне частот, где, наоборот, модуль стабилизатора тока больше модуля нелинейного преобразователя:

$$|Y_{н.п}(j\omega)| < |Y_{с.т}(j\omega)|, \quad (26)$$

выходной адмитанс СТФОН равен адмитансу стабилизатора тока:

$$Y_{им}(j\omega) = Y_{с.т}(j\omega). \quad (27)$$

По выражению (23) следует, что высокочастотную область адмитанса СТФОН наиболее рационально формировать за счет адмитанса стабилизатора тока, так как в области низких частот модуль $|Y_{с.т}(j\omega)|$ достаточно невелик. А низкочастотную область должно обеспечить слагаемое $Y_{н.п}(j\omega)$, т. е. адмитанс нелинейного преобразователя.

Представим требуемый адмитанс СТФОН в виде произведения АДЧХ для низкочастотной области $Y_{нч}(j\omega)$ и высокочастотной области $Y_{вч}(j\omega)$:

$$Y_{им}(j\omega) = Y_{нч}(j\omega) \cdot Y_{вч}(j\omega). \quad (28)$$

Приравняем частотные характеристики $Y_{нч}(j\omega) = Y_{н.п}(j\omega)$ и $Y_{вч}(j\omega) = Y_{с.т}(j\omega)$. В результате получим:

$$W_{н.п}(j\omega) = Y_{нч}(j\omega) \cdot K_{н.т}, \quad (29)$$

$$W_{к.з}(j\omega) = \frac{Y_i(j\omega)}{K_{н.т} \cdot Y_{вч}(j\omega)}. \quad (30)$$

Выражения (29), (30) позволяют определить требования к частотным свойствам нелинейного преобразователя и стабилизатора тока при известных АДЧХ $Y_i(j\omega)$, $Y_{н.ч}(j\omega)$, $Y_{в.ч}(j\omega)$ и коэффициенте $K_{и.т}$ обратной связи.

Передаточная функция $W_{к.з}(s)$ обобщает динамические характеристики всего канала усиления стабилизатора. Выделяя в $W_{к.з}(s)$ ПФ последовательного корректирующего устройства $W_{к.з}(s)$ и ПФ усилителя мощности $W_{у.м}(s)$:

$$W_{к.з}(s) = W_{к.у2}(s) \cdot W_{у.м2}(s), \quad (31)$$

найдем ПФ последовательного корректирующего устройства, обеспечивающего устойчивость и требуемый вид АДЧХ имитатора:

$$W_{к.у2}(j\omega) = \frac{Y_i(j\omega)}{K_{и.т} \cdot Y_{в.ч}(j\omega) \cdot W_{у.м}(j\omega)}. \quad (32)$$

Таким образом, предложенный в данной статье частотный метод динамического синтеза имитаторов ПИЭ позволяет существенно улучшить качество имитаторов. Этот метод был применен при создании имитаторов солнечных батарей и термоэмиссионных преобразователей.

Библиографический список

1. Принципы построения и классификация электродинамических имитаторов первичных источников электроэнергии космических аппаратов : отчет по НИР / Сиб. аэрокосмич. акад. ; исполн. : Е. А. Мизрах, В. М. Петунин. Красноярск, 2000. № ГР 01.20.0004922. Инв. № 302.20.0003231

Е. А. Mizrakh

THE FREQUENCY METHOD OF DYNAMIC SYNTHESIS OF PRIMARY POWER SUPPLY SIMULATORS OF SPACECRAFTS

The article deals with the method of synthesis, allowing producing primary power supply simulators of spacecrafts with required dynamic accuracy.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ СЕКЦИЯМИ В ШУНТОВЫХ СЕКЦИОННЫХ СТАБИЛИЗАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассматриваются шунтовые секционные стабилизаторы напряжения с тремя законами управления секциями. Выявлены параметры, существенно влияющие на работу стабилизаторов, которые необходимо учитывать при проектировании и синтезе шунтовых секционных стабилизаторов.

Для космических аппаратов (КА), эксплуатирующихся на геостационарных орбитах, для стабилизации выходного напряжения применяют шунтовые стабилизаторы напряжения (ШСН). Увеличение мощности ШСН до десятков киловатт приводит к увеличению пульсаций выходного напряжения. Одним из способов обеспечения заданного качества выходного напряжения является разбиение одного мощного ключевого элемента (КЭ) на менее мощные секции. Структурная схема такого шунтового секционного стабилизатора напряжения (ШССН) изображена на рис. 1.

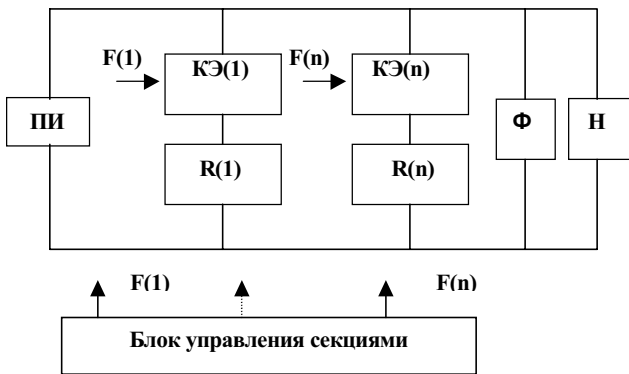


Рис. 1. Структурная схема ШССН

Шунтовый секционный стабилизатор напряжения состоит из первичного источника с нелинейной, падающей вольт-амперной характеристикой, N секций, включающих КЭ и балластное сопротивление R , емкостный фильтр Φ и активно-емкостную нагрузку H . Стабилизация напряжения осуществляется с помощью коммутации балластных сопротивлений $R(1) \dots R(n)$ ключевыми элементами $КЭ(1) \dots КЭ(n)$. Законы управления секциями могут быть различными, но хотя бы одна секция должна управляться по закону широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для решения задачи синтеза систем электропитания (СЭП), построенных на основе ШССН, необходимо не только выбрать оптимальные закон управления секциями и параметры ШССН, обеспечивающие заданное качество выходного напряжения, но и выявить и учесть особенности каждого закона управления, существенно влияющие на работоспособность ШССН в целом. В настоящее время используются три вида ШССН: многофазный (МШССН), импульсно-дискретный (ИДШССН) и импульсно-дискретный управляемый избытком тока (ИДШССНУИТ).

При многофазном регулировании преобразуемая мощность распределяется между N равных секций. Все секции управляются по закону ШИМ, но управляющий сигнал каждой следующей секции сдвинут по фазе на ве-

личину $T_3 = T/N$, где T – период преобразования стабилизатора, а скважности секций равны $\gamma = T_{\text{вкл}}/T$, где $T_{\text{вкл}}$ – время замкнутого состояния КЭ. Равномерный сдвиг по фазе управляющего сигнала равносителен увеличению частоты напряжения на входе фильтра в N раз. Следовательно, величина емкости фильтра существенно уменьшается.

Исследования, проведенные с помощью системы схемотехнического моделирования OrCAD 9.2, показали, что многофазный ШССН обеспечивает достаточно хорошее качество выходного напряжения в диапазоне мощностей от единиц до десяти киловатт. Исследования проводились при условии, что параметры МШССН соответствуют теоретическим, в частности дискретности временных задержек переключения секций и скважности в этом случае равны для всех секций. Но на практике отклонения этих величин от расчетных существуют, и они приводят к неравномерной нагрузке секций и появлению пульсаций на частоте первой гармоники.

Для оценки влияния этих отклонений был проведен гармонический анализ процессов в МШССН. Спектральный состав напряжения на входе фильтра для МШССН найдем по условию:

$$U_c \cdot \gamma = \text{const}, \quad (1)$$

где U_c – напряжение стабилизации; γ – скважность секции.

Амплитуду гармоник напряжения на входе фильтра для разного числа секций определим как

$$A(N, K) = \sqrt{(a_k^2 + b_k^2)}, \quad (2)$$

где N – количество секций; K – номер гармоники; $A(N, K)$ – суммарная амплитуда K -й гармоники N -й секции;

$a_k = \sum_{i=1}^N a(i, k)$, $b_k = \sum_{i=1}^N b(i, k)$ – суммарные составляющие амплитуд k -й гармоники.

Составляющие амплитуд k -й гармоники i -й секции определим по разложению напряжения на входе фильтра в ряд Фурье:

$$\begin{aligned} a(i, k) &= \frac{A_i}{k} \sin(k \cdot \gamma(i) \cdot \pi) \cos\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot T_3(i)}{T}\right), \\ b(i, k) &= \frac{A_i}{k} \sin(k \cdot \gamma(i) \cdot \pi) * \sin\left(\frac{2\pi \cdot k \cdot T_3(i)}{T}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $A_i = \frac{A}{N}$ – амплитуда напряжения в i -й секции; A – суммарная амплитуда напряжения в секциях; $\gamma(i)$ – скважность i -й секции; $T_3(i)$ – время задержки переключения i -й секции; T – период частоты преобразования стабилизатора. Для исследования влияния отклонений скважности и времени задержки на переключение на амплитуду первой гармоники представим их в виде

$$\gamma(i) = \gamma(i) \pm \Delta\gamma(i), T_3(i) = (i-1)T / N \pm \Delta T_3(i),$$

где $\Delta T_3(i)$ и $\Delta\gamma(i)$ – отклонения времени задержки и скажности от расчетных.

По выражениям (2) и (3) был составлен алгоритм и программа расчета и статистической обработки результатов анализа амплитуд гармоник МШССН. Исследования показали, что амплитуда гармоник не зависит от порядка распределения отклонений между секциями. Поэтому сочетания, имеющие одинаковые наборы отклонений, учитываются только один раз. Результаты исследований влияния отклонений от номинальных величин скажности на $\pm 10\%$ на максимальные амплитуды первой гармоники представлены на рис. 2. Величина амплитуд первой гармоники при таких отклонениях достигает 0,055...0,068 относительно суммарного напряжения секций, при этом меньшие значения амплитуд соответствуют меньшему количеству секций. Отклонение величин задержек на переключение секций на $\pm 10\%$ приводит к появлению колебаний на частоте первой гармоники с амплитудой 0,068...0,016 относительно суммарного напряжения секций, причем меньшие значения амплитуд соответствуют большему количеству секций (рис. 3). Одновременное отклонение скажности и задержек на переключение секций на $\pm 10\%$ приводит к появлению колебаний на частоте первой гармоники с амплитудой 0,068...0,160 относительно суммарного напряжения секций.

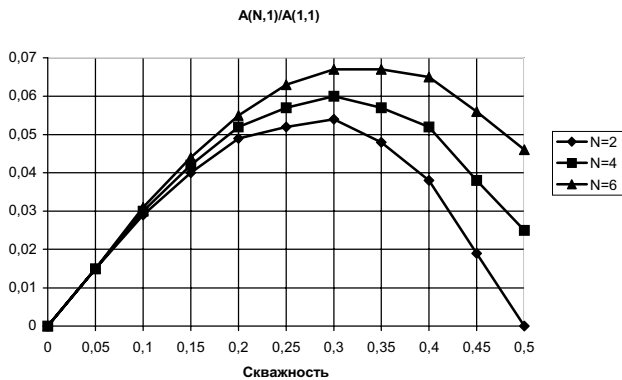


Рис. 2
A(N,1)/A(1,1)

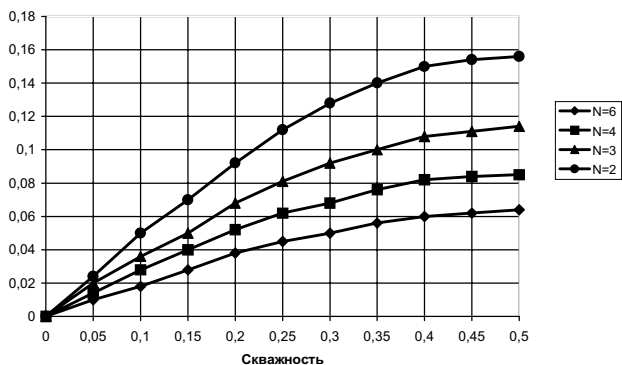


Рис. 3

При импульсно-дискретном способе управления первая секция регулируется по закону ШИМ ($F(1)$), осуществляя стабилизацию выходного напряжения. Остальные N дополнительных секций управляются дискретно в зависимости от мощности коммутируемой нагрузки. При

отключении нагрузки дополнительные секции подключаются последовательно одна за другой до достижения мощностью регулируемой секции максимального значения $P_{\max}$. При подключении нагрузки секции отключаются последовательно, начиная с последней подключенной секции, вплоть до достижения мощностью регулируемой секции минимального значения $P_{\min}$. Мощность регулируемой секции пропорциональна скажности γ . Для исключения ложных коммутаций дополнительных секций во время переходных процессов условия переключения этих секций должны выполняться в течение определенного времени. Это равносильно введению времени задержки на коммутацию дополнительных секций T_3 .

Результаты математического моделирования ШССН показывают, что параметры секций существенно влияют на показатели качества выходного напряжения, а неправильный выбор параметров может привести к автоколебательному режиму работы. В связи с этим актуальна разработка методики выбора параметров секций, обеспечивающая отсутствие автоколебаний в установившемся и переходном режиме работы ШССН. Автором были рассмотрены следующие параметры секций: $P_{\text{рег}}$ – мощность секции, регулируемой ШИМ; $P_c(n)$ – мощность n -й дополнительной секции; $\gamma_{\max}$, $\gamma_{\min}$ – скажности регулируемой секции, при которых происходит подключение и отключение дополнительной секции; γ – скажность регулируемой секции в установившемся режиме; T_3 – время задержки. Мощность нагрузки P_n , источника $P_{\text{ист}}$ и потерь $P_{\text{пот}}$ в ШССН считаются заданными.

Для установившегося режима условие отсутствия автоколебаний можно определить, если выбрать мощность нагрузки такой, при которой происходит подключение очередной дополнительной секции:

$$P_n = P_{\text{ист}} - \sum P_c(n) - P_{\text{рег}} \cdot \gamma_{\max} - P_{\text{пот}}. \quad (4)$$

Поскольку $\gamma = \gamma_{\max}$, то произойдет подключение очередной секции и в новом установившемся состоянии выражение для мощности примет вид

$$P_n = P_{\text{ист}} - \sum P_c(n) - P_{\text{рег}} \cdot \gamma - P_c(n+1) - P_{\text{пот}}, \quad (5)$$

где $\sum P_c(n)$ – мощность всех включенных дополнительных секций.

Если $\gamma > \gamma_{\min}$, то новое состояние устойчиво. В противном случае ШССН будет работать в автоколебательном режиме. Приравняв правые части уравнений (4) и (5), получим выражение для текущего значения скажности:

$$\gamma = \gamma_{\max} - P_c(n+1) / P_{\text{рег}}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в неравенство и делая необходимые преобразования, найдем необходимые условия отсутствия автоколебаний в установившемся режиме:

$$(\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) \cdot P_{\text{рег}} > P_c(n+1). \quad (7)$$

Обозначая $\gamma_{\max} - \gamma_{\min} = K_n$ и учитывая, что мощности дополнительных секций равны между собой ($P_c(n+1) = P_c(n) = P_c$), преобразуем (7) к виду

$$K_n \cdot P_{\text{рег}} > P_c. \quad (8)$$

Коэффициент K_n показывает диапазон использования мощности регулируемой секции, поэтому желательно, чтобы $K_n = 1$. По условиям физической реализации (разброс параметров элементов, точность измерения управляющих параметров и др.) реальное значение K_n не превышает 0,9.

В переходном режиме автоколебания устраняются выбором достаточного времени задержки на коммутацию дополнительных секций T_3 . Время задержки увеличивает время регулирования ШССН и зависит не только от параметров секций ($K_n, P_{\text{рег}}, P_c$), но и от применяемого ШИМ, параметров фильтра F и нагрузки. Для определения минимального значения T_3 , при котором отсутствуют автоколебания, с помощью моделирования на ЦВМ получено семейство зависимостей вида

$$T_3 = F(P_{\text{рег}}, K_c, C_\phi, C_n, P_{\text{ист}}), \quad (9)$$

где $K_c = P_{\text{рег}} / P_c$; C_ϕ – емкость конденсатора фильтра; C_n – емкость конденсатора нагрузки.

Получены зависимости (9) для следующих диапазонов изменения параметров: $K_c - 1,1 \dots 1,4$; $C_\phi - 1 \cdot 10^{-2} \dots 6 \cdot 10^{-2}$ Ф; $C_n - (0,05 \dots 0,15) \cdot C_\phi$; $P_{\text{ист}} - 5 \dots 15$ кВт; $P_{\text{рег}}$ выбирается в зависимости от значений K_c и $P_{\text{ист}}$. Величина мощности активной составляющей нагрузки выбрана по условию получения наихудшего случая и равна $K_n \cdot P_{\text{рег}}$.

Анализ зависимостей (9) показывает, что для ШИМ, реализующего астатический закон регулирования, время задержки лежит в пределах $10 \dots 15$ периодов частоты преобразования, а для ШИМ, реализующего статический закон регулирования, это время находится в пределах $5 \dots 7$ периодов частоты преобразования ШССН. Причем меньшие значения T_3 соответствуют меньшему значению емкости конденсатора фильтра и соотношению мощностей регулируемой и дополнительной секций $K_c = 1,2$.

В результате проведенных исследований получено выражение (8) и зависимости (9), позволяющие выбрать параметры секций ШССН, которые обеспечивают отсутствие автоколебаний.

У импульсно-дискретного управляемого избытком тока ШССН первая секция регулируется по закону ШИМ, осуществляя стабилизацию выходного напряжения. Ко-

личество секций, необходимых для коммутирования определяется как

$$N = (I_{\text{ист}} - I_{\text{рег}} - I_n) / I_{\text{сек}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{ист}}$ – ток первичного источника; $I_{\text{рег}}$ – максимально возможный ток секции регулируемой ШИМ; I_n – ток нагрузки; $I_{\text{сек}}$ – максимальный ток дополнительной секции в установившемся режиме.

В установившемся режиме структуры ИДШССН и ИДШССНУИТ аналогичны. Поэтому для последнего справедливы выводы о необходимых условиях отсутствия автоколебаний в установившемся режиме, сделанные для ИДШССН. Выражение (10) однозначно определяет количество секций, необходимых для подключения в установившемся режиме. Поэтому величина задержки на коммутацию секций выбирается исходя из возможности измерения токов. Исследования показывают, что она составляет $1 \dots 2$ периода преобразования стабилизатора.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- отклонение величин скважности и задержек на переключение секций при многофазном регулировании на $\pm 10\%$ от номинального приводит к увеличению пульсаций выходного напряжения в $10 \dots 20$ раз. Поэтому необходимо принять специальные меры для исключения таких отклонений или рассчитывать фильтр на колебания с частотой первой гармоники и амплитудой $0,1 \dots 0,16$ относительно суммарного тока секций;

- необходимым условием отсутствия автоколебаний в установившемся режиме при импульсно-дискретном законе управления является $K_c > 1,1$, а достаточным – то, что величина задержки должна быть больше $5 \dots 7$ периодов преобразования стабилизатора для статического регулирования и $10 \dots 15$ для астатического.

A. N. Lovchikov, V. A. Sarychev

THE FEATURES OF APPLICATION OF VARIOUS LAWS OF MANAGEMENT SECTION IN SHUNT SECTION VOLTAGE STABILIZERS

In clause are considered shunt section voltage stabilizers with three laws of management section. The parameters essentially influencing for work of stabilizers which are necessary for considering at designing and synthesis shunt section stabilizers are revealed.

А. Б. Базилевский, М. В. Лукьяненко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Рассмотрены вопросы математического моделирования характеристик солнечной батареи в диапазоне освещенностей и температур, соответствующих реальным условиям космического пространства.

Солнечная батарея (СБ) является основным источником электроэнергии для большинства космических аппаратов (КА). Для решения таких задач, как оптимизация схемы СБ, определение оптимальной рабочей точки СБ в условиях меняющейся освещенности и температуры, оценка схемных потерь, определение влияния частичного затенения на выходные характеристики СБ и изменения ее мощности из-за воздействия на нее частиц высоких энергий, расчет и моделирование системы электропитания (СЭС) КА, анализ и прогнозирование работы СЭС, необходимо моделирование вольт-амперной характеристики (ВАХ) СБ [1]. Моделирование ВАХ СБ выполняется на основе моделирования ВАХ солнечного элемента (СЭ). При этом необходимо располагать следующими математическими моделями:

- исходной моделью СЭ, описывающей соответствующие характеристики элементов, не подвергавшихся воздействию факторов космического пространства;
- ресурсной моделью, описывающей относительные изменения характеристик СЭ под действием этих факторов.

Теоретическая (физическая) модель СЭ, исходящая из схемы замещения, представляет интерес в основном только для разработчиков СБ. Эта модель описывается уравнением

$$I_n = I_\phi - I_{o,n} \left\{ \exp \left[\frac{e(U + I_n R_n)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U}{R_{ш}}, \quad (1)$$

где I_n – ток нагрузки; I_ϕ – фототок, или ток короткого замыкания СЭ; $I_{o,n}$ – обратный ток насыщения; e – заряд электрона; U – напряжение на СЭ; R_n – последовательное сопротивление (сопротивление толщи полупроводника и контактной сетки); k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура СЭ; $R_{ш}$ – индуктирующее сопротивление; A – коэффициент, полученный при сравнении теоретической и экспериментальной кривых.

Эквивалентная схема замещения (рис. 1) с сосредоточенными параметрами – очевидно, является лишь более или менее хорошим приближением к реальному СЭ.

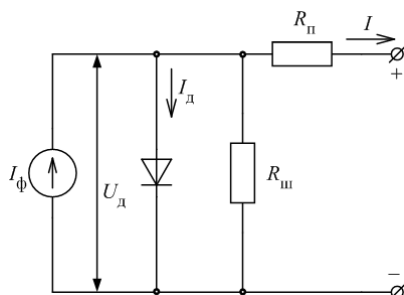


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента

Удовлетворительная точность модели (1) может быть получена при условии, что $I_n R_n \leq 10\%$, однако и в этом случае наблюдаются систематические отклонения теоретической кривой от экспериментальной, являющиеся следствием переменных величин плотностей токов и градиентов напряжения.

Одной из задач, стоящих перед разработчиками СЭ, является задача обеспечения оптимальной геометрии, т. е. такой геометрии, при которой удельные характеристики СЭ, Вт / м², достигают максимума (рис. 2).

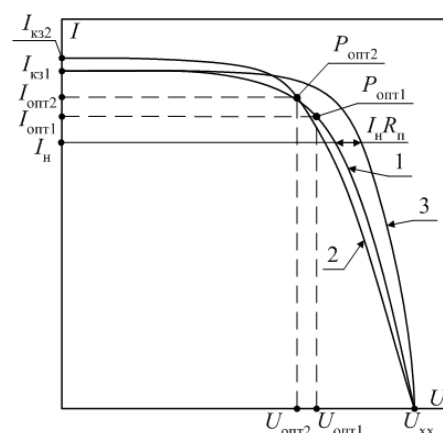


Рис. 2. Влияние геометрии контактной сетки на форму ВАХ СЭ

Следует отметить, что из дополнительных параметров, входящих в (1), существенное влияние на форму ВАХ СЭ оказывает $R_{ш}$ [2]. Поскольку СЭ изготавливают из полупроводников более низкого качества по сравнению, например, с теми, что используются для микросхем, количество дефектов в $p-n$ -переходе большой площади существенно больше, а плотность тока меньше, чем в полупроводниковых приборах. Попытка уменьшить влияние $R_{ш}$, используя для изготовления СЭ более высококачественные материалы, считается экономически нецелесообразной, так как работа в условиях облучения СБ потоками частиц высоких энергий быстро сводит к нулю затраты, связанные с повышением качества исходного полупроводника.

В настоящее время не существует ни одной модели, точно описывающей существующие СЭ во всех диапазонах изменения температуры, интенсивности освещения и степени радиационного повреждения. Попытка уточнения аналитического описания ВАХ СЭ при переходе от модели с сосредоточенными параметрами к модели с распределенными параметрами оказалась малоэффективной, поскольку возросшая громоздкость выражений не окупилась достигнутой точностью по причине зависимости параметров $I_{o,n}$, R_n , A от указанных факторов,

причем эти параметры очень трудно измерить во всех представляющих интерес диапазонах.

Аналитическую форму описания ВАХ СБ, обеспечивающую достаточную точность в широком диапазоне значимых факторов, оказалось возможным получить также с помощью формализованного выражения, удовлетворяющего ряду требований, всегда имеющих место для специфически нелинейных кривых подобного вида. В этой связи прежде всего встает вопрос о выборе вида аппроксимирующей функции, которая должна давать наилучшее приближение к экспериментальным данным, являющихся критериями. Этому требованию удовлетворяет экспоненциальная функция, поскольку СБ как полупроводниковый прибор описывается экспонентой [3].

Для удобства использования и наглядности выбрана характеристическая форма, т. е. такая форма записи, в которой вся кривая описывается по трем вполне определенным точкам ВАХ СБ: напряжению холостого хода, току короткого замыкания, точке максимальной мощности. Максимальная мощность характеризуется параметрами i, j , которые описываются простыми соотношениями:

$$i = \frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{к.з}}}, \quad j = \frac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{х.х}}}, \quad \text{где } I_{\text{опт}}, U_{\text{опт}} - \text{ток и напряжение в оптимальной точке (точке максимальной мощности);}$$

$$U_{\text{х.х}} - \text{напряжение холостого хода; } I_{\text{к.з}} - \text{ток короткого замыкания.}$$

Экспоненциальную модель СБ можно записать в общем виде как

$$I = I_{\text{к.з}} \left[1 - e^{f(U)} \right], \quad (2)$$

где $f(U)$ – функция текущего напряжения и параметров характеристической ВАХ

$$f(U) = \frac{(U - U_{\text{х.х}}) \ln(1-i)}{U_{\text{х.х}} (j-1)}. \quad (3)$$

Анализ сходимости экспериментальных значений и данных, полученных по выражению (2), показал, что здесь имеют место систематические отклонения, которые сохраняются во всем диапазоне температур и освещенностей. При этом было установлено, что между указанными выражениями и теоретической моделью (1) таких отклонений не наблюдается. Данная особенность позволила сделать заключение, что эти результаты получены по условию прохождения формализованной кривой через характеристические точки теоретической модели (рис. 3).

Систематические отклонения подтверждают непредставимость СЭ схемой с сосредоточенными параметрами. С целью повышения точности описания ВАХ формализованным выражением (2) было введено условие, которому всегда удовлетворяет точка наибольшей мощности:

$$\left. \frac{dP}{dU} \right|_{U=U_{\text{опт}}} = 0.$$

Функция $f(U)$ описывается следующим выражением:

$$f(U) = \left\{ \left[\frac{i}{1-i} - \frac{\ln(1-i)}{\ln j} \right] \left(\frac{U}{U_{\text{х.х}} j} - 1 \right) + \ln(1-i) \right\} \frac{\ln \left(\frac{U}{U_{\text{х.х}}} \right)}{\ln j}. \quad (4)$$

Аналитические зависимости $I_{\text{к.з}} = f_1(t, C)$, $I_{\text{опт}} = f_2(t, C)$, $U_{\text{х.х}} = f_3(t, C)$, $U_{\text{опт}} = f_4(t, C)$ получены авторами экспериментальным путем. Для этой цели была разработана и изготовлена установка для исследования фрагментов СБ.

Зависимости для кремниевых СЭ 11-й группы ($P_{\text{уд}} \approx 120$ Вт/м²) приведены на рис. 4, 5, 6, 7, где введены следующие обозначения: 0,2 – 200 Вт/м²; 0,4 – 400 Вт/м²; 0,6 – 600 Вт/м²; 0,8 – 800 Вт/м²; 1,0 – 1 000 Вт/м²; 1,2 – 1 200 Вт/м²; 1,4 – 1 400 Вт/м².



Рис. 3. Семейство ВАХ для кремниевой СБ: 1 – кривые для освещенности, равной $C = 1360$ Вт/м² (одна солнечная постоянная); 2 – кривые для освещенности $2/3 C$; 3 – кривые для освещенности $1/3 C$

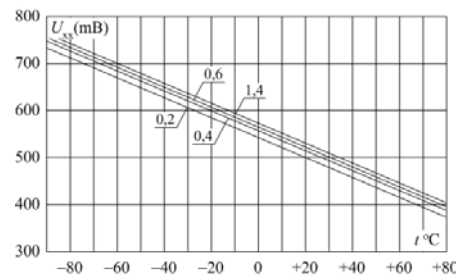


Рис. 4. Зависимости напряжения холостого хода $U_{\text{х.х}}$ кремниевых СЭ от температуры и освещенности

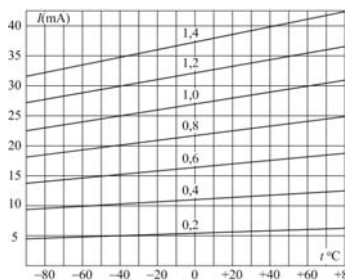


Рис. 5. Зависимости тока короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$ кремниевых СЭ от температуры и освещенности

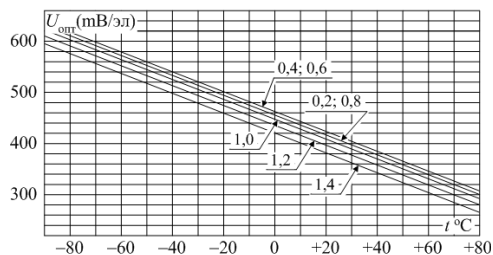


Рис. 6. Зависимости напряжения в точке наибольшей мощности $U_{\text{опт}}$ для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

Экспериментальным путем также были получены зависимости относительного оптимального тока i и оптимального напряжения для кремниевых СЭ от температуры и освещенности (рис. 8, 9).

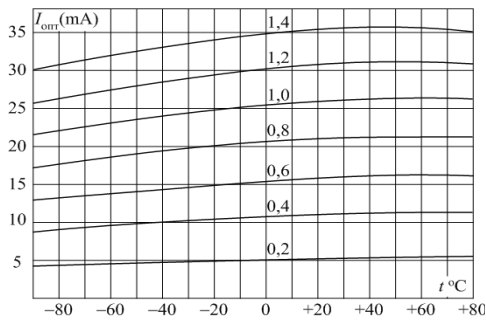


Рис. 7. Зависимости тока в точке наибольшей мощности $I_{\text{опт}}$ для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

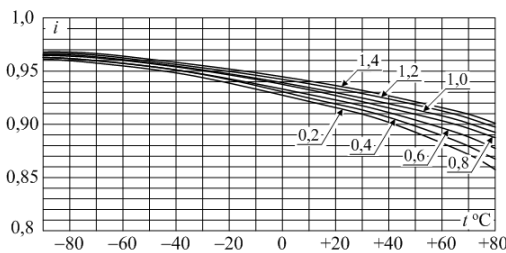


Рис. 8. Зависимости относительного оптимального тока i для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

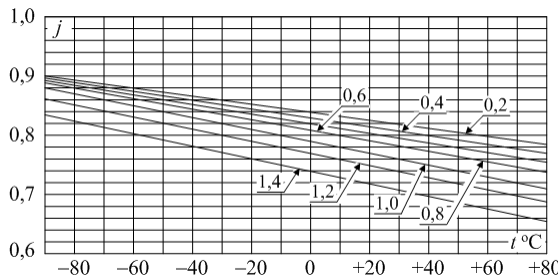


Рис. 9. Зависимости относительного оптимального напряжения j для кремниевых СЭ от температуры и освещенности

На основании полученных экспериментальных зависимостей был выбран следующий вид аппроксимирующих функций:

$$\begin{aligned} U_{\text{х.х}} &= (A_1 C + A_2 - A_3 t) N_{\text{пос}}, \\ I_{\text{к.з}} &= \frac{C \cdot S \cdot P_{\text{уд}} (1 + A_5 t)}{A_4 \cdot N_{\text{пос}}}, \\ j &= A_6 - C (A_7 + A_8 t) - A_9 t, \\ i &= A_{10} - C \cdot A_{11} e^{A_{12} t} - A_{13} t, \end{aligned}$$

где $A_1 \dots A_{13}$ – эмпирические безразмерные коэффициенты аппроксимации; $N_{\text{пос}}$ – количество СЭ в СБ, соединенных последовательно; $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность СБ; S – площадь СБ.

При описании ВАХ СБ по параметрам i и j характеристической кривой теряется наглядность зависимости коэффициента прямоугольности от распределенного последовательного сопротивления схемы замещения. Поскольку величину $R_{\text{н}}$ оптимизируют с целью получения

наибольшей мощности с единицы площади (см. рис. 2) и диапазон изменения i и j сравнительно невелик, то для эмпирических коэффициентов, зависящих от $R_{\text{н}}$, определены границы варьирования. Значения коэффициентов аппроксимации следующие: $A_1 = 2,734 \cdot 10^{-5}$, $A_2 = 0,5447$, $A_3 = 2,045 \cdot 10^{-3}$, $A_4 = 424,8$, $A_5 = 1,763 \cdot 10^{-3}$, $A_6 = 8,14 \cdot 10^{-1}$, $A_7 = 8,84 \cdot 10^{-1}$, $A_8 = 6,59 \cdot 10^{-4}$, $A_9 = 10,54 \cdot 10^{-4}$, $A_{10} = 2,246 \cdot 10^{-7}$, $A_{11} = 2,884 \cdot 10^{-7}$, $A_{12} = 6,362 \cdot 10^{-4}$, $A_{13} = 7,092 \cdot 10^{-4}$, $A_{14} = 0,937$, $A_{15} = 7,142 \cdot 10^{-6}$, $A_{16} = 2,05 \cdot 10^{-2}$, $A_{17} = 3,21 \cdot 10^{-4}$, $A_{18} = 3,75 \cdot 10^{-4}$.

Приведенные выше выражения, описывающие семейство ВАХ, являются формализованной моделью СБ. Если на практике использовать эту модель непосредственно (при указанных значениях коэффициентов аппроксимации), то, поскольку СЭ подвержены ресурсной деградации, через некоторое время эксплуатации в условиях космического пространства будет иметь место дефицит энергии СБ и энергобаланс в системе «СЭС – нагрузка» выполняться не будет. Следовательно, начальные параметры СБ нужно выбирать с некоторым запасом, обеспечивающим требуемую энергоотдачу СБ на конец срока активного существования КА. Выбор начальных значений параметров СБ можно также осуществить на основе некоторой формализованной модели, однако это целесообразно делать исходя именно из теоретической модели, поскольку ресурсным изменениям подвержены реальные компоненты схемы замещения. Установление взаимнооднозначного соответствия между теоретической и формализованной моделями, т. е. их идентификация, позволяет полностью выразить ресурсный спад характеристик по параметрам схемы замещения. Следует отметить, что некоторые параметры, входящие в теоретическую модель, не поддаются непосредственному измерению и могут быть определены лишь косвенно. Идентификация моделей позволяет объяснить механизм явления и определить значимость отдельных факторов, а также уменьшить громоздкость выражений и упростить расчет [4].

Наиболее точной моделью, применяемой для инженерных расчетов, является выражение (1). В связи с тем что обычно $R_{\text{ш}}$ велико ($5 \dots 10$ кОм/см²) и $I_{\text{о.н}} \ll I_{\text{ф}}$, выражение (1) без ущерба для точности можно упростить:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{ф}} - I_{\text{о.н}} \cdot \exp \left[\frac{e(U + I_{\text{н}} R_{\text{н}})}{AkT} \right]. \quad (5)$$

Для полученных зависимостей $I_{\text{ф}}$, $I_{\text{о.н}}$, $R_{\text{н}}$ и A как функций температуры T и освещенности C принимаем $K_1 U_{\text{х.х}} = \frac{AkT}{e}$, $K_2 I_{\text{к.з}} = I_{\text{о.н}}$, $I_{\text{ф}} = I_{\text{к.з}}$, тогда

$$I_{\text{н}} = I_{\text{к.з}} \left[1 - K_2 \exp \left(\frac{U - I_{\text{н}} R_{\text{н}}}{K_1 U_{\text{х.х}}} \right) \right]. \quad (6)$$

На экспериментально полученной ВАХ СЭ наибольший интерес представляют характеристические точки $I_{\text{к.з}}$, $U_{\text{х.х}}$, $P_{\text{опт}}$ и их изменения при различных температурах и освещенностях. Произведя замену переменных $i_{\text{н}} = \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{к.з}}}$, $V = \frac{U}{U_{\text{х.х}}}$, $r = \frac{R_{\text{н}} I_{\text{к.з}}}{U_{\text{х.х}}}$, получим:

$$i_{\text{н}} = 1 - K_2 \cdot \exp \left(\frac{V + i_{\text{н}} r}{K_1} \right). \quad (7)$$

В выражении (7) необходимо описать параметры r , K_1 , K_2 по относительным координатам точки максимальной

ной мощности i и j , причем должны выполняться следующие условия:

- 1) $I_{\text{н}} = I_{\text{к.з}}$ при $U = 0$ или $V = 0$ при $i_{\text{н}} = 1$;
- 2) $I_{\text{н}} = 0$ при $U = U_{\text{х.х}}$ или $i_{\text{н}} = 0$ при $V = 1$;
- 3) $I_{\text{н}} = I_{\text{опт}}$ при $U = U_{\text{опт}}$ или $i_{\text{н}} = i$ при $V = j$;
- 4) $\frac{dP}{dU} = 0$ при $U = U_{\text{опт}}$ или $\frac{dV}{di_{\text{н}}} = \frac{j}{i}$ при $i_{\text{н}} = j$.

Для выполнения условия 1 необходимо, чтобы $K_2 \cdot e^{r/K_1} \ll 1$. Опыт показывает, что те значения K_1 , K_2 и r , которые получаются по условиям 2, 3 и 4, удовлетворяют автоматическому выполнению условия 1 с достаточной точностью (в пределах 1 %).

Подставляя в (7) $V = 1$, $i_{\text{н}} = 0$, по условию 2 получим

$$K_2 = \exp\left(-\frac{1}{K_1}\right). \quad (8)$$

По условию 3 $i_{\text{н}} = I$, $V = j$ и, подставляя выражение для $U_{\text{х.х}}$ в (4), имеем

$$i = 1 - \exp\left(\frac{j + ir - 1}{K_1}\right), \quad (9)$$

откуда

$$r = \frac{K_1 \cdot \ln(1-i) + 1 - j}{i}. \quad (10)$$

Для определения значения по выражению (10) в оптимальной точке выразим V как функцию от $i_{\text{н}}$:

$$V = 1 + K_1 \cdot \ln(1 - i_{\text{н}}) - i_{\text{н}} \cdot r. \quad (11)$$

Выражение (11) про дифференцируем:

$$\frac{dV}{di_{\text{н}}} = -\left(r + \frac{K_1}{1 - i_{\text{н}}}\right). \quad (12)$$

С учетом условия 4 имеем

$$r = \frac{j}{i} - \frac{K_1}{1 - i}. \quad (13)$$

По выражениям (10) и (11) получим

$$K_1 = \frac{2j - 1}{\frac{i}{1-i} + \ln(1-i)}. \quad (14)$$

Используя выражения (8), (13) и (14), по экспериментальным данным можно описать все необходимые для практики зависимости.

Таким образом, идентифицированная теоретическая модель содержит элемент формализации, поскольку реальные СЭ по своей сути являются элементами с распределенными параметрами. Однако для практических расчетов эта модель вполне применима, так как разница в значениях мощности, вычисленной по формализованной и теоретической моделям, не превышает 1,5 % в диапазоне от холостого хода до короткого замыкания. Следовательно, указанная формализация вполне допустима.

Библиографический список

1. Системы электроснабжения космических аппаратов / Б. П. Соустин, В. И. Иванчура, А. И. Чернышев, Ш. Н. Исляев. Новосибирск : ВО «Наука», 1994. 318 с.
2. Исследование статических характеристик фотопреобразователей : отчет по НИР. Красноярск, 1984. 43 с. № ГР 01.83.0004550.
3. Бородина, Н. М. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов и солнечных батарей / Н. М. Бородина, В. А. Летин // Электротехническая промышленность. М., 1986. 64 с.
4. Базилевский, А. Б. Анализ и идентификация моделей солнечной батареи / А. Б. Базилевский, М. В. Лукьяненко // Электрооборудование автономных объектов : сб. науч. тр. / Моск. энерг. ин-т. М., 1987. С. 29–33.

A. B. Basilevsky, M. V. Lukyanenko

THE MODELING OF VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTIC OF SOLAR BATTERIES

This article describes problems of mathematical modeling of characteristic of solar batteries in range of light intensity and temperature which corresponds to real space conditions.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НИКЕЛЬ-ВОДОРОДНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Проведен анализ существующих математических моделей химических источников тока. Предложена методика моделирования никель-водородных аккумуляторов. Разработана энергетическая модель никель-водородных аккумуляторов, применяемых в системах электроснабжения космических аппаратов.

Аккумуляторные батареи (АБ), предназначенные для работы в составе системы электроснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА), должны удовлетворять ряду требований, из которых основными являются высокая надежность, длительный срок службы (не менее 15 лет), высокое значение удельной энергии, малый ресурсный спад удельных характеристик при числе циклов заряд-разряд (до $4 \cdot 10^3$), достаточно широкий интервал рабочих температур ($0 \dots 40^\circ\text{C}$), механическая прочность (стойкость к перегрузкам в сочетании с виброперегрузками, имеющими место на этапе выведения КА на орбиту), возможность работы как при отсутствии силы тяжести, так и при любой пространственной ориентации, минимальный саморазряд, малое внутреннее сопротивление и т. д.

В настоящее время благодаря высокой удельной энергии и большому циклическому ресурсу основное место среди химических источников тока (ХИТ) для космических программ прочно завоевали никель-водородные аккумуляторы (НВА). По сравнению с другими электрохимическими системами эти аккумуляторы имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при их исследовании, эксплуатации и математическом моделировании:

- наличие двух неразделенных активных газов (кислорода и водорода) в общем объеме, что создает при перезаряде и смене полюсов потенциальную возможность инициирования внутри НВА взрывоопасной кислородно-водородной смеси;

- высокая удельная энергия ($55 \dots 60 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{кг}$), которая получается за счет применения разнополярных электродов несоизмеримых толщин. Водородный электрод является лишь местом токообразующей реакции, а не хранителем активной массы – водорода;

- высокая концентрация энергии в малом объеме сопровождается повышенным тепловыделением в единице объема. Повышенная температура существенно снижает ресурс работы НВА, емкость и энергию, отдаваемую на разряде в нагрузку;

- заряженный НВА термодинамически нестабилен, т. е. при хранении в заряженном состоянии емкость теряется за счет саморазряда. Эти потери реализуются в виде дополнительного внутреннего тепловыделения. Величина саморазряда в значительной степени зависит от температуры НВА, нелинейно увеличиваясь при ее повышении. Это свойство НВА мало сказывается при постоянном циклировании аккумулятора, однако оно должно учитываться при перерывах в работе и оценке теплового режима НВА в батарее;

- при заряде НВА в изохронно-изотермических условиях (примерно до 80 % номинальной емкости) наблюдается линейная зависимость между давлением в аккумуляторе и степенью заряженности. Эта уникальная осо-

бенность НВА позволяет непосредственно по тензометрическим показаниям определять текущую степень заряженности аккумулятора;

- тепловыделение НВА и связанные с ним токовые потери на побочные реакции при заряде, потери энергии на заряде и разряде, КПД по емкости и по энергии, степень заряженности и другие характеристики существенно нелинейно зависят от условий циклирования (токов заряда-разряда, температуры, степени заряженности);

- при сообщении НВА полной зарядной емкости давление газа внутри корпуса достигает максимального значения и в процессе дальнейшего заряда (перезаряда) давление стабилизируется. Это свойство НВА, допускающего длительный перезаряд, используется для упрощения схемы контроля степени заряженности, но при этом вся избыточная энергия перезаряда превращается в тепло, т. е. заряд идет с нулевым КПД и температура аккумулятора повышается. Такой режим работы НВА в принципе не является аварийным, но он крайне не желателен.

Математическое моделирование СЭС КА предъявляет повышенные требования к математической модели применяемого в ней химического источника тока в силу особой специфики функционирования КА в космосе. В первую очередь, это автономный режим работы КА на орбите, широкие границы изменений условий функционирования (температуры, разнообразия сеансных расписаний нагрузок, условий охлаждения, режимов полета, параметров орбиты, мощности нагрузки, большого числа циклов и др.), высокие требования к надежности и долговечности КА.

Несмотря на довольно большое количество разработанных математических моделей ХИТ, многие из них имеют ограниченное применение и малоприспособлены для математического описания ХИТ как элементов СЭС КА в связи со следующими условиями:

- они в основном ограничиваются описанием только разрядных характеристик ХИТ, хотя условия заряда оказывают существенное влияние на зарядные характеристики и циклы заряда-разряда необходимо рассматривать как единое целое;

- используется ограниченный экспериментальный материал, когда описываются внешние характеристики ХИТ в функции емкости при нескольких фиксированных значениях температуры (обычно $20 \dots 25^\circ\text{C}$) и токов заряда-разряда, что не позволяет рассчитывать характеристики ХИТ при плавном изменении температуры в процессе циклирования, так как в них исследуются только частные режимы циклирования ХИТ;

- формулы, описывающие зарядно-разрядные характеристики ХИТ различных электрохимических систем, носят полуэмпирический характер, что затрудняет рас-

пространение полученного математического описания на широкую область изменения нескольких рабочих параметров, так как методики определения эмпирических коэффициентов сложны и недостаточно подробно описаны в литературе;

– в этих моделях обычно рассматриваются зависимости электрических и других характеристик от сообщенной или отданной в нагрузку емкости, хотя разработчиков СЭС КА больше интересуют зависимости по энергии, так как при решении задач энергобаланса СЭС КА приходится рассматривать распределение потоков энергии между первичным (солнечной батареей) и вторичным (аккумуляторной батареей) источниками электроэнергии и нагрузкой в соответствии с сеансным расписанием.

Для решения задач, стоящих перед разработчиками СЭС КА, необходима энергетическая модель ХИТ, позволяющая рассчитывать текущее энергетическое состояние источника при циклировании по произвольным частным и предельным циклам при известных условиях конвективного или радиационного теплообмена. Поскольку ХИТ любой электрохимической системы является сложным, существенно нелинейным, многопараметрическим объектом и многие его внешние характеристики взаимосвязаны и взаимозависимы, то необходимо применять комплексный подход к моделированию всех внешних характеристик ХИТ как функции определенного набора параметров. Это может значительно сократить время и затраты на проведение экспериментов и математическое моделирование в целом.

При разработке энергетической модели НВА авторы исходили из того, что для аккумулятора как преобразователя энергии, подводимой к нему на заряде, в энергию активных масс электродного блока и обратно в электроэнергию в процессе разряда (рис. 1), будет выполняться закон сохранения энергии:

$$W_3 - W_{3.т} - W_{р.т} - W_p - W_{ост} = 0, \quad (1)$$

где W_3 – энергия, получаемая от зарядного устройства; $W_{3.т}$ – энергия тепловых потерь на заряде; $W_{р.т}$ – энергия тепловых потерь на разряде; W_p – энергия, отдаваемая в нагрузку; $W_{ост}$ – остаточная энергия.

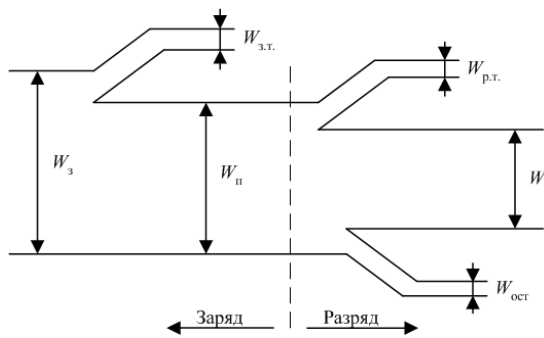


Рис. 1. Распределение потоков энергии в цикле заряд-разряд

Формализованную с точки зрения электрохимии энергетическую модель НВА можно записать в виде системы:

$$\int_0^{Q_3} U_3 dQ - \int_0^{\tau_3} N_{3.т} d\tau = \int_0^{Q_p} U_p dQ + \int_0^{\tau_p} N_{р.т} d\tau + W_{ост}, \quad (2)$$

$$Q_3 = \int_0^{\tau_3} I_3 d\tau, \quad (3)$$

$$Q_p = \int_0^{\tau_p} I_p d\tau, \quad (4)$$

$$W_{ост} = f(T_a, I_p), \quad (5)$$

где U_3 – напряжение на аккумуляторе в процессе заряда; U_p – напряжение на аккумуляторе в процессе разряда; I_3 – ток заряда; I_p – ток разряда; $N_{3.т}$ – мощность тепловых потерь на заряде; $N_{р.т}$ – мощность тепловых потерь на разряде; Q_3 – зарядная емкость; Q_p – разрядная емкость; T_a – температура аккумулятора; τ_3 – время заряда; τ_p – время разряда.

Однако при использовании формализованной эмпирической модели как в процессе эксперимента, так и в дальнейшем, при штатных условиях эксплуатации, измеряется и контролируется одна и та же величина – температура корпуса аккумулятора, поэтому принятое допущение, при котором температура корпуса приравнивается к температуре аккумулятора вообще, остается справедливым лишь для ограниченных условий теплообмена. Под этим следует подразумевать, что теплообмен может осуществляться либо за счет принудительной циркуляции газа-теплоносителя внутри гермоконтейнера КА:

$N_t = mC \frac{dT_a}{d\tau} + F\alpha(T_a - T_0)$, либо при теплообмене только излучением, например при установке аккумуляторной батареи вне гермоконтейнера:

$N_t = mC \frac{dT_a}{d\tau} + \sigma(T_a^4 - T_p^4)$, где N_t – мощность тепловыделения на заряде и разряде; C – удельная теплоемкость аккумулятора; m – масса аккумулятора; T_0 – температура окружающей среды (газа-теплоносителя); α – удельный коэффициент теплоотдачи; F – площадь теплоотдачи; σ – коэффициент лучеиспускания; T_p – равновесная температура аккумулятора (при расположении вне гермоконтейнера).

Энергетическая модель НВА, как всякая эмпирическая модель, справедлива только в тех границах, для которых она составлена, поэтому при проведении экспериментальных исследований указанные границы задавались таким образом, чтобы осуществлялось перекрытие факторного пространства, а сами исследования проводились методом планирования эксперимента.

Во время экспериментов факторам (первичным параметрам, в данном случае току заряда-разряда и температуре) последовательно задавались различные сочетания значений, а получающиеся при этом в установившихся режимах значения выходного параметра (напряжения заряда-разряда и мощности тепловыделения) фиксировались. Поскольку определение функции отклика в общем случае велось при неполном знании механизма явления, а аналитического описания при этом, естественно, не имелось, то пришлось ограничиться представлением функции отклика полиномом третьей степени. Хотя полиномиальная форма не является наилучшей, но по сравнению с моделью, основанной на схеме замещения [1], формализованная энергетическая модель имеет принципиальные преимущества:

– она позволяет осуществлять определение текущего состояния НВА при его работе как по полным, так и по частным циклам;

– выражения, описывающие потери текущей мощности и тепловыделения на заряде и разряде, позволяют ко-

личественно оценить ту часть тепловой нагрузки на систему терморегулирования (СТР) КА, которая приходится на аккумуляторную батарею, что, с учетом ее значительного вклада в общее тепловыделение, дает возможность обоснованно выбрать технические характеристики СТР.

Следует отметить, что моделирование энергетических, а значит, и тепловых процессов, сопровождающих работу АБ при ее циклировании с произвольной глубиной, является важнейшей задачей при разработке СЭС КА [2].

Моделирование текущего состояния НВА сводится к нахождению остаточной энергии $W_{ост}$ при известной потребной энергии разряда W_p , обусловленной нагрузкой, и вычисленной в зависимости от режима работы энергией тепловых потерь на разряде $W_{р.т}$ (см. рис. 1). Это можно сделать в том случае, если известна полезная запасенная в аккумуляторе энергия W_n , которая, в свою очередь, является разностью между энергией, подводимой от зарядного устройства, W_3 и энергией тепловых потерь на заряде $W_{з.т}$. Текущая величина W_n может изменяться в пределах $W_{ост} \leq W_n \leq W_{ппак}$. Максимальная полезная энергия $W_{ппак}$ обусловлена количеством активных масс электродного блока НВА. Следовательно, величина $W_{з.т}$ в пределе может стремиться к W_3 , т. е. после того как исчерпается возможность преобразования энергии в результате физико-химической реакции в активных массах (режим перезаряда), вся подводимая от зарядного устройства энергия будет выделяться в аккумуляторе в виде тепла $W_{з.т}$.

Отмеченные выше предельные режимы работы не имеют места в реальных условиях эксплуатации НВА и приведены здесь исключительно для иллюстрации физических закономерностей при их работе. Так, например, величина W_n ограничена допустимым минимальным на-

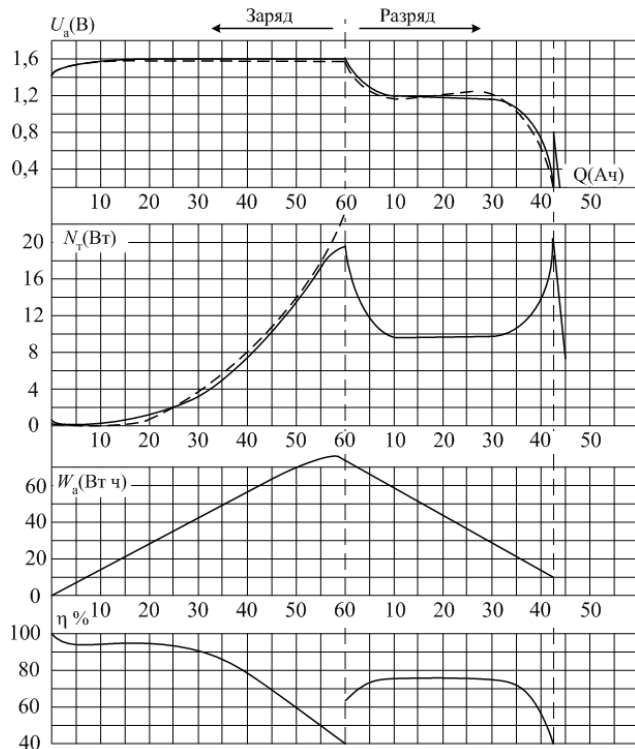


Рис. 2. Зарядно-разрядный цикл: N_t — мощность тепловыделения; W_a — энергия; η — КПД

пряжением на одном аккумуляторе при заряде (0,5...0,6 В). Режим бесконечно большого перезаряда (когда $W_{з.т} \rightarrow W_n$), являясь энергетически неэффективным, может привести к взрыву НВА, так как даже при заряде до номинальной емкости его корпус испытывает избыточное давление порядка 110...120 атм.

Проведенные исследования НВА типа НВ-40 в следующем диапазоне варьирования основных параметров: температура — 0...45 °С, ток заряда — 2...20 А, ток разряда — 4...28 А, зарядная емкость — 0...60 А·ч позволяют определить необходимые зависимости, которые для одного из режимов приведены на рис. 2.

Проведя анализ кривых (см. рис. 2) можно сделать вывод, что значительная величина и существенная нелинейность мощности тепловыделения, оказывающая большое влияние на эффективность эксплуатации НВА в составе СЭС КА, определяют целесообразность применения энергобалансной модели НВА [3].

Поскольку определение эффективности режима заряда при представлении $W_{з.т}$ в абсолютных величинах имеет малую наглядность, на рис. 3 зависимости мощности тепловыделения приведены в относительных единицах N_t / P_3 , где P_3 — мощность на выходе зарядного устройства.

Таким образом, по полученным экспериментальным кривым зарядно-разрядных характеристик можно с помощью численного интегрирования определить значения всех зависимых переменных (рис. 4, 5).

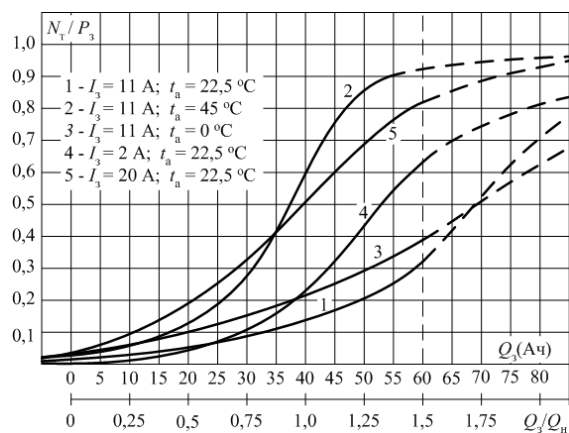


Рис. 3. Влияние режима заряда на эффективность использования энергии

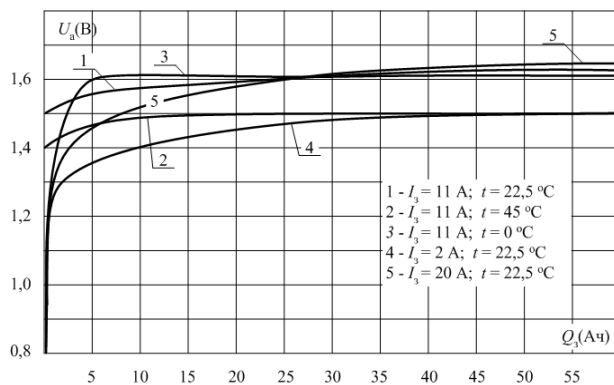


Рис. 4. Семейство зарядных характеристик НВА для некоторых режимов

Полиномиальная математическая модель НВА представляется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} N_{3,т} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2^2 + a_3 x_3^3, \\ a_0 = 1,317\,0 + 0,710\,6x_1 + 0,644\,0x_2 + 0,093\,3x_1x_2 + \\ + 0,326\,9x_1^2 + 0,118\,3x_2^2 - 0,032\,1x_1^3 - 0,032\,4x_2^3, \\ a_1 = 1,359\,8 + 0,446x_1 + 0,595\,7x_2 + 0,053\,1x_1x_2 + \\ + 0,232\,6x_1^2 + 0,107\,7x_2^2 + 0,020\,2x_1^3 - 0,010\,9x_2^3, \\ a_2 = 0,516\,9 - 0,073\,7x_1 + 0,157\,0x_2 + 0,024\,7x_1x_2 - \\ - 0,012\,4x_1^2 + 0,006\,0x_2^2 + 0,013\,9x_1^3 + 0,001\,6x_2^3, \\ a_3 = 0,066\,0 - 0,048\,5x_1 + 0,002\,2x_2 - 0,003\,1x_1x_2 - \\ - 0,022\,1x_1^2 - 0,006\,4x_2^2 + 0,000\,1x_1^3 - 0,000\,9x_2^3, \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_3 = b_0 + b_1 x_3 + b_2 x_3^2 + b_3 x_3^3, \\ b_0 = 1,567\,3 - 0,023\,2x_1 + 0,022\,0x_2 + 0,001\,5x_1x_2 - \\ - 0,002\,5x_1^2 - 0,003\,8x_2^2 + 0,001\,1x_1^3 + 0,000\,3x_2^3, \\ b_1 = 0,017\,6 - 0,007\,3x_1 - 0,007\,0x_2 + 0,001\,9x_1x_2 - \\ - 0,002\,5x_1^2 - 0,000\,1x_2^2 + 0,000\,8x_1^3 + 0,000\,3x_2^3, \\ b_2 = -0,005\,4 + 0,000\,4x_1 - 0,000\,6x_2 + 0,000\,1x_1x_2 + \\ + 0,000\,1x_1^2 - 0,000\,5x_2^2 - 0,000\,1x_1^3, \\ b_3 = 0,000\,3 + 0,000\,4x_1 + 0,000\,3x_2 - 0,000\,2x_1x_2 + \\ + 0,000\,1x_1^2 + 0,000\,2x_2^2 + 0,000\,1x_2^3, \end{cases}$$

где $x_1 = 0,1254(t - 22,5)$; $x_2 = 0,3136(I_p - 11)$; $x_3 = 0,09407(Q_3 - 30)$;

$$\begin{cases} N_{p,т} = c_0 + c_1 x_3 + c_2 x_3^2 + c_3 x_3^3, \\ c_0 = 5,813\,7 - 0,414\,0x_1 + 1,961\,3x_2 - 0,090\,6x_1x_2 + \\ + 0,200\,2x_1^2 + 0,005\,4x_2^2 + 0,040\,9x_1^3 - 0,042\,9x_2^3, \\ c_1 = -0,511\,0 - 0,277\,1x_1 + 0,293\,9x_2 - 0,059\,8x_1x_2 + \\ + 0,124\,9x_1^2 - 0,000\,7x_2^2 + 0,028\,2x_1^3 - 0,042\,5x_2^3, \\ c_2 = 0,212\,3 - 0,012x_1 + 0,055\,6x_2 + 0,003\,0x_1x_2 + \\ + 0,015\,9x_1^2 + 0,003\,1x_2^2 + 0,006\,7x_1^3 + 0,0015\,5x_2^3, \\ c_3 = 0,137\,2 + 0,330x_1 - 0,009\,2x_2 + 0,004\,5x_1x_2 - \\ - 0,006\,3x_1^2 + 0,002\,7x_2^2 - 0,002\,3x_1^3 + 0,006\,1x_2^3, \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_p = (d_1 - d_2 a) \{1 - \exp[d_3 (Q - Q_{pk})]\} + d_4 \exp(-d_5 Q), \\ d_1 = 1,243\,7 + 0,034\,9x_1 - 0,273x_2 + 0,001\,5x_1x_2 - \\ - 0,002\,9x_1^2 + 0,005\,9x_2^2 - 0,000\,9x_1^3 - 0,000\,7x_2^3, \\ d_2 = 0,002\,1 - 0,000\,12x_1 + 0,000\,037x_2 - 0,000\,33x_1x_2 + \\ + 0,000\,59x_1^2 + 0,000\,03x_2^3, \\ d_3 = 0,744\,3 + 0,094\,6x_1 - 0,105\,2x_2 - 0,017\,0x_1x_2 - \\ - 0,014\,7x_1^2 + 0,002\,5x_2^2 - 0,025\,9x_1^3 - 0,003\,9x_2^3, \\ d_4 = 0,228\,2 - 0,040\,1x_1 - 0,003\,0x_2 - 0,003\,2x_1x_2 - \\ - 0,003\,8x_1^2 - 0,003\,6x_2^2 - 0,005\,4x_1^3 + 0,005\,7x_2^3, \\ d_5 = 0,604\,3 + 0,159\,6x_1 - 0,204\,5x_2 - 0,044\,1x_1x_2 + \\ + 0,008\,2x_1^2 - 0,004\,6x_2^2 - 0,020\,4x_1^3 + 0,017\,4x_2^3, \\ Q_{pk} = 40,790\,6 - 0,698\,5x_1 + 0,167\,4x_2 + 0,613\,7x_1x_2 - \\ - 1,360\,2x_1^2 - 0,027\,7x_2^2 - 0,240\,4x_1^3 + 0,128\,4x_2^3, \end{cases}$$

где $x_1 = 0,1254(t - 22,5)$; $x_2 = 0,235(I_p - 16)$; $x_3 = \frac{5,644}{Q_{p,к}}(Q_3 - 30)$.

В систему уравнений входит конечная разрядная емкость $Q_{p,к}$, которая в описываемой серии экспериментов зависит от токовых и температурных режимов циклирования и изменяется от 42,5 до 24,8 А · ч. Поскольку жесткой границы варьирования зарядной емкости установить нельзя, было составлено уравнение регрессии, по которому вычислялось значение конечной разрядной емкости $Q_{p,к} = f(T_a, I_p)$ (рис. 6).

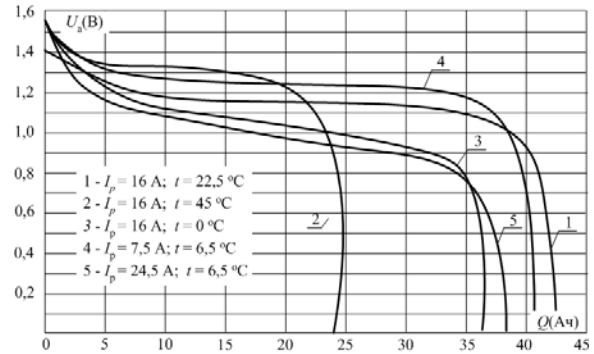


Рис. 5. Семейство разрядных характеристик НВА для некоторых режимов

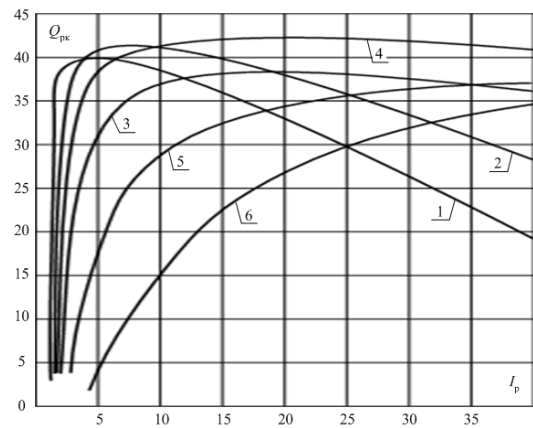


Рис. 6. Зависимость конечной разрядной емкости от температурного и токового режимов: при $t = 0\,^{\circ}\text{C}$ (1); $t = 6,5\,^{\circ}\text{C}$ (2); $t = 14,5\,^{\circ}\text{C}$ (3); $t = 25\,^{\circ}\text{C}$ (4); $t = 38,5\,^{\circ}\text{C}$ (5); $t = 45\,^{\circ}\text{C}$ (6)

Энергетическая циклограмма, поясняющая работу формализованной модели НВА, приведена на рис. 7.

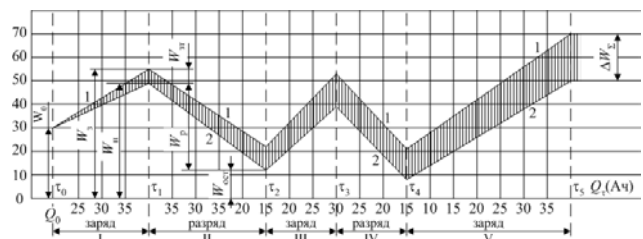


Рис. 7. Зарядно-разрядная энергетическая диаграмма

Таким образом, разработанная энергетическая модель НВА, описывающая параметры его текущего состояния при циклировании по произвольным предельным и частным циклам в условиях конвективного и радиационного теплообмена, позволяет производить расчет энергетического состояния НВА в СЭС КА и определять оптимальные режимы заряда. По результатам моделирова-

ния НВА определены алгоритмы управления зарядным током, максимизирующие КПД заряда, что позволяет дополнительно запасти на 10...15 % больше полезной энергии по сравнению с зарядом постоянным током, также выявлен диапазон температур (от 10 до 30 °С), в котором НВА обладает наилучшими характеристиками.

Библиографический список

1. Романов, В. В. Химические источники тока / В. В. Романов, Ю. М. Хашев. М. : Сов. радио, 1979. 268 с.

2. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин, В. И. Иванчура, А. И. Чернышев, Ш. Н. Исляев. Новосибирск : ВО «Наука», 1994. 318 с.

3. Энергобалансная модель никель-водородной аккумуляторной батареи / А. Н. Морозов, А. Н. Ловчиков, М. В. Лукьяненко, В. С. Кудряшов // Химические источники тока : сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-исслед. авиац. ин-т. Л., 1983. С. 91–94.

M. V. Lukyanenko

THE ENERGY MODEL OF NICKEL-HYDROGEN STORAGE BATTERY

Analysis of existing mathematical models of chemical power sources is performed. Method of modeling of nickel-hydrogen storage battery is proposed. Energy model of nickel-hydrogen storage battery which is used in power systems of spaceships is developed.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНТЕГРАТИВНОЙ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Вопрос о выборе школы и вуза для получения образования зачастую ставит простого потребителя в тупик ввиду отсутствия достаточно объективной информации об образовательном учреждении. Для комплексной оценки эффективности деятельности системы непрерывного образования был разработан синтез-метод.

За последние пятнадцать лет рынок образовательных услуг в России претерпел значительные изменения. Появились новые образовательные программы, учреждения общего образования с углубленным изучением предметов, профильные школы (лицеи, гимназии), частные школы. И вопрос выбора школы и вуза для получения образования зачастую ставит простого потребителя в тупик ввиду отсутствия достаточно объективной информации и возможности провести сравнительный анализ, оценить эффективность деятельности образовательного учреждения. Кроме того, этот вопрос связан с долгосрочным прогнозированием, что вкупе с нестабильностью ситуации в России (реформа образования, низкий уровень жизни, рост безработицы) превращает процесс выбора в тяжелую и для многих практически непосильную задачу.

В России система оценки образования реализуется государством, причем основные усилия прилагаются к проведению внешней оценки образовательного учреждения. Но, к сожалению, для простого потребителя государственная оценка (наличие аккредитации и лицензии) может сказать только о том, что учреждение имеет право заниматься образовательной деятельностью, и не ответить на большинство других интересующих его вопросов. Поэтому возникает необходимость в разработке механизма комплексной оценки образовательных учреждений и систем, учитывающей как интересы государства, так и интересы потребителей.

Оценка качества образования является, по существу, составной частью процесса преподавания и получения знаний, она способствует проведению критического анализа результатов образовательного процесса, основанного на фактических данных.

Все разнообразие систем оценки высшего образования, получившее известность в последние 10...15 лет, с определенной долей условности может быть разделено на два типа:

– система оценки образования (в том числе и высшего) государственными структурами, регулирующими развитие образовательных учреждений, например Министерством образования, Министерством просвещения и т. д. Такие системы оценок часто связаны с правительственным контролем, лицензированием, государственной аккредитацией, распределением государственных финансовых ресурсов и формированием стратегической политики университетов в рамках страны.

– система оценки высшего образования, принятая в тех странах, где органов государственного управления высшим образованием (в европейском смысле) нет. В этом случае, преобладает процесс самооценки высших учебных заведений, профессиональная или обществен-

ная оценка, направленная на внутренний анализ и улучшение деятельности образовательных учреждений.

Основное отличие системы оценки высшего образования первого типа, характерного для европейских стран, от системы второго типа, применяемой в Америке, заключается в широких полномочиях правительства при формулировке целей и определении наиболее важных аспектов оценки, в способах принятия решений. В странах с централизованной системой образования функции оценки, аккредитации осуществляют соответствующие государственные ведомства.

Однако в мире имеются и другие подходы к осуществлению контроля качества образования. По мнению некоторых экспертов, в настоящее время имеет место тенденция к большему развитию и распространению процессов самооценки. И это касается не только стран, заимствующих американский опыт. В последнее время все большую самостоятельность в вопросах контроля качества образования получают университеты Скандинавских стран [2].

Однако наибольшее развитие система самооценки университетов получила в США. Это связано с тем, что источники власти и контроля в образовательной политике в американских университетах иные, нежели в европейских странах. И хотя в 90-е гг. наметилось усиление влияния на университеты со стороны администрации многих американских штатов, особенно в отношении лицензирования частных учебных заведений и образовательных программ, основой оценки и контроля высшего образования в Америке по-прежнему остается саморегуляция.

В основе американской системы самооценки лежат три основных подхода. Во-первых, оценка через аккредитацию учебного заведения по регионам (в США их шесть) специальными организациями, обладающими четко сформулированными стандартами и требованиями к периодичной самооценке и оценке со стороны внешних наблюдателей; во-вторых, аккредитация образовательных программ, организованная профессиональной ассоциацией специалистов; в-третьих, оценка образовательных программ, полностью организованная самим университетом и нацеленная на улучшение его деятельности, на возможность перераспределения ресурсов и образовательных приоритетов. По мнению Г. Р. Келса, системы оценки, организованные самими университетами, – это наиболее прогрессивные формы саморегуляции [1].

Следует отметить, что в США важную роль в процессе аккредитации программ и специальностей высших учебных заведений играют профессиональные общественные ассоциации (ассоциации медиков, юристов, инженеров и т. п.). Считая одной из своих главных задач

поддержание высокого престижа своей профессии и компетенции ее представителей, эти ассоциации очень строго оценивают и сравнивают результаты деятельности высших учебных заведений [2].

В странах с государственной оценкой качества образования можно выделить следующие основные процедуры контроля: лицензирование, оценку (аттестацию) и аккредитацию. Лицензирование и аккредитация проводятся государственными или другими органами на основе заранее установленных критериев, при этом вузы или программы обучения должны удовлетворять определенным базовым требованиям. Оценка (аттестация) может основываться на источниках информации широкого спектра, и к ней могут быть привлечены как местные, так и приглашенные специалисты. В целом же аттестация напоминает аккредитацию и лицензирование с их порогом минимальных требований.

В Российской Федерации изначально сложилась система нескольких отдельных типов оценки, где процедура лицензирования отделена от процедуры аттестации. Однако приказом Министерства образования РФ от 12 ноября 1999 г. № 864, в целях совершенствования процедур оценивания деятельности вузов, был утвержден новый порядок комплексной оценки деятельности высшего учебного заведения, основанный на объединении процедур повторного (очередного) лицензирования, аттестации и государственной аккредитации. Данное решение явилось принципиальным и внесло упорядочение в сферу оценки, которая до последнего времени в РФ была разделена.

Особо следует подчеркнуть, что в нашей стране все три процедуры оценивания осуществляются в рамках федерального органа – Министерства образования и науки.

Рассмотрим далее оценку институциональной эффективности деятельности образовательного учреждения (ОУ). Она предполагает обязательное формулирование миссии, цели и задач этого учреждения, которые преподаватели и сотрудники переносят в образовательные программы. Определение миссии и задач учебного заведения является отправной точкой для выявления его институциональной эффективности. С другой стороны, любая формулировка миссии и цели должна быть трансформирована в форму краткосрочных и долгосрочных планов.

При отсутствии таких планов оценка эффективности образовательного учреждения будет проблематичной.

Отметим, что в американском варианте оценки и аккредитации выстраивается зависимость оценки институциональной эффективности от результатов самообследования. При этом в идеальных условиях образовательное учреждение проводит только самооценку, чтобы проверить соответствие планов, бюджетов и функций, уточнить распределение ресурсов, углубить учебные программы. Систематизация аттестационных показателей позволяет реально сравнивать деятельность и состояние разных учебных заведений.

Анализ зарубежного опыта аккредитации вузов показывает что перечень индикаторов (показателей), определяемых органом аккредитации, содержит, как правило, до 10...16 крупных показателей. Эти индикаторы обычно сформированы в три группы:

- показатели условий осуществления образовательной деятельности (концепция учебного заведения, кадры, образовательные ресурсы, финансовая состоятельность);
- показатели процесса (управление учебным заведением, содержание образовательных программ, социальная инфраструктура, механизм гарантии качества образования и т. д.);
- показатели результата (качество подготовки выпускников, бакалавров, магистров и т. д., уровень их трудоустройства, эффективность научно-исследовательской и научно-методической деятельности).

Чтобы оценить учебное заведение с точки зрения фокус-групп (потребителей системы), необходимо выявить факторы, влияющие на формирование образовательного спроса. Их можно условно подразделить на долгосрочные и краткосрочные (табл. 1).

Для определения эффективности деятельности интегративной системы подготовки специалистов аэрокосмической отрасли, реализуемой в Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени академика М. Ф. Решетнева [3; 4], необходимо провести комплексный анализ образовательной системы.

Используя уже существующие критерии государственной оценки и факторы выбора потребителем учеб-

Таблица 1

**Факторы выбора потребителем
образовательного учреждения**

Долгосрочные факторы (приоритеты)	Краткосрочные факторы (приоритеты на настоящий момент)
Высокий уровень заработной платы в течение последующей жизни	Высокая оценка нерыночных видов деятельности и интересов, которые связаны с получением образования (процесса обучения, общения с друзьями, школьной или студенческой жизни)
Большее удовлетворение от избранной работы в течение жизни (моральные выгоды)	
Достижение более высокого социального статуса	
Широкий доступ к более перспективной, интересной работе	Отсрочка от службы в армии
Представления родителей о будущем детей, что является определяющим фактором в выборе жизненной стратегии вследствие традиционной системы семейного воспитания в России	Коммуникативные качества членов приемной комиссии
Уровень образования и социальный статус родителей, которые влияют на ориентацию своих детей (преемственность поколений, продолжение профессии родителей)	Корпоративная культура, фирменный стиль
Выбор профессии, сделанный друзьями или знакомыми	Территориальная приближенность
Престиж того или иного вида и уровня образования	Наличие в данном учебном заведении друзей (подруг)

ного заведения, сформируем комплексный набор оценочных показателей по следующим группам:

1) показатели условий осуществления образовательной деятельности (концепция учебного заведения, кадры, образовательные ресурсы, финансовая состоятельность);

2) экономические показатели (оплата образовательных услуг, рентабельность, баланс);

3) социально-психологические показатели, связанные с выпускниками ОУ (конкурентоспособность, успешность, успеваемость, научный потенциал, творческий потенциал, уровень поступления в вуз, эффективность научно-исследовательской и научно-методической деятельности);

4) рыночные показатели (уровень трудоустройства, социальный заказ, заработная плата).

Измерение количественных показателей (материальная база, кадровый состав, успеваемость и т. п.), в настоящее время не составляет сложности, поскольку уже накоплен большой опыт в их оценке. Значительно сложнее измерить качественные показатели (успешность, конкурентоспособность, образованность, эффективность), так как в этом случае моменту измерения предшествует процесс перевода качественных показателей в количественные. Использование уже существующих методик (статистическая обработка, метод экспертной оценки) в чистом виде не представляется возможным, поскольку при оценке системы непрерывного образования каждая из методик рассматривает только один аспект деятельности (экономический, социальный, психологический и т. п.).

Для комплексной оценки эффективности деятельности системы непрерывного образования был разработан синтез-метод (рис. 1). При его создании использовались следующие методы:

- метод ранжирования;
- метод экспертной оценки (система оценивается экспертами для по N -балльной шкале, после чего проводится обработка результатов). Он широко используется в экономике при оценке инвестиционных проектов и систем [5];
- метод весовых коэффициентов (эксперты определяют удельный вес каждого критерия, затем проводится суммарная оценка), применяющийся в системном анализе для оценки крупных структур;
- метод категориального сравнения (одинаковые критерии сравниваются, по остальным проводится аналитический анализ), используемый в математической статистике.

Оценим довузовский этап интегративной педагогической системы аэрокосмического образования, реализуемого на базе Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева с использованием предложенного синтез-метода.

1. *Подбор группы экспертов.* Формируется группа экспертов: представители предприятий аэрокосмической отрасли (3 человека), педагоги (3 человека), социологи (1 человек), экономисты (3 человека), инженеры (2 человека), психологи (3 человека), представители родительского комитета (3 человека).

2. *Определение набора факторов первичной оценки системы (базовых факторов).* Его можно разделить на следующие группы:

- организационно-управленческие индикаторы (количество образовательных учреждений в системе, структурная иерархия, межуровневая интеграция и др.);
- материально-технические показатели (количество учебных лабораторий, техническое оснащение лабораторий, обеспечение методической литературой и др.);
- кадровые показатели (количество педагогов, наличие ученой степени, ученого звания, возраст, стаж и др.);
- экономические показатели (оплата за обучение, материальные затраты на подготовку к учебному процессу, заработная плата, рентабельность и др.);
- показатели деятельности учреждения (количество поступающих, отсев, успеваемость, посещаемость, творческая активность, уровень сдачи выпускных экзаменов и др.).

3. *Комплексная первичная оценка.* Осуществляется в следующем порядке:

1) множество предложенных оценочных факторов ранжируется экспертами в зависимости от цели исследования согласно предложенной шкале;

2) выделенный набор оценочных факторов подвергается уточненному ранжированию. Определяются удельные весовые коэффициенты (УВК);

3) проводится количественная оценка системы по выбранным факторам.

Результаты первичной оценки системы представлены в табл. 2.

Проведение комплексной первичной оценки позволило нам проанализировать деятельность системы с точки зрения эффективности управления, организации учебной деятельности. Но для получения полной картины необходимо оценить систему по критериям потребителей (учащихся, родителей, работодателей).

4. *Фокус-оценка.* Фокус-оценка проводилась аналогично комплексной первичной оценке. Вначале были



Рис. 1. Схема синтез-метода

сформированы группы фокус-факторов: факторы отбора кандидатов (интересы заказчика по результатам опроса) и факторы выбора образовательного учреждения (интересы потребителя по результатам опроса). Затем на основании ранжирования и количественного анализа этих факторов представителями фокус-групп (работодателями, учащимися, родителями) проведена оценка образовательной системы с точки зрения их потребностей и ожиданий (табл. 3).

Данные табл. 3 показывают, что фокус-группами был выбран ряд факторов, которые не рассматривались в комплексной первичной оценке. Эти факторы носят неизмеримый характер и в наших условиях могут быть оценены только качественно. По результатам анализа этих факторов даются аналитические рекомендации по коррекции деятельности системы.

5. *Категориальный анализ.* По сформированной группе совпадающих факторов проводится количественный анализ и сравнение результатов комплексной первичной оценки (см. табл. 2) и фокус-оценки (см. табл. 3) по категориям. Значения сравниваемых факторов суммируются по формуле $K = S_1 \cdot \text{УВК}_1 + S_2 \cdot \text{УВК}_2 + \dots + S_n \cdot \text{УВК}_n$, где S_i – среднее значение оценки фактора; УВК_i – удельный весовой коэффициент фактора; K – коэффициент категориального сравнения (табл. 4).

Затем находится $K_{\text{уср}} = K_{\text{п.о.}} / K_{\text{ф.а.}} = 9,41 / 8,84 = 1,07$.

Построим кривую результатов категориального анализа за рассматриваемый период $K = K_{\text{п.о.}} / K_{\text{ф.а.}}$ (рис. 2).

По графику рис. 2 можно видеть, что отношение между коэффициентом первичной оценки и коэффициентом фокусной оценки в рассматриваемый период превышает 1. Это свидетельствует о результативности реализуе-

Таблица 2

Результаты комплексной первичной оценки системы

Фактор	Ранг	Средний балл S	УВК, %
Количество предметов	15	15,4	6
Методическое обеспечение учебного процесса	19	13,8	4
Количество педагогов	10	18,1	9
Наличие ученой степени (звания)	10	15,0	8
Педагогический стаж	15	14,6	10
Количество обучаемых	15	18,3	9
Отсев	17	14,3	12
Количество выпускников	15	18,9	12
Уровень сдачи ЕГЭ	20	13,0	15
Количество поступивших в вуз	20	19,1	15

Таблица 3

Результаты фокус-анализа

Фактор	Ранг	Средний балл (по результатам опроса) S	УВК, %
Количество учащихся	15	16,9	2
Оплата за обучение	18	17,6	14
Уровень подготовки к ЕГЭ	20	12,6	16
Перспектива поступления	20	19,3	20
Уровень компетентности педагогов (составной): ученая степень, звание стаж	15	15,2	10
Наличие документа государственного образца	17	12,0	10
Диапазон предлагаемых знаний (составной): количество предметов методическое обеспечение учебного процесса	15	14,7	10
Отсев	12	13,1	4
Престиж профиля	15	14,6	10
Престиж образовательного учреждения	15	12,8	8

Таблица 4

Средние рейтинговые баллы анализа за период 2001–2005 гг.

Факторы	Перв. оценка	Фокус-оценка
Количество обр. программ	15,50	15,56
Методическое обеспечение учебного процесса	14,06	13,81
Наличие ученой степени (звания)	15,00	15,75
Педагогический стаж	14,63	14,63
Количество учащихся	17,88	16,63
Уровень сдачи ЕГЭ	13,00	12,56
Отсев	14,13	13,06
Коэфф. категориального сравнения	9,41	8,84

мой стратегии развития в рамках интегративной педагогической системы аэрокосмического образования.

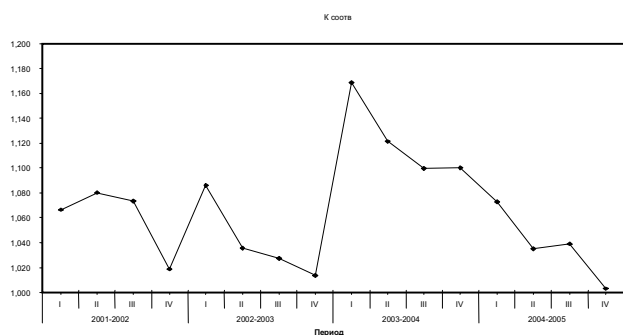


Рис. 2. Результаты категориального анализа за 2001–2005 гг.

6. *Анализ динамики роста.* В качестве примера представим оценку эффективности мероприятий научного характера, реализованных Аэрокосмической школой (АШ) в период 2003–2005 гг. (табл. 5).

Данные табл. 5 позволяют сделать вывод, что реальный прирост намного больше ожидаемого, что говорит об эффективности реализуемых проектов.

Сравнительный анализ количества учащихся, привлекаемых в Аэрокосмическую школу посредством реали-

зации научных проектов, можно представить графически (рис. 3).

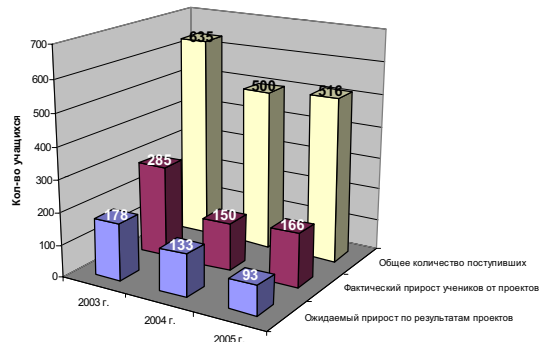


Рис. 3. Динамика привлечения учащихся в АШ за 2003–2005 гг.

Динамика количества учащихся Аэрокосмической школы за рассматриваемый период по следующим индикаторам: общее количество, отсев, количество учащихся, занимающихся НИРС, количество выпускников – приведены на рис. 4 и в табл. 6.

Анализ результатов показывает, что по большей части рассматриваемых критериев среднее значение коэффициента роста больше 0, что говорит о положительной динамике развития образовательной системы. На основе полу-

Таблица 5

Оценка эффективности научно-практической деятельности в Аэрокосмической школе (зависимость набора в АШ от мероприятий научного характера, проводимых АШ)

Годы	Количество поступивших S	«Космотех XXI век» d_1 , %	Краевая выставка d_2 , %	$\Delta = d_1 + d_2$, %	Ожидаемый прирост $S_{ож} = ABS(S_0 \cdot \Delta)$	Фактический прирост $S_{факт} = (S - S_0)$
2003–2004	635	23,2	27,7	50,9	178	285
2004–2005	500	17,3	20,7	38,0	133	150
2005	441 (прогноз)	7,4	19,1	26,5	93	

Примечание. В таблице используются следующие обозначения: S – набор в 8–9-й класс; d_1 – абсолютная эффективность проекта «Космотех XXI век»; d_2 – абсолютная эффективность проекта «Краевая выставка авиа- и ракетомоделизма»; Δ – суммарная эффективность проектов; $S_{ож}$ – расчетный прирост, привлеченных в образовательную систему АШ по итогам реализации проектов, человек; $S_{факт}$ – реальный прирост, привлеченных в образовательную систему АШ по итогам проектов, человек.

Таблица 6

Динамика роста показателей за период 2001–2005 гг.

Факторы	2001–2002	2002–2003	2003–2004	2004–2005	Среднее значение
Количество учащихся	673	795	918	847	
Отсев	118	176	192	184	
Количество учащихся НИРС	186	213	218	227	
Количество выпускников	102	98	92	108	
<i>Коэффициент роста KP_1 (относительно предыдущего периода)</i>					
d Количество учащихся, %	0	18,13	15,47	–7,73	8,62
d Отсев, %	0	49,15	9,09	–4,17	18,03
d Количество учащихся НИРС, %	0	14,52	2,35	4,13	7,00
d Количество выпускников, %	0	–3,92	–6,12	17,39	2,45
<i>Коэффициент роста KP_2 (относительно начального периода)</i>					
Количество учащихся, %	0	18,13	36,40	25,85	26,80
Отсев, %	0	49,15	62,71	55,93	55,93
Количество учащихся НИРС, %	0	14,52	17,20	22,04	17,92
Количество выпускников, %	0	–3,92	–9,80	5,88	–2,61

ченной оценки результатов составляются рекомендации по модернизации образовательной системы, коррекции учебных планов, планов научной и методической работы, вырабатывается результативная стратегия развития системы подготовки кадров для аэрокосмической отрасли.

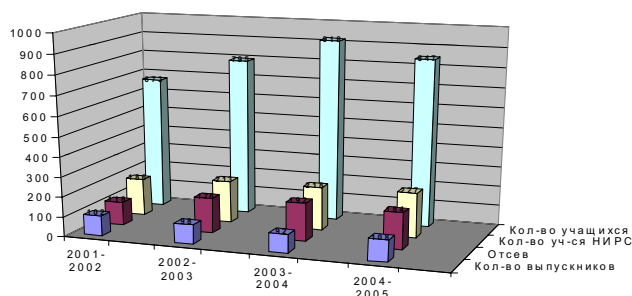


Рис. 4. Динамика количества учащихся АЭП за 2001–2005 гг.

Таким образом, применение синтез-метода для комплексной оценки деятельности системы непрерывного аэрокосмического образования позволяет оценить эффективность функционирования интегративной педагогической системы и провести мониторинг качества под-

готовки специалистов отрасли, что является основой для определения педагогических целей и путей мобилизации внутренних ресурсов системы.

Библиографический список

1. Келс, Г. Р. Процесс самооценки : руководство по самооценке для высшего образования / Г. Р. Келс. М., 1999.
2. Вульфсон, Б. Л. Стратегия развития образования на Западе на пороге XXI века / Б. Л. Вульфсон. М. : Изд-во УРАО, 1999.
3. Кольга, В. В. Теория и методология проектирования педагогически интегрированной системы аэрокосмического образования : моногр. / В. В. Кольга. СПб. : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2004.
4. Кольга, В. В. Развитие педагогически интегрированной системы аэрокосмического образования на современном этапе : моногр. / В. В. Кольга. СПб. : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2004.
5. Система аккредитации за рубежом / Г. Н. Мотова, В. Г. Наводнов, В. Ж. Куклин, Б. С. Савельев. М., 1998.

V. V. Kolga, A. B. Merkulov

THE METHOD OF ACTIVITY EFFECTIVENESS EVALUATION OF AEROSPACE EDUCATION INTEGRATED PEDAGOGICAL SYSTEM

Choosing a school or a higher school to get proper education is often a difficult problem for an ordinary customer due to lack of sufficient objective information about the educational establishment. To estimate activity effectiveness of continuous education system thoroughly the synthesis-method has been developed.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО ЕГО СЕЧЕНИЮ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Предложен способ измерения ширины плотности распределения энергии в поперечном сечении электронного пучка, учитывающий форму кривой распределения. Способ основан на вычислении энтропии распределения. Рассмотрен метод расчета ширины распределения по зондовым характеристикам.

Энергетические параметры электронного пучка: ускоряющее напряжение U , ток пучка I и ширина плотности распределения энергии по его сечению – диаметр пучка d – являются основными энергетическими характеристиками процесса электронно-лучевой обработки. Без контроля и стабилизации указанных параметров невозможно обеспечить необходимое качество технологического процесса. Если системы контроля и стабилизации ускоряющего напряжения и тока в настоящее время уже достаточно хорошо отработаны, то задача контроля и стабилизации диаметра электронного пучка требует своего решения.

Мощность электронного пучка $q = U \cdot I$. Если известен диаметр электронного пучка d , то можно определить удельную мощность q_2 Вт / см², которая является одним из определяющих параметров процесса:

$$q_2 = \frac{UI}{\pi d^2 / 4}.$$

В зависимости от величины удельной мощности q_2 при одинаковой погонной энергии можно получить различную конфигурацию зоны обработки. При этом наиболее существенным и одновременно наиболее трудно определимым параметром электронного пучка является его диаметр.

Существуют различные способы экспериментального определения диаметра электронного пучка. Наиболее простым является метод вращающегося зонда [1; 2], сущность которого состоит в том, что тонкий вращающийся зонд, выполненный в виде вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм, пересекает электронный пучок перпендикулярно его оси и отбирает на себя часть тока. По кривой зондового тока (зондовой характеристике) строят плотность распределения тока электронного пучка по его сечению и вычисляют диаметр. Более точные результаты получают при отклонении пучка на щелевую диафрагму

или отверстие малого диаметра, под которым размещен цилиндр Фарадея [3]. Для контроля ширины плотности энергии пучка на поверхности обрабатываемых деталей используют рентгеновский датчик с коллимированной насадкой. Датчик ориентируют на поверхности свариваемых деталей, а для определения геометрических параметров электронного пучка пересекает зону обзора коллимированный датчика.

Расчет диаметра электронного пучка. Диаметр электронного пучка рассчитывают по величине оценки ширины плотности распределения тока.

В качестве параметров, характеризующих ширину плотности распределения тока электронного пучка, обычно используют следующие (рис. 1):

- ширину кривой распределения, вычисляемую на характерных уровнях ее максимального значения $J_{\max}$ [4]:
 $d_{0,05}$ – на уровне 5 % от максимальной амплитуды $J_{\max}$;
 $d_{0,5}$ – на уровне 50 % от максимальной амплитуды $J_{\max}$;
 d_e – на уровне $1/e$ от максимальной амплитуды $J_{\max}$;
- ширину равномерной плотности распределения (ее площадь равна площади, охватываемой кривой распределения), нормированную максимальным значением величины плотности распределения $J_{\max}$ [5]:

$$d_s = \frac{1}{J_{\max}} \int_{-\infty}^{\infty} j_n(x) dx.$$

Если плотность распределена по нормальному закону, то $d_s = \frac{1}{J_{\max}} = \sigma_n \sqrt{2\pi} = 2,5\sigma_n$, где σ_n – среднее квадратическое отклонение электронов от оси электронного пучка,

которое определяют по второму центральному моменту μ_2 функции распределения: $\mu_2(x) = \sigma_n^2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 j_n(x) dx$;

- ширину интервала, равную двум средним квадратическим отклонениям электронов от оси электронного

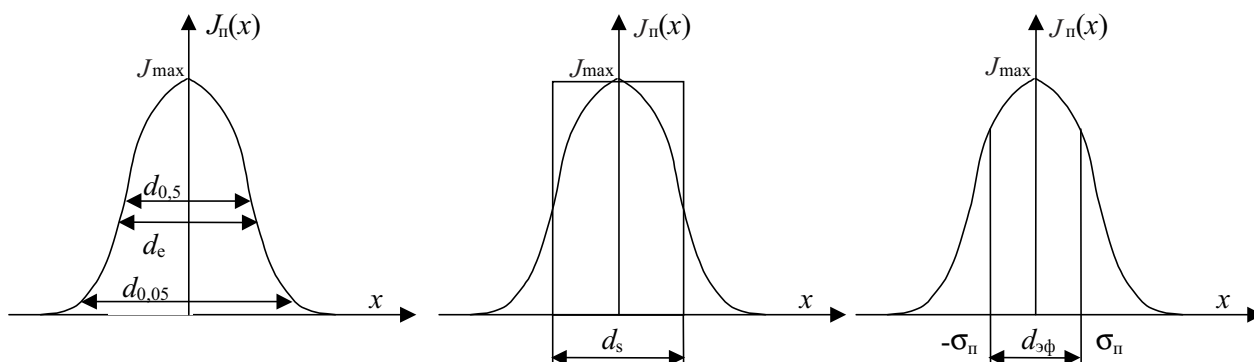


Рис. 1. Способы определения геометрических параметров электронного пучка

пучка, обычно называемую эффективным диаметром; $d_{эф} = 2\sigma_n$. В случае распределения плотности энергии по нормальному закону $d_{эф}$ указывает интервал, в который попадает 68 % энергии электронного пучка.

Энтропийная оценка ширины плотности распределения тока пучка. Следует отметить, что существующие оценки не учитывают форму кривой распределения или рассчитываются исходя из условия, что плотность распределена по нормальному закону. Реально существующие распределения могут отличаться от нормального закона. Установлено, что на геометрию пучка влияют изменение ускоряющего напряжения и тока. На форму распределения также влияют различные дефекты катода, изменение давления в вакуумной камере. Наличие разнообразных факторов, влияющих на плотность распределения энергии пучка, приводит к тому, что однозначного соотношения между средним квадратическим отклонением σ_n и диаметром электронного пучка d как энергетической оценкой вносимой удельной мощности q_2 нет. Для коррекции этой неоднозначности необходимо вводить поправочные коэффициенты, учитывающие вид закона распределения.

В качестве параметра, учитывающего закон плотности распределения энергии, для оценки ширины распределения можно использовать энтропию [6]

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} j_n(x) \ln(j_n(x)) dx.$$

Энтропия является функционалом закона плотности распределения энергии и учитывает особенности этого закона. Численное значение энтропии и ее связь со средним квадратическим отклонением могут быть получены для различных законов распределения (рис. 2).

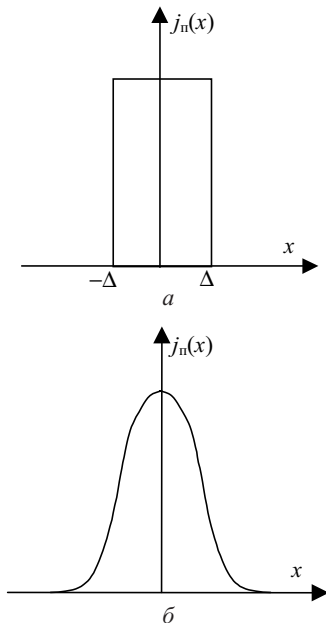


Рис. 2. Законы распределения: а – равномерный; б – нормальный

Закон равномерного распределения энергии (рис. 2, а) определяется по формуле

$$j_n(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta} & \text{при } |x| \leq \Delta, \\ 0 & \text{при } |x| > \Delta. \end{cases}$$

Значение энтропии равномерного распределения будет равно

$$H_p(x) = - \int_{-\Delta}^{\Delta} \frac{1}{2\Delta} \ln \frac{1}{2\Delta} dx = \ln 2\Delta. \quad (1)$$

Дисперсия равномерного распределения

$$\sigma_n^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 j_n(x) dx = \int_{-\Delta}^{\Delta} x^2 \frac{1}{2\Delta} dx = \frac{\Delta^2}{3}.$$

Отсюда энтропию можно выразить по среднему квадратическому отклонению:

$$H_p(x) = \ln(2\sqrt{3}\sigma_n).$$

Закон нормального распределения (рис. 2, б) имеет вид

$$j_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_n^2}\right).$$

Значение энтропии для этого закона

$$H_n(x) = \int_{-\infty}^{\infty} j_n(x) \left(\ln(\sqrt{2\pi}\sigma_n) + \frac{x^2}{2\sigma_n^2} \right) dx = \ln(\sqrt{2\pi}\sigma_n) \int_{-\infty}^{\infty} j_n(x) dx + \frac{1}{2\sigma_n^2} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 j_n(x) dx,$$

так как $\int_{-\infty}^{\infty} j_n(x) dx = 1$ и $\int_{-\infty}^{\infty} x^2 j_n(x) dx = \sigma_n^2$, то

$$H_n(x) = \ln(\sqrt{2\pi}\sigma_n) + \frac{1}{2} = \ln(\sqrt{2\pi}\sigma_n) + \ln(\sqrt{e}) = \ln(\sqrt{2\pi e}\sigma_n). \quad (2)$$

При практическом использовании изложенного подхода для оценки геометрических параметров электронного пучка привычнее оперировать не значениями энтропии, а шириной плотности распределения.

Для энтропийной оценки ширины плотности распределения можно выбрать ширину равномерной плотности распределения, энтропия которой равна энтропии плотности измеряемого распределения. Эту оценку назовем энтропийным диаметром электронного пучка и обозначим $d_э$.

Произведем расчет энтропийного диаметра для случая нормального распределения тока электронного пучка. Для этого приравняем выражения (1) и (2): $d_э = 2\Delta = \sqrt{2\pi e}\sigma_n = 4,13\sigma_n$.

В случае произвольной формы кривой распределения $j_n(x) = \phi(x)$ значение энтропийного диаметра определяем следующим образом. Найдем значение энтропии распределения: $H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \ln \phi(x) dx$. Приравняем его к выражению (1): $\ln 2\Delta = H(x)$, $d_э = 2\Delta = \exp(H(x))$.

Энтропийное значение диаметра получается в тех же единицах, в которых измеряется ширина равномерного распределения, согласно соотношению $d_э = \exp(H_p(x)) = \exp(\ln(2\Delta)) = 2\Delta$.

Для энтропийной оценки эффективного диаметра выберем интервал, равный двум среднеквадратическим отклонениям нормального закона распределения, энтропия которого равна энтропии плотности измеряемого распределения. Эту оценку назовем эффективным энтропийным диаметром электронного пучка и обозначим $d_{эф.э}$.

Для его вычисления найдем значение энтропии распределения произвольной формы $H(x)$ и приравняем его к выражению (2): $\ln(\sqrt{2\pi e}\sigma_n) = H(x)$, откуда следует, что $d_{эф.э} = 2\sigma_n = \frac{2}{\sqrt{2\pi e}} \exp H(x)$.

Учитывая, что значение энтропийного диаметра $d_s = \exp H(x)$, зависимость между эффективным энтропийным диаметром и энтропийным диаметром имеет вид $d_{эф.э} = \frac{2}{\sqrt{2\pi e}} d_s = 0,484 d_s$.

Расчет энтропийного диаметра по зондовым характеристикам. При оценке ширины плотности распределения электронного пучка располагают не самим законом распределения, а набором дискретных величин, подчиняющихся этому закону. Это связано с тем, что в процессе измерения плотности электронный луч отклоняется на зонд, щелевую диафрагму или на проекцию коллиматора, которые обладают определенными размерами. На основании этого ограниченного числа измерений может быть построена ступенчатая гистограмма, приближающаяся к действительному распределению.

Пусть ступенчатое распределение (рис. 3) состоит из m столбцов с границами $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m$. Каждый столбец шириной $\Delta_x = x_i - x_{i-1}$ включает n_i дискретных результатов измерения. Плотность распределения на протяжении каждого из столбцов остается постоянной и равной

$$J_n(\Delta_x) = \frac{n_i}{n \cdot \Delta_x}, \text{ где } n = \sum_{i=1}^m n_i.$$

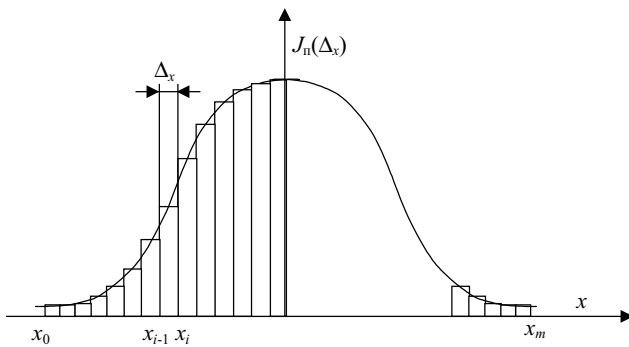


Рис. 3. Ступенчатая гистограмма распределения тока пучка

Энтропия такого ступенчатого распределения

$$\begin{aligned} H &= - \int_{-\infty}^{\infty} j_n(\Delta_x) \ln(j_n(\Delta_x)) dx = - \sum_{i=1}^m \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{n_i}{n \cdot \Delta_x} \ln \frac{n_i}{n \cdot \Delta_x} dx = \\ &= - \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n \cdot \Delta_x} \ln \frac{n_i}{n \cdot \Delta_x} \int_{x_{i-1}}^{x_i} dx = \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n} \ln \frac{n \cdot \Delta_x}{n_i} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n} \ln \frac{n}{n_i} + \ln \Delta_x. \end{aligned}$$

Можно преобразовать это выражение к виду

$$H(\Delta_x) = \ln \Delta_x + \sum_{i=1}^m \ln \left(\frac{n}{n_i} \right)^{\frac{n_i}{n}} = \ln \left[\Delta_x \prod_{i=1}^m \left(\frac{n}{n_i} \right)^{\frac{n_i}{n}} \right]$$

Тогда энтропийный диаметр будет равен

$$\begin{aligned} d_s &= \exp(H(\Delta_x)) = \Delta_x \prod_{i=1}^m \left(\frac{n}{n_i} \right)^{\frac{n_i}{n}} = \\ &= \Delta_x \frac{n}{\sqrt[n]{\prod_{i=1}^m (n_i)^{n_i}}} = \Delta_x \cdot n \cdot 10^{-\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m n_i \lg n_i} \end{aligned}$$

Зондовые характеристики, полученные экспериментально с помощью автоматизированной системы конт-

роля плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению [7], представлены на рис. 4.

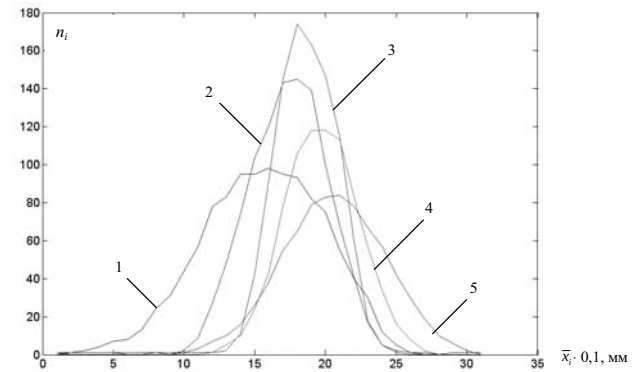


Рис. 4. Зондовые характеристики плотности распределения тока электронного пучка, соответствующие различным значениям тока фокусирующей системы: 1 — $I_\phi = 127$ мА; 2 — $I_\phi = 129$ мА; 3 — $I_\phi = 132$ мА; 4 — $I_\phi = 134$ мА; 5 — $I_\phi = 136$ мА

Для контроля плотности распределения использовался коллимированный рентгеновский датчик. Датчик располагался таким образом, чтобы проекция коллиматора, представляющая полосу шириной 0,1 мм, располагалась в непосредственной близости от места сварки.

Для измерения геометрических параметров распределения тока электронный пучок периодически пересекал проекцию коллиматора. Вычисление значений среднеквадратического отклонения σ_n , энтропийного диаметра d_s и его эффективного значения производилось на основании статистической обработки серий наблюдений. Каждая серия состояла из восьми реализаций, в каждой реализации 32 точки. Значения показаний датчика в каждой точке измерения усреднялись по всей серии наблюдений по формуле $\bar{x}_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_{i,j}$.

Перемещение пучка из одной точки в другую соответствует 0,1 мм. Для оценки точности проводимых измерений для каждой серии измерений вычислялись значения энтропийного диаметра d_s^* отдельных реализаций. Затем полученное значение d_s^* подвергалось статистической обработке. Вычислялось их среднее квадратическое отклонение $\sigma(d_s^*)$. Интервал доверительной погрешности $\Delta_{0,9}(d_s)$, определяющий интервал для доверительной вероятности $P_d = 0,9$, рассчитывающийся по выражению [6] $\Delta_{0,9}(d_s) = 1,6\sigma(d_s^*)$.

Относительная погрешность, %, рассчитывалась по выражению $\Delta_{отн}(d_s) = \frac{\Delta_{0,9}(d_s)}{d_s} 100$.

Результаты расчетов представлены в таблице.

Таким образом, сделаем следующие выводы:

- ширину плотности распределения тока электронного пучка необходимо оценивать параметром, учитывающим форму кривой распределения;
- в качестве параметра, учитывающего закон распределения тока, для оценки ширины распределения можно использовать энтропию $H(x)$, ее нелинейный функционал $d_s = \exp(H(x))$, называемый энтропийным диаметром и его эффективное значение $d_{эф.э} = 0,484 d_s$, называемое эффективным энтропийным диаметром.

Параметры распределения плотности пучка

№ серии	Ток фокусирующей системы, мА	σ_p , мм	d_z , мм	$d_{эф.з}$, мм	$\Delta_{отн}(d_z)$, %
1	127	0,424	1,701	0,823	1,8
2	129	0,293	1,162	0,562	6
3	132	0,28	0,953	0,461	8,9
4	134	0,282	1,082	0,524	8,8
5	136	0,72	1,499	0,726	4

Библиографический список

1. Зуев, И. В. Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда / И. В. Зуев, А. А. Углов // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 5. С. 110–112.
2. Назаренко, О. К. Измерение параметров мощных электронных пучков методом вращающегося зонда / О. К. Назаренко, В. Е. Локшин, К. С. Акопьянц // Электронная обработка материалов. 1970. № 1. С. 87–90.
3. Panten, M. Diagnosis of high energy density electron beam on electron beam welding machines with a new compact measuring equipment / M. Panten, F. Eichhorn, B. Spies // 4^{eme} Collog. int. coudage et fision faisceau electrons et laser, 26–30 sept. 1988, Cannes. Saclay, 1988. P. 53–60.
4. Рыкалин, Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин, И. В. Зуев, А. А. Углов. М. : Машиностроение, 1978. 239 с.
5. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверман ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 2000. 234 с.
6. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зоограф. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.
7. Мурыгин, А. В. Автоматизированная система контроля плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению при ЭЛС / А. В. Мурыгин, А. Н. Бочаров // Сварочное производство. 2003. № 8. С. 32–34.

A. N. Bocharov, A. V. Murygin

THE DEFINING OF WIDTH ENERGY DISTRIBUTION DENSITY IN SECTION OF ELECTRON BEAM

Method of measurement of energy distribution density in section of electron beam has been offered. The method is taking account shape of curve distribution. Method rests on calculation of entropy distribution. Method of calculation of width distribution on probe characteristic has considered.

ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ КОНТАКТНОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ ВЫРАЩИВАНИЕМ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПО СПОСОБУ ЧОХРАЛЬСКОГО

В предложенном автором контактном методе управления диаметром вытягиваемого монокристаллического слитка из расплава по способу Чохральского разработан математический алгоритм формирования управляющего сигнала как функция отклонения текущей площади выращиваемого кристалла от заданной. Метод основан на стабилизации уровня расплава с высокой точностью, что позволяет произвести автоматизацию процесса выращивания заданного диаметра кристалла на всех его стадиях роста.

Основной принцип контактного метода управления выращиванием монокристаллов (рис. 1) [1...3] состоит в том, что во вращающемся вокруг своей оси с угловой скоростью W_T тигле с внутренним диаметром D находится жидкий расплавленный металл. Кристалл диаметром d вытягивается из расплава со скоростью вытягивания кристалла V_3 и скоростью вращения W_3 кристалла.

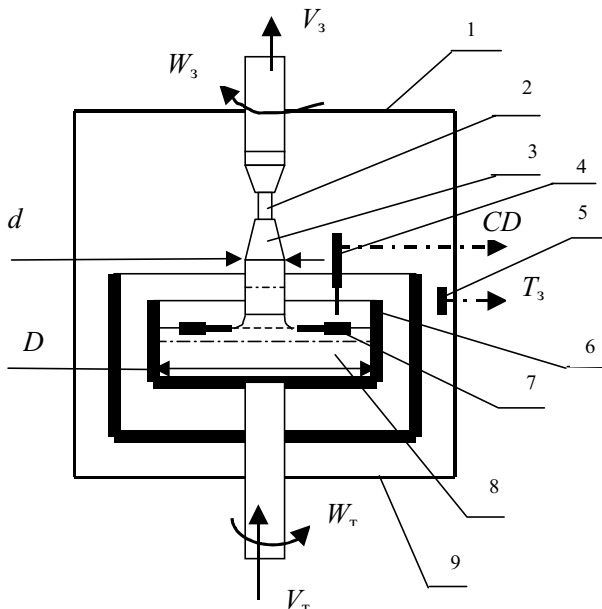


Рис. 1: Схема контактного метода: 1 – нагреватель; 2 – заправка; 3 – кристалл; 4 – контактный датчик уровня; 5 – датчик температуры; 6 – тигель; 7 – электродоуплотнительный экран; 8 – расплав металла; 9 – камера

Весь процесс происходит в камере с инертным газом или в вакууме. Температура расплава обеспечивается за счет управления мощностью нагревателя печи, для чего используются показания датчика температуры T_3 боковой точки нагревателя, стандартным управляемым регулятором температуры. На поверхности расплава находится плавающий электродоуплотнительный экран, относительно которого замыкается и размыкается контактный датчик уровня, дающий в систему управления сигнал CD об изменении уровня расплава в процессе выращивания кристалла. Стабилизация уровня расплава в тигле происходит благодаря управлению скоростью подъема тигля вверх на основе сигнала с датчика уровня.

Система управления на базе ЭВМ определяет разностный сигнал управления Δu как функцию отклонения те-

кущей площади S_T слитка от заданной S_3 на основе вычисленных перемещений заправки $X_{3ц}$ и тигля $X_{тц}$ вверх за время цикла $T_{ц}$ оценки сигнала управления Δu . Стабилизация уровня расплава в тигле осуществляется с точностью до $1...2$ мкм на основе сигнала с контактного датчика уровня. При этом в моменты разомкнутого состояния датчика скорость подъема тигля вверх $V_{тм}$ устанавливается больше, чем максимальная скорость убывания расплава в тигле V при максимальном допустимом диаметре d_{max} выращиваемого слитка, а в момент замкнутого состояния датчика величиной $V_{тм} / M$ – со скоростью меньшей, чем возможная скорость убывания расплава V в тигле с минимально допустимым диаметром d_{min} выращиваемого слитка.

Данное управление обеспечивает периодическое размыкание и замыкание контактного датчика (при текущем диаметре кристалла d , находящемся в пределах диаметра $d_{min}...d_{max}$), с вычислением сигнала управления Δu как функции отклонения текущей площади S_T слитка от заданной S_3 с последующим вводом этого сигнала для коррекции текущей площади слитка по всем каналам управления: скорости вытягивания кристалла V_3 , скорости вращения кристалла W_3 , скорости вращения тигля W_T , температуры боковой точки нагревателя T_3 . Для упрощения математических выражений слиток можно принять за условно круглый и вместо площадей оперировать текущим d и заданным d_3 диаметром слитка.

Процесс подъема тигля вверх со скоростью $V_{тм}$ (рис. 2), большей на величину опережения C , чем скорость убывания расплава в тигле V в момент разомкнутого состояния (Р) датчика и подъем (или останов при $M = \infty$), со скоростью $V_{тм} / M$, меньшей в M раз скорости убывания расплава в тигле в моменты замкнутого состояния (З) датчика, приводит к периодическому замыканию и размыканию датчика относительно плавающего экрана, движущегося со скоростью убывания расплава V .

Как показали исследования, время движения Δt с пониженной скоростью $V_{тм} / M$ (или остановку при $M = \infty$) в моменты замкнутого состояния датчика можно принять за постоянную вычисляемую программируемую задержку Δt , в течение которой происходит движение тигля с пониженной скоростью, а состояние датчика уровня не анализируется. Исходя из этого уравнение, при котором датчик догонит экран после его размыкания, примет вид

$$V_{тм} \cdot \Delta t_d + (V_{тм} / M) \cdot \Delta t = V(\Delta t_d + \Delta t), \quad (1)$$

где Δt – период замедления (или остановки при $M = \infty$) скорости подъема тигля после замыкания датчика;

Δt_d – период увеличенной скорости подъема тигля после размыкания датчика; V – скорость убывания расплава в тигле; $V_{T.M}$ – увеличенная на коэффициент C скорость подъема тигля вверх ($C=4$); M – коэффициент снижения скорости, $M=4$.

Для того чтобы датчик догнал экран после размыкания следует выполнить условия:

$$V_T = V_{T.M} > V \text{ (при состоянии Р датчик разомкнут и } d_{\max} > d), \quad (2)$$

$$V = V_3 \cdot (\rho_T / \rho_{\text{ж}}) \cdot [d / D]^2, \quad (3)$$

где V_T – скорость подъема тигля; V – скорость убывания расплава в тигле; V_3 – скорость вытягивания кристалла; d – диаметр кристалла; D – внутренний диаметр тигля;

ρ_T – удельная плотность твердого материала; $\rho_{\text{ж}}$ – удельная плотность жидкого материала.

Скорость подъема тигля вверх $V_{T.M}$ определим по уравнениям:

$$V_{T.M} = V [d_{\max} / d]^2 = V_3 (\rho_T / \rho_{\text{ж}}) [d_{\max} / D]^2, \quad (4)$$

$$d_{\max} = d_3 \frac{1}{\sqrt{1-1/C}}, \quad (5)$$

где C – коэффициент увеличения скорости подъема тигля, $C=4$; d_3 – заданный диаметр выращиваемого кристалла; $d_{\max}$ – максимальный допустимый диаметр выращиваемого кристалла, с соблюдением которого выполняется условие, при котором датчик догонит экран при размыкании.

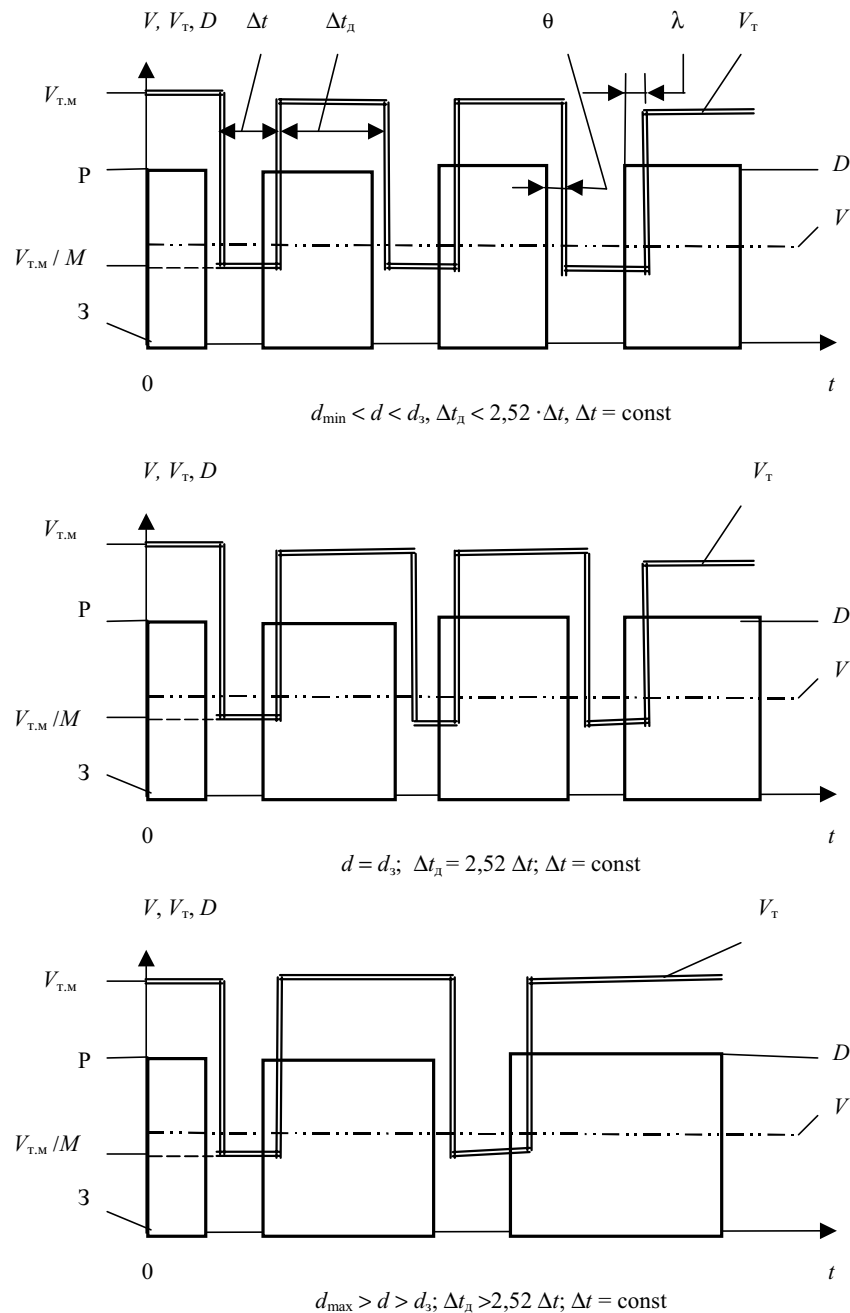


Рис. 2. Графический анализ работы привода подъема тигля:

V – скорость убывания расплава в тигле; V_T – скорость подъема тигля;
 D – работа контактного датчика уровня; Р – разомкнутое состояние датчика;
 З – замкнутое состояние

Для того чтобы экран отстал от датчика после замыкания, необходимо выполнить следующее условие:

$$V_T = V_{T.M} / M < V \text{ (при состоянии 3 датчик замкнут и } d_{\min} < d). \quad (6)$$

В момент замкнутого состояния датчика скорость замедления $V_{T.M} / M$ тигля можно определить по выражениям:

$$V_T = V_{T.M} / M = V (d_{\min} / d)^2 = V_3 (\rho_T / \rho_{ж}) [d_{\min} / D]^2, \quad (7)$$

$$d_{\min} = d_{\max} \cdot \frac{1}{\sqrt{M}} = d_3 \frac{1}{\sqrt{M(1-1/C)}}, \quad (8)$$

где $d_{\min}$ – минимальное допустимое значение диаметра слитка, при котором соблюдается условие отставания экрана от датчика в момент его замкнутого состояния.

Для обеспечения периодической работы датчика по его замыканию и размыканию необходимо выполнения условий:

$$M(1-1/C) > 2, \quad (9)$$

$$d_{\min} < d < d_{\max}, \quad (10)$$

где d – текущий диаметр кристалла.

Время оценки $T_{ц}$ сигнала управления Δu определим по выражению:

$$T_{ц} = X_{3.ц}^u \Delta_3 / V_3 = X_{3.ц} / V_3, \quad (11)$$

где $X_{3.ц}$ – перемещение затравки за время $T_{ц}$; $T_{ц}$ – период оценки сигнала управления (СУ); $X_{3.ц}^u$ – перемещение затравки в импульсах отсчета СУ; Δ_3 – дискрета отсчета по затравке.

Анализ выражений (1...11) приводит к следующим соотношениям:

$$\Delta t_d = \Delta t \{1 - [d_{\max} / d]^2 1 / M\} / \{[d_{\max} / d]^2 - 1\}, \quad (12)$$

$$K_{ц} = T_{ц} / (\Delta t_d + \Delta t), \quad (13)$$

где $K_{ц}$ – число циклов замыкания–размыкания датчика,

$$T_T = K_{ц} \cdot \Delta t_d = T_{ц} \{[d / d_{\max}]^2 - 1 / M\} / \{1 - 1 / M\}, \quad (14)$$

где T_T – суммарное время подъема тигля с увеличенной скоростью $V_{T.M}$ за период $T_{ц}$ оценки сигнала управления.

$$T_{o.T} = K_{ц} \cdot \Delta t = T_{ц} - T_T = T_{ц} \{1 - [d / d_{\max}]^2\} / \{1 - 1 / M\}, \quad (15)$$

где $T_{o.T}$ – суммарное время подъема тигля с замедленной скоростью $V_{T.M} / M$ за период $T_{ц}$ оценки сигнала управления.

Графики работы привода подъема тигля по скорости V_T исходя из анализа выражения (12), при диапазоне изменения диаметра d в пределах диаметра $d_{\min} \dots d_{\max}$ (рис. 2) показывают зависимость изменения периода Δt_d увеличенной скорости подъема тигля (после размыкания датчика) от соотношения текущего диаметра слитка d и его заданного значения d_3 . Период Δt_d увеличивается при отклонении текущего диаметра кристалла d в большую сторону от заданного значения d_3 .

Приведем далее вывод выражения для определения сигнала управления Δu .

За время цикла оценки сигнала управления $T = T_{ц}$ (11), при условии постоянства уровня расплава в тигле, поддерживаемого системой управления, за счет работы по контактному датчику, соотношение масс жидкой и твердой фазы материала можно записать в виде

$$\left(\int_0^T V_3 dt \right) \Delta_3 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \rho_T / 4 = \left(\int_0^T V_T dt \right) \cdot \Delta_T \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \rho_{ж} / 4, \quad (16)$$

$$T = T_{ц}. \quad (17)$$

Полагая на интервале $0 - T_{ц}$, что скорость вытягивания кристалла V_3 постоянна, а управление скоростью подъема тигля вверх V_T описывается формулами (4)...(8), выражение (16) представим в виде

$$X_{3.ц} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \rho_T / 4 = X_{T.ц} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \rho_{ж} / 4, \quad (18)$$

где $X_{3.ц}$ – перемещение кристалла за время $T_{ц}$; $X_{T.ц}$ – перемещение тигля за время $T_{ц}$.

В свою очередь перемещения $X_{3.ц}$ и $X_{T.ц}$ с учетом (1)...(15) можно выразить в следующем виде:

$$X_{3.ц} = V_3 \cdot T_{ц}, \quad (19)$$

$$X_{T.ц} = V_{T.M} \cdot T_T + (V_{T.M} / M) \cdot T_{o.T}. \quad (20)$$

В системе управления зададимся вытягиванием некоторого цилиндра Z , имеющего заданный диаметр d_3 , на перемещении $X_{3.ц}$ за время $T_{ц}$, при этом масса цилиндра Z определится выражением

$$Z = X_{3.ц} \cdot \pi \cdot d_3^2 \cdot \rho_T / 4, \quad (21)$$

где Z – масса задаваемого цилиндра вытягивания с диаметром d_3 .

Если вычесть из левой и правой части уравнения (18) выражение (21), то можно получить формулы для сигнала управления Δu^* :

$$\Delta u^* = X_{T.ц} \cdot \rho_{ж} \cdot [D / d_3]^2 / \rho_T - X_{3.ц} \quad (22)$$

$$\Delta u^* = X_{3.ц} \cdot \{[d / d_3]^2 - 1\} \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u^* &> 0; \text{ при } d_{\max} > d > d_3 \\ \Delta u^* &= 0; \text{ при } d = d_3 \\ \Delta u^* &< 0; \text{ при } d_{\min} < d < d_3 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Приведем выражения (22), (23) к виду, удобному для программирования, для чего представим перемещения $X_{3.ц}$ и $X_{T.ц}$ в импульсах отсчета системы управления с учетом применения фотоэлектрических считывающих линеек, дающих непосредственное измерение перемещения кристалла и тигля вверх с точностью $\Delta_T = \Delta_3 = 0,1$ мкм, в следующем виде:

$$X_{3.ц} = X_{3.ц.и} \cdot \Delta_3, \quad (25)$$

$$X_{T.ц} = X_{T.ц.и} \cdot \Delta_T, \quad (26)$$

где $X_{3.ц.и}$ – перемещение затравки в импульсах отсчета СУ; $X_{T.ц.и}$ – перемещение тигля в импульсах отсчета СУ; Δ_T, Δ_3 – цена (дискрета) отсчета перемещения по тиглю и кристаллу (затравке) соответственно.

Применяя к (22), (23) выражения (25) и (26), а также деля обе части этих уравнений на коэффициент масштабирования $A = 2$ и коэффициент умножения уставки $B = 32$, получим следующие расчетные соотношения для вычисления сигнала управления Δu на ЭВМ за время $T_{ц}$:

$$\Delta u = X_{T.ц.и} \cdot K_y / (A \cdot B) - X_{3.ц.и} / A, \quad (27)$$

$$K_y = B \cdot \Delta_T \cdot \rho_{ж} \cdot [D / d_3]^2 / (\Delta_3 \cdot \rho_T) \quad (28)$$

$$\Delta u = X_{3.ц.и} \{[d / d_3]^2 - 1\} / A, \quad (29)$$

где A – коэффициент масштабирования; B – коэффициент умножения уставки; K_y – уставка заданного диаметра.

Выражения (23)...(29) для сигнала управления Δu показывают непосредственную функциональную зависимость данного сигнала от отклонения текущей площади слитка (диаметра) от заданной.

Таким образом, на основании вышесказанного можно сформулировать следующие выводы:

– соотношения (1)...(29) являются основными математическими соотношениями контактного метода, на основе которых происходит построение и программирование микропроцессорных систем автоматического управления выращиванием монокристаллов с достижением высокой точности стабилизации площади (диаметра) вытягиваемого кристалла – до 1 %.

– практическая значимость данного метода подтверждена внедрением на микропроцессорных установках по выращиванию германия на ФГУП «Германий» (г. Красноярск).

Библиографический список

1. Пат. 2128250 Российская Федерация, МПК С 30 В 15 / 20, 15 / 22, 15 / 26. Способ управления процессом выра-

щивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик ; заявитель и патентообладатель Гос. предприятие «Германий». № 97101248 ; заявл. 16.01.97 ; опубл. 27.03.99. 10 с. : ил.

2. Пат. 2184803 Российская Федерация, МПК С 30 В 15 / 20, 15 / 22, 15 / 12 29 / 08. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик, В. Д. Лаптенко ; заявитель и патентообладатель Гос. предприятие «Германий». № 99123739 ; заявл. 12.11.99 ; опубл. 10.07.02. 14 с. : ил.

3. Саханский, С. П. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Д. Лаптенко // Перспективные материалы, технологии, конструкции-экономика : сб. науч. тр. / под ред. В. В. Стацеры ; Краснояр. гос. акад. цв. металлов и золота. Вып. 6. Красноярск, 2000. С. 391–393.

S. P. Sakhansky

THE MAJOR MATHEMATICAL RATIOS OF CONTACT MONITORING METHOD OF MONOCRYSTAL GROWTH BY CZOCHRALSKI METHOD

In the contact monitoring method of diameter of monocrystalline ingot pulled from melt by Czochralsky method offered by the author, a mathematical algorithm of monitoring signal formation has been developed as a function of deviation of current area of grown crystal from given one. The method is based on stabilization of melt level to high precision which allows to perform automatic growth process of given crystal diameter on all its growth stages.

С. П. Саханский, В. Д. Лаптенко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ПО ДИАМЕТРУ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОТЫ СТОЛБИКА МЕНИСКА КРИСТАЛЛА ПРИ КОНТАКТНОМ МЕТОДЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЫРАЩИВАНИЕМ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПОСОБОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Разработанный авторами контактный метод управления диаметром вытягиваемого монокристаллического слитка из расплава по способу Чохральского позволяет определить величину коррекции сигнала управления по диаметру в зависимости от изменения высоты столбика мениска кристалла при выращивании конусной части кристалла.

Основной принцип контактного метода управления выращиванием монокристаллов [1; 2] состоит в следующем: во вращающемся вокруг своей оси с угловой скоростью ω тигле с внутренним диаметром D находится жидкий расплавленный металл. Кристалл диаметром d вытягивается из расплава со скоростью вытягивания кристалла V_z и скоростью вращения ω кристалла.

Весь процесс проводится в камере с инертным газом или в вакууме. Температура расплава поддерживается стандартным управляемым регулятором температуры за счет управления мощностью нагревателя печи, осуществляемого по показаниям датчика температуры боковой точки нагревателя. На поверхности расплава плавает электропроводный экран, относительно которого замыкается и размыкается контактный датчик уровня, дающий в систему управления сигнал об изменении уровня расплава в процессе выращивания кристалла. Стабилизация уровня расплава в тигле происходит за счет управления скоростью подъема тигля вверх на основе сигнала с датчика уровня с точностью 1–2 мкм. Система управления на базе ЭВМ определяет разностный сигнал управления Δu как функцию отклонения текущей площади S_t кристалла от заданной S_z на основе вычисленных перемещений затравки $X_{з.д.}$ и тигля $X_{т.ц.}$ вверх за время цикла $T_{ц}$ оценки сигнала управления Δu .

На стадии роста монокристалла постоянного сечения (диаметра) ведущую роль в формировании монокристаллической структуры играют тепловые условия процесса. Ими определяются осевые и радиальные градиенты температур в кристалле и расплаве, от которых зависит форма фронта кристаллизации и термические напряжения в монокристалле, а также размеры переохлажденной области расплава вблизи фронта кристаллизации.

Такая область возникает в расплаве, находящемся в тигле, тепло к которому подводится снаружи. Поэтому в обладающем определенной теплопроводностью расплаве температура падает в направлении от стенки тигля к его центру и от дна тигля к поверхности расплава. В результате возникают осевой G_z и радиальный G_r градиенты температуры, а их пересечение с изотермой плавления $T_{пл}$ образует переохлажденную область расплава вблизи фронта кристаллизации слитка.

Диаметр переохлажденной области расплава определяет диаметр столбика расплава, поднимаемого смачиваемой расплавом плоскостью фронта кристаллизации и, следовательно, диаметр растущего на этом столбике монокристалла.

Высота столбика расплава h_0 прямо пропорциональна поверхностному натяжению расплава и обратно пропорциональна его плотности и радиусу выращиваемого монокристалла, обычно она составляет 0,3...5,0 мм. Эта величина может быть примерно рассчитана, по массе столбика расплава, удерживаемого на площади фронта кристаллизации силами поверхностного натяжения, действующими по окружности:

$$h_0 \cdot \gamma_p \cdot \pi \cdot r^2 \cdot g = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma, \quad (1)$$

где h_0 – высота столбика расплава, см; γ_p – плотность расплава, кг/см³, для германия $\gamma_p = 5,24 \cdot 10^{-3}$ кг/см³; r – радиус столба расплава, см ($r = d/2$); g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; σ – поверхностное натяжение расплава, Н/см, для германия $\sigma = 6 \cdot 10^{-3}$ Н/см.

Для германия выражение (1) можно представить в виде

$$h_0 = 2 \sigma / \gamma_p \cdot g \cdot r = 0,234 \text{ см}^2 / r. \quad (2)$$

Диаметр растущего монокристалла в первую очередь определяется градиентами температур в расплаве.

При повышении температуры нагревателя размер переохлажденной области в расплаве уменьшается, температура в нем и в столбике увеличивается и фронт кристаллизации поднимается (высота столбика также увеличивается). Возрастающие с увеличением поверхности расплава силы поверхностного натяжения сжимают столбик сильнее и форма его из цилиндрической превращается в деформированный параболоид вращения. В этом случае касательная к поверхности мениска в точке его контакта с фронтом кристаллизации будет уходить под кристалл, то же самое будет происходить и с кристаллизирующейся твердой фазой. В результате диаметр монокристалла будет уменьшаться.

Понижение температуры нагревателя или уменьшение скорости кристаллизации, наоборот, приводит к увеличению размеров переохлажденной области в расплаве, уменьшению высоты столбика и искривлению его мениска в противоположную сторону, а касательная к его поверхности направлена в сторону от монокристалла. В таких случаях монокристалл увеличивается в диаметре.

Приближенные аналитические выражения для формы мениска довольно сложны. Очевидно, что на цилиндрической части слитка высота столбика мениска при постоянно растущем диаметре постоянна и погрешности в сигнале управления за счет изменения высоты подъема мениска нет. Данная погрешность вносит значительные изменения при формировании переходных частей слитка (формирование плечей слитка, при переходе с прямо-

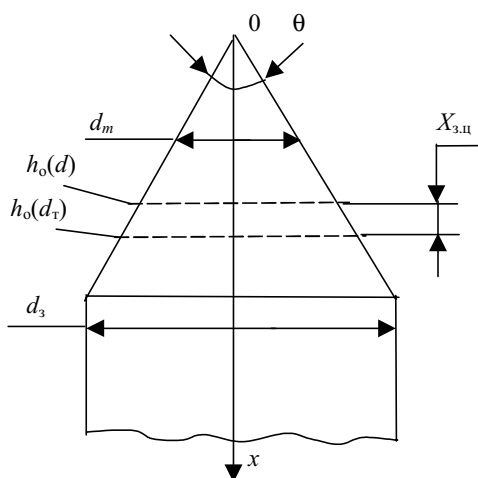
го конуса на цилиндр или при переходе с цилиндрической части слитка на обратный конус).

Основными факторами, влияющими на изменение высоты столбика мениска, являются изменение тепловых условий в зоне фронта кристаллизации, преобладающим из которых является изменение температуры нагревателя, и скорости вытягивания.

Преобразуем выражение (2) в выражение для диаметра растущего кристалла, см:

$$d = 4 \sigma / (\gamma_p \cdot h_o \cdot g). \quad (3)$$

Формирование прямого конуса кристалла показано на рисунке. Рассмотрим процесс компенсации ошибки в сигнале управления Δu при выращивании прямого конуса кристалла за цикл измерения сигнала управления $T = T_{\text{ц}} (X = X_{\text{з.ц}})$.



Прямой конус кристалла

Для упрощения расчетов примем угол разращивания прямого конуса равным 90° ($\theta = 90^\circ$). На основании данного допущения по выражению (3) получим выражения для текущей высоты столбика мениска $h_o(d)$ и уменьшенной высоты $h_o(d_r)$, полученной в конце интервала измерения сигнала управления:

$$h_o(d) = 4 \sigma / (\gamma_p d \cdot g), \quad (4)$$

где $h_o(d)$ – высота столбика расплава в начале цикла измерения сигнала управления,

$$h_o(d_r) = 4 \sigma / [\gamma_p (d + 2X_{\text{з.ц}}) g], \quad (5)$$

где $h_o(d_r)$ – высота столбика расплава в конце цикла измерения сигнала управления.

Согласно (4), (5) можно получить выражение для величины уменьшения высоты столбика мениска над расплавом за цикл измерения сигнала управления:

$$\Delta h = \{4 \sigma / (\gamma_p g)\} \{1/d - 1/(d + 2X_{\text{з.ц}})\}, \quad (6)$$

где Δh – величина уменьшения высоты столбика мениска над расплавом за цикл измерения сигнала управления; $X_{\text{з.ц}}$ – перемещение затравки кристалла вверх за цикл измерения.

Соотношения (4)...(6) показывают, что при разращивании прямого конуса и увеличении диаметра кристалла, высота столбика мениска уменьшается и часть металла переходит в расплав, что ведет к уменьшению величины замеренных перемещений тигля $X_{\text{т.ц}}$ за цикл измерения и, как следствие, к ошибке (уменьшению) величины сигнала управления Δu , поэтому для корректировки сигнала управления на участке прямого конуса необходимо учитывать величину данной погрешности, вводя программно коррекцию сигнала управления, исходя из соотношений (4)...(6).

Таким образом, мы можем сделать следующие выводы:

- в разработанном авторами контактном методе управления установками выращивания кристаллов определено выражение для коррекции сигнала управления на конусной части кристалла в зависимости от изменения высоты столбика мениска над поверхностью расплава;
- выражение для коррекции конусной части выращиваемого кристалла позволяет автоматизировать процесс выращивания кристалла заданной формы на его конусной части.

Библиографический список

1. Пат. 2128250 Российская Федерация, МПК С 30 В 15 / 20, 15 / 22, 15 / 26. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик; заявитель и патентообладатель Гос. предприятие «Германий». № 97101248; заявл. 16.01.97; опубл. 27.03.99. 10 с.: ил.
2. Пат. 2184803 Российская Федерация, МПК С 30 В 15 / 20, 15 / 22, 15 / 12 29 / 08. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик, В. Д. Лаптенко; заявитель и патентообладатель Гос. предприятие «Германий». № 99123739; заявл. 12.11.99; опубл. 10.07.02. 14 с.: ил.

S. P. Sakhansky, V. D. Laptenok

THE SIZING OF DIAMETER MONITORING SIGNAL CORRECTION ON CRYSTAL MENISCUS BUMP HEIGHT CHANGE AT CONTACT MONITORING METHOD OF MONOCRYSTAL GROWTH BY CZOCHRALSKI METHOD

In the contact monitoring method of diameter of monocrystalline ingot pulled from melt by Czochralsky method developed by the authors, sizing of diameter monitoring signal correction on crystal meniscus bump height change when growing conical part of crystal is important.

Н. Д. Демиденко, Л. В. Кулагина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Предложена математическая модель и метод решения задачи для случая горения жидкого топлива в трубчатых печах нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Выполнена физическая интерпретация результатов расчета.

Использование органического жидкого топлива является основным источником энергии большого числа различных теплотехнологических процессов. Проблема энергоэффективности существующих производств приводит к необходимости решения задач совершенствования теплофизических и гидродинамических процессов при сжигании жидкого топлива в топочных устройствах. В большинстве случаев экономичность сжигания и снижение количества вредных выбросов, поступающих в окружающую среду, зависит от дисперсности топлива, подаваемого в зону горения, времени его нахождения в реакционном объеме, гетерогенности состава топлива, конструктивных особенностей топочного устройства и технологических параметров процесса, проводимого в данном устройстве [1]. Кроме того, имеются определенные особенности горения и у новых видов жидкого топлива в виде водотопливных эмульсий и суспензий [1...7].

Горение жидкого топлива всегда протекает в паровой фазе, а испарение обеспечивается подводом тепла из зоны горения его паров. В различных двигателях, камерах сгорания и топках жидкое топливо всегда сжигается в распыленном виде. Доказано, что сущность процессов горения факела распыленного жидкого топлива в значительной мере определяется движением и горением отдельных капель, их совокупности и условиями взаимодействия горящих и негорящих капель [6; 9].

Крайним случаем горения капель является диффузионное горение, когда скорость сгорания паров очень велика по отношению к скорости диффузии паров и окислителя в зоне горения, толщина которой становится исчезающе малой. К такому режиму может приближаться горение сравнительно крупных капель. В диффузионной теории горения, развитой Г. А. Варшавским [8], совместно решаются уравнения диффузии и теплообмена, при этом учитывается расход тепла на испарение и перегрев паров. Это относится к горению сравнительно крупных капель, диаметром 0,5...1,0 мм и больше, когда режим горения в принципе может приближаться к диффузионному. Однако при горении таких капель скорость горения паров в действительности получается не слишком большой по сравнению со скоростью испарения [9]. Зона горения по расчетам, проведенным в работе [9], оказывается довольно протяженной, горение начинается ближе к поверхности капли, но пары сгорают не полностью (при этом они частично выносятся в окружающую среду), температура оказывается ниже расчетной. Тем не менее это обстоятельство слабо сказывается на самой скорости испарения жидкости, так как к поверхности подводится практически такое же количество тепла, что и при диффузионном горении. Реальный процесс горения паров у

поверхности капли сложен, нагрев паров обеспечивается не только подводом тепла из зоны более высокой температуры, где сгорает основная масса паров, но и реагированием паров с окислителем в зонах, расположенных ближе к поверхности капли. Это формально приводит к понижению теплоемкости.

Мелкие капли топлива диаметром в сотые и десятые доли миллиметра ведут себя в процессе горения иначе, чем крупные капли: они не окружаются собственными факелами, а только испаряются, образуя газопаровую смесь, которая воспламеняется и горит по законам горения газов [4; 7; 8].

При горении крупных капель диаметром 1 мм собственной становится естественная конвекция, в силу которой пламя принимает характерную форму капли, вытянутой кверху. В случае очень мелких капель форма пламени, очевидно, приближается к сферической. Среди характеристик горения капель жидкого горючего основной интерес представляет время сгорания, или время жизни капли. Время сгорания капель жидкого, полностью испаряющегося горючего прямо пропорционально квадрату начального диаметра капли, что отражает основной закон горения капель жидкого горючего. Для обычных углеводородов при начальном диаметре капли 1 мм время сгорания составляет примерно 1 с. Если принять, что закон горения справедлив также и в случае гораздо более мелких капель, то при начальном диаметре порядка нескольких десятков микрометров время сгорания, по оценке, составит несколько миллисекунд. По данным Б. Л. Жаркова (1962), время воспламенения мазутных капель размером 0,5...1,5 мм при их сжигании в потоке воздуха, нагретого до 1200 К и движущегося со скоростью около 3 м/с, составляет примерно 0,3...0,5 с [4].

Время пребывания капли топлива $\tau_{\text{пр}}$ в объеме топки не может быть определено однозначно для всех капель топливного факела, так как они движутся по разным траекториям. Наиболее просто $\tau_{\text{пр}}$ определяется для капель, траектории движения которых совпадают с осью топки и, следовательно, с общим направлением движения продуктов горения. В этом случае [4]

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\Psi V_T^r}{Q_s},$$

где Ψ – коэффициент заполнения топки; V_T^r – объем топки выше уровня горелок; Q_s – секундный расход газа.

Одновременно с экспериментальными исследованиями имеются также и теоретические исследования горения жидких капель. Продолжающиеся попытки аналитически описать процессы в топке имеют целью создание основ более точного технического расчета процессов скорости сгорания, тепловыделения и всего топочного процесса.

Постановка задачи и описание математической модели процесса горения. Теоретическим и практическим вопросам горения посвящено довольно много работ, в том числе вопросу горения капли жидкого топлива. При этом считается [8], что пары топлива сгорают в весьма тонком сферическом слое радиуса r_g , который называется зоной горения. Скорость горения определяется подводом к зоне горения кислорода извне и паров топлива изнутри. Такой подход позволяет вычислить скорость испарения капли, температуру в зоне горения, радиус зоны горения, температуру капли. В практически важных случаях температура капли оказывается близкой к температуре кипения. Данная теория развита для случая молекулярных процессов горения [8]. Ее можно распространить и на случай конвективного тепло- и массообмена. Однако в этом случае она встречается с серьезными трудностями, так как экспериментально установлено, что температура в зоне горения значительно ниже расчетной [10].

Имеются некоторые расхождения в математических методах анализа, используемых разными авторами, но для стационарного сферического горения используется единый подход. В целях упрощения анализ проводится при следующих предположениях [9; 10]:

- 1) жидкая капля имеет сферическую форму;
- 2) влиянием конвекции пренебрегают, пламя рассматривают как сферическую поверхность, концентрическую с каплей;
- 3) пламя считают разновидностью диффузионного пламени, которое образуется в результате реакции между парами горючего и воздухом, которые реагируют в стехиометрическом соотношении;
- 4) стационарное состояние рассматривают при постоянном диаметре капли, хотя реально диаметр жидкой капли уменьшается по мере горения, однако это изменение происходит медленно по сравнению с изменением скорости диффузии и прочими факторами;
- 5) температура капли одинакова по всему объему;
- 6) давление в течение всего процесса горения считается постоянным;
- 7) влияние излучения рассматривают отдельно.

В качестве объекта исследования была выбрана трубчатая печь, широко распространенная в нефтехимических производствах [10]. Исходя из законов механики сплошных сред, можно составить модель нестационарного горения, представленную тремя уравнениями: уравнением непрерывности, уравнением сохранения импульса и уравнением сохранения энергии

1. Уравнение непрерывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0, \text{ или } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial l} = 0, \quad (1)$$

где t, l – независимые переменные; ρ – массовая плотность смеси; $\vec{u}$ – скорость движения смеси. Если иметь в виду покомпонентную модель процесса горения в камере печи, то уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho x u) = -\frac{\rho x}{\tau}, \text{ или } \frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x u)}{\partial l} = -\frac{\rho x}{\tau}, \quad (2)$$

где x – концентрация горючего вещества в смеси ($0 \leq x \leq 1$); τ – время сгорания, которое зависит от температуры в смеси.

Если принять, что $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости в капле, то масса капли $m = \rho_{\text{ж}} \Omega$, где $\Omega = \frac{4}{3} \pi a^3$ – объем капли; a – радиус капли. Пусть n – концентрация капель в смеси, тогда $nm = \rho x$, $n = \frac{\rho x}{m}$.

2. Уравнение сохранения импульса для одномерного процесса выглядит следующим образом:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) + \nabla p = 0, \text{ или } \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial l} \right) + \frac{\partial p}{\partial l} = 0. \quad (3)$$

3. Уравнение сохранения энергии

$$\rho T \left(\frac{\partial S}{\partial t} + u \nabla S \right) = \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T), \text{ или } \rho T \left(\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial l} \right) = \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T), \quad (4)$$

где q – теплота сгорания; $Q(T)$ – потери на излучение; S – энтропия, причем $S = C_v \ln \frac{p}{p^\gamma}$, здесь $\gamma = 1, 0 \dots 1, 4$, так как для жидкостей различие между C_p и C_v незначительно.

Таким образом, одномерная математическая модель нестационарного горения капли может быть представлена следующей системой:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial l} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x u)}{\partial l} &= -\frac{\rho x}{\tau}, \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial l} \right) + \frac{\partial p}{\partial l} &= 0, \\ \rho T \left(\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial l} \right) &= \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T). \end{aligned} \quad (5)$$

Стационарная модель процесса горения следует по (5). В этом случае уравнения могут быть значительно упрощены. При этом $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, первое слагаемое в левых частях уравнений (5) обращается в ноль и $\frac{\partial}{\partial l} \rightarrow \frac{d}{dl}$, так как остается лишь одна независимая переменная. Уравнение (1) может быть проинтегрировано, что приводит к простой форме уравнения неразрывности:

$$\begin{aligned} \rho u &= M - \text{const}, \\ \frac{d}{dl}(\rho u x) &= -\frac{\rho x}{\tau}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение сохранения количества движения может быть приведено к интегральному виду в случае плоского установившегося одномерного течения. Оно сводится к уравнению

$$\rho u \frac{du}{dl} + \frac{dp}{dl} = 0,$$

которое имеет интеграл $\rho u^2 + P = \text{const} = \Pi$. Тогда уравнение сохранения энергии переписывается в виде

$$C_v \rho T u \frac{d \ln \frac{p}{p^\gamma}}{dl} = \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T).$$

Запишем систему, полученную с учетом первого уравнения этой системы:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dl} &= -\frac{x}{u\tau}, \\ Mu + P &= \Pi - \text{const}, \\ M \frac{d}{dl} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma u P}{(\gamma - 1)M} \right) &= \frac{Mx}{u\tau} q - Q(T). \end{aligned} \quad (7)$$

Третье уравнение системы (7) сократим на M и получим

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dl} &= -\frac{x}{u\tau}, \\ \frac{d}{dl} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma u P}{(\gamma - 1)M} \right) &= \frac{x}{u\tau} q - \frac{Q(T)}{M}. \end{aligned} \quad (8)$$

Система (8), состоящая из обыкновенных дифференциальных уравнений, теперь может быть разрешена относительно скорости движения смеси и концентрации горючего вещества в смеси по длине камеры сгорания. Это решение может быть использовано для получения других параметров печи, которые зависят от x и u .

Формулировка и метод решения краевой задачи Коши.

Для определения x и u как функций длины в камере сгорания можно сформулировать задачу Коши, задавая значения x и u на входе в камеру сгорания.

Начальные условия при $0 \leq l \leq L$ следующие:

$$\begin{aligned} x(0) &= \alpha_1, \\ u(0) &= \alpha_2, \\ \frac{dx}{dl} &= -\frac{x}{u\tau}, \\ \frac{du}{dl} &= \frac{Mqx(\gamma - 1) - u\tau Q(T)(\gamma - 1)}{u\tau(M(\gamma - 1) + \gamma P)}. \end{aligned}$$

Для системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dy_i}{dx} = f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_n), \quad x_0 \leq x \leq X \quad (9)$$

применяем программу пошагового интегрирования, выполненный методом Кутты–Мерсона, который имеет вид

$$\begin{aligned} R_1 &= hf(x_0, y_0), \quad y_0 = y(x_0), \\ R_2 &= hf\left(x_0 + \frac{1}{3}h, y_0 + \frac{1}{3}R_1\right), \\ R_3 &= hf\left(x_0 + \frac{1}{3}h, y_0 + \frac{1}{6}R_1 + \frac{1}{6}R_2\right), \\ R_4 &= hf\left(x_0 + \frac{1}{2}h, y_0 + \frac{1}{8}R_1 + \frac{3}{8}R_2\right), \\ R_5 &= hf\left(x_0 + h, y_0 + \frac{1}{2}R_1 - \frac{3}{2}R_3 + 2R_4\right), \\ y^1(x_0 + h) &= y_0 + \frac{1}{2}R_1 - \frac{3}{2}R_3 + 2R_4, \\ y^2(x_0 + h) &= y_0 + \frac{1}{6}R_1 + \frac{2}{3}R_4 + \frac{1}{6}R_5. \end{aligned} \quad (10)$$

Величина $R = 0,2(y^1 - y^2)$ служит для оценки погрешности метода и для автоматического выбора интегрирования. Если ε – предписанная точность вычисления, то шаг интегрирования выбирается следующим образом. Берется некоторый начальный шаг и производятся вычисления по формулам (10). Определяется величина R : при $R > \varepsilon$ шаг интегрирования в два раза уменьшается; при $R \leq \frac{\varepsilon}{64}$ шаг в два раза увеличивается; если

же $\frac{\varepsilon}{64} < R \leq \varepsilon$, то шаг считается выбранным правильно.

После этого в качестве начальной точки x_0 берется точка $x_0 + h$ и весь цикл повторяется снова. В качестве приближенного решения выступает величина y^2 , а величина y^1 носит вспомогательный характер. Описанный выше метод оценки погрешности и выбор шага интегрирования называется методом вложенных фигур. Программа состоит из главной программы и двух подпрограмм (рис. 1).

Главная программа обращается к подпрограмме EKUT, которая выполняет интегрирование вместе с подпрограммой EF, используемой для записи величины $\frac{dy_i}{dx}$. Главная программа считает текущее значение $x(X)$, требуемую точность (ACC), число вводимых дифференциальных уравнений (NEQS), шаг, с которым выполняется интегрирование (INSTER), и соответствующую величину y в точке $x(y)$.

В подпрограмме EKUT дифференциальные уравнения раскрываются до пятого порядка, получаемая точность оценивается с помощью вычисления разницы между четвертым и пятым членами. При каждом повторении эта разница сравнивается с требуемой точностью. Если последняя не достигается, то длина шага уменьшается и интервал покрывается за большее число шагов. Подпрограмма EKUT обычно начинается с логической переменной START, равной TRUE. В этом случае y полагается равным INSTER / NSREQD. Тогда интегрирование, выполняемое с заданной точностью, будет повторено снова для получения меньшей погрешности. При выходе из подпрограммы EKUT величина START всегда имеет значение FALSE. Требуемые величины возвращаются в массив SOLN.

По составленной программе были проведены расчеты горения капель различного диаметра для решения задачи Коши с начальными условиями: $x(0) = 0,346$, $u(0) = 1,0$ м/с.

Капли с диаметром 0,01 мм имеют время сгорания $D = 0,00011$ с и потери на излучение $Q = 0,00001498$ Дж/с; капли с диаметром 0,1 мм – $\tau = 0,011$ с и $Q = 0,001498$ Дж/с; капли с диаметром 1 мм – $\tau = 0,7$ с и $Q = 0,1498$ Дж/с; капли с диаметром 2 мм – время сгорания $\tau = 2,3$ с и $Q = 0,27818$ Дж/с. В задаче использовались и постоянные величины: давление $P = 101000$ Па, теплота сгорания $q = 26000000$ Дж/кг (с учетом диссоциации продуктов сгорания), массовый расход $M = 144$ кг, $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,1$.

В заключение можно отметить, что при правильно принятых физических предпосылках результаты решения дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемые процессы, могут отражать общий ход этих процессов и меру влияния отдельных факторов на их протекание. Качественный анализ полученных соотношений и зависимостей может явиться основой для построения (уточнения) физической модели горения жидкого топлива, моделирования и оптимизации сложных процессов разделения и систем управления.

Результаты проведенных расчетов показывают, что скорость горения и концентрация горючего вещества по длине печи, как и потерянное излучение, существенно зависят от размеров капель топлива (рис. 2, 3). Наилуч-

шие параметры горения имеют капли диаметром 1 мм, причем по скорости горения для этих капель наблюдается локальный максимум.

Целью дальнейших исследований станет накопление, анализ и обобщение результатов работ в области горения жидких топлив и обоснованный выбор требующихся параметров для решения задач оптимизации и управления распределенными системами в направлении повышения эффективности топочных процессов.

Библиографический список

1. Лавров, Н. В. Процессы горения топлива и защита окружающей среды / Н. В. Лавров, Э. И. Розенфельд, Г. П. Хаустович. М. : Металлургия, 1981. 240 с.
2. Кулагин, В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации : автореф. дис.... д-ра техн. наук / В. А. Кулагин; Краснояр. гос. техн. ун-т. Красноярск, 2004. 47 с.
3. Балабышко, А. М. Гидродинамическое диспергирование / А. М. Балабышко, А. И. Зимин, В. П. Ружицкий. М. : Наука, 1998. 331 с.

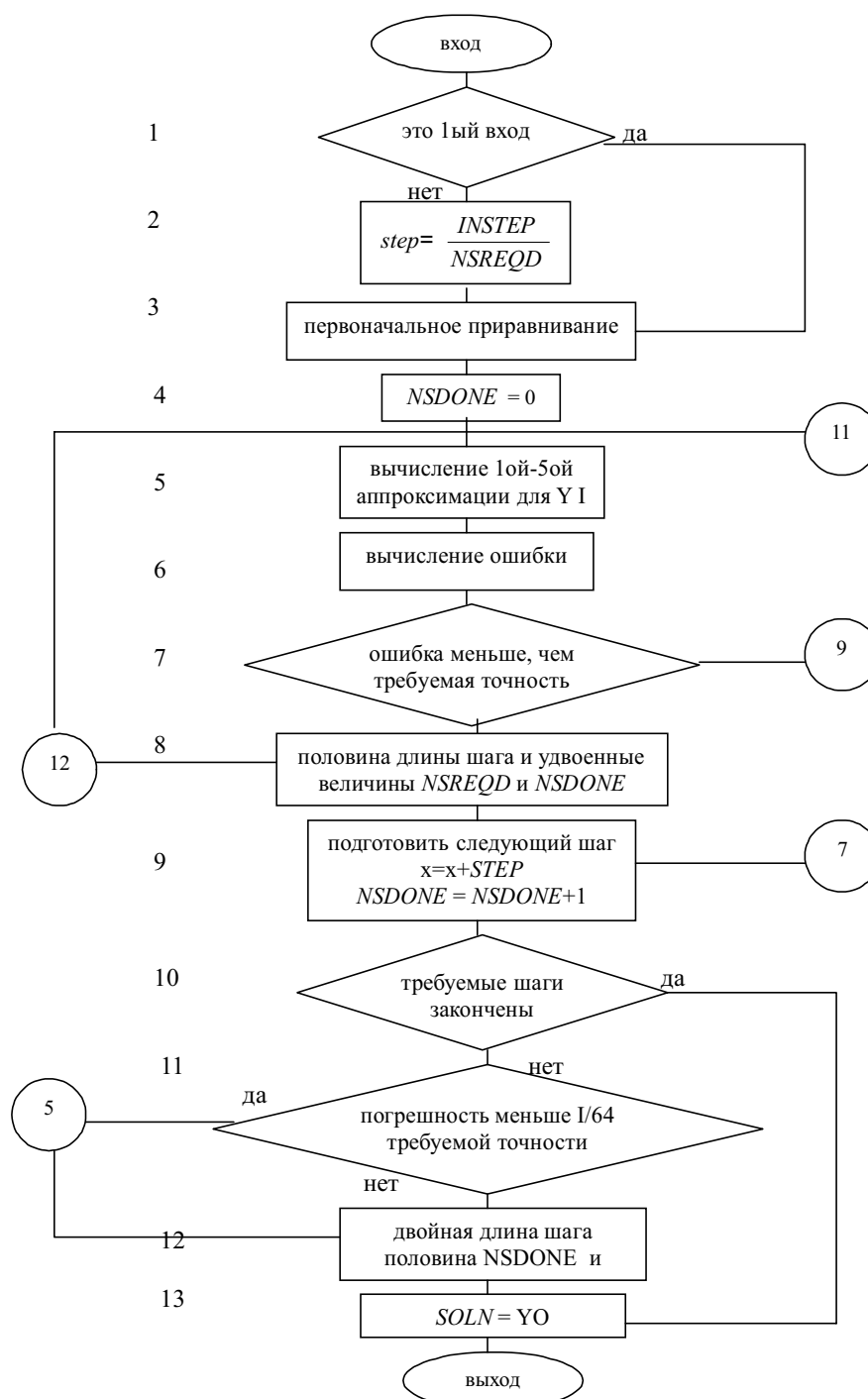


Рис. 1. Блок-схема численного решения задачи Коши методом Кутты–Мерсона

4. Ахмедов, Р. Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив / Р. Б. Ахмедов, Л. М. Цирульников. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1984. 283 с.

5. Справочник по котельным установкам: Топливо. Топливоприготовление. Топки и топочные процессы / А. Н. Алехнович, В. И. Антоновский, Д. Б. Ахмедов и др. ; под общ. ред. М. И. Неуймина, Т. С. Добрякова. М. : Машиностроение, 1993. 392 с.

6. Ведрученко, В. Р. Анализ динамики преобразования капель в факеле водомазутной эмульсии как топливе для котельных установок / В. Р. Ведрученко, В. В. Крайнов, А. В. Казимиров // Проблемы энергетики. 2003. № 11–12. С. 44–53.

7. Кулагина, Л. В. Анализ теплофизических и гидродинамических процессов при сжигании различных видов топлива в энергетическом котле КВ-ТМ-180-150-2 / Л. В. Кулагина // Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения : материалы конф. Вып. X. Красноярск, 2004. С. 29–46.

8. Вильямс, Ф. А. Теория горения / Ф. А. Вильямс. М. : Наука, 1971.

9. Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация тепломассообменных процессов в химической технологии / Н. Д. Демиденко. М. : Наука, 1991. 240 с.

10. Демиденко, Н. Д. Управляемые распределенные системы / Н. Д. Демиденко. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1999. 393 с.

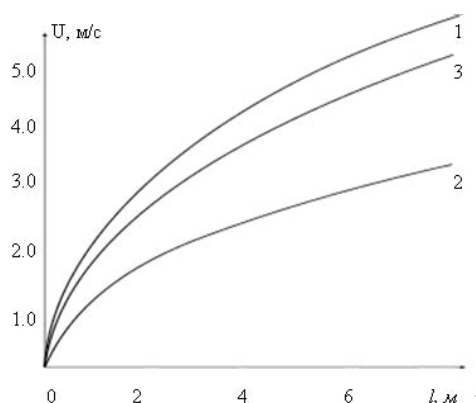


Рис. 2. Изменение скорости горения смеси по длине печи: 1 – диаметр капли 1 мм; 2 – диаметр капли 2 мм; 3 – диаметр капли меньше 1 мм

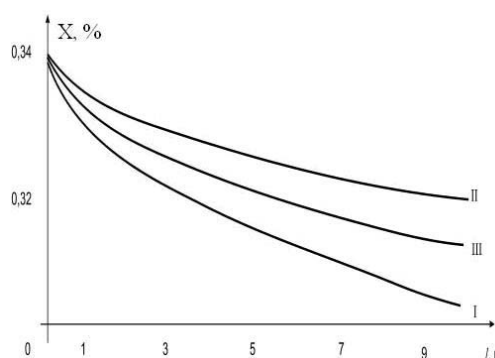


Рис. 3. Изменение концентрации горючего вещества по длине печи: 1 – горение капель диаметром 1 мм; 2 – диаметром 2 мм; 3 – диаметром менее 1 мм

N. D. Demidenko, L. V. Kulagina

THE MATHEMATICAL SIMULATING OF PROCESSES OCCURING IN TECHNOLOGICAL FURNACES

Theses deal with a mathematical model and a solution method applied in liquid fuel burning processes of tubular furnaces in petroleum-refining and petrochemical industry. The physical interpretation of results has been executed.

ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Рассматриваются реологические особенности рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке, приводится методика определения параметров сдвигового течения рабочей среды с учетом ее вязкоупругих свойств и формулируются основные принципы влияния реологических свойств рабочей среды на условия контакта микровыступов абразивных зерен с неровностями поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Абразивно-экструзионная обработка (АЭО) представляет собой процесс сдвигового течения рабочей среды (РС) в обрабатываемых каналах сложной геометрии в неизотермических условиях. При данном процессе происходят контактные взаимодействия обрабатываемой поверхности и рабочей среды на уровне микронеровностей. При этом среда представляет собой нелинейную вязкоупругую жидкость (полимер), наполненную абразивными частицами.

К настоящему времени накоплен большой объем экспериментальных исследований АЭО деталей летательных аппаратов (ЛА) и технологической инструментальной оснастки, характеризующихся наличием сложнопрофильных поверхностей. Результатами этих исследований в основном являются рекомендации по технологии обработки конкретных деталей, основанные на эмпирических зависимостях, связывающих основные параметры технологического процесса с характеристиками поверхностного слоя: величиной и направлением шероховатости и микротвердости.

Основными параметрами технологического процесса АЭО являются объем рабочей среды $Q_{рс}$, давление гидравлической системы установки в продавливающем $P_{вх}$ и принимающем $P_{вых}$ рабочем цилиндре установки для АЭО, величина B_a и процентное содержание (концентрация) K_a абразивного зерна в рабочей среде, а также количество циклов обработки $N_{ц}$. Большое влияние на качество и производительность процесса оказывают геометрические характеристики обрабатываемого канала: его радиус R и длина L , площадь $S_{поп}$ и периметр $\Pi_{поп}$ поперечного сечения, а также исходные физико-механические характеристики поверхностного слоя.

Практика показывает [1], что имеющиеся эмпирические зависимости не всегда возможно использовать для создания технологии АЭО деталей с другими геометрическими характеристиками. В этом случае наблюдается изменение скорости потока ω и давления среды P в обрабатываемом канале, а следовательно, изменение условий обработки. Эти изменения подчиняются определенным закономерностям, определяющим реологические свойства РС. Поэтому качество и производительность АЭО зависят как от характеристик обрабатываемых каналов, так и реологических свойств полимерной основы РС.

Для расчета условий контактных взаимодействий необходим обоснованный выбор теоретических основ перемещения рабочей среды в обрабатываемом канале.

Среди различных механических свойств полимерных систем, находящихся в текучем состоянии, наиболее важным в практическом отношении свойством является вязкость, измеряемая при сдвиговом течении [2]. Обычно вязкостью называют коэффициент пропорциональности

между касательным напряжением τ и градиентом скорости $\dot{\gamma}$ при простом сдвиге:

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}. \quad (1)$$

Для многих жидкостей, называемых в реологии ньютоновскими, коэффициент η является константой вещества, зависящей от температуры и давления, а не от условий измерения. В то же время для полимерных систем отношение $\tau / \dot{\gamma}$ может зависеть от скорости и напряжения сдвига и механической предыстории систем. В этих случаях данное отношение называют эффективной вязкостью. Среда, у которых вязкость зависит от режимов деформирования, называют аномально вязкими, или неньютоновскими.

Для аномально вязких систем понятие вязкости имеет однозначный смысл при их установившемся течении, когда вся нарастающая деформация оказывается необратимой.

Наиболее простой является модель ньютоновской жидкости (рис. 1), для которой характерна линейная зависимость скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от напряжения сдвига τ (кривая течения 1). Расчет распределения скоростей и давлений потока от перепада давлений ΔP на входе и выходе канала можно произвести на основе уравнений Навье–Стокса. Кривые 2, 3 и 4 характерны для течения аномально вязких жидкостей, имеющих в состоянии покоя достаточно жесткую пространственную структуру, которая нарушается только после достижения определенного значения напряжения сдвига τ_0 . Бингамовские пластики (кривая 2) после достижения величины τ_0 ведут себя как ньютоновские жидкости:

$$\tau = \tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}. \quad (2)$$

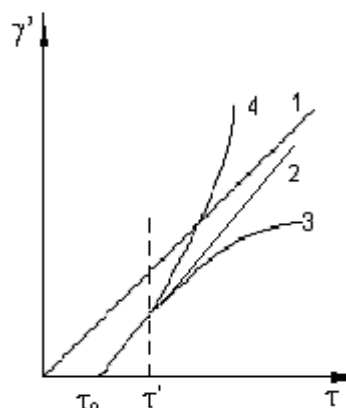


Рис. 1. Зависимость скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от напряжения сдвига τ : τ_0 — напряжение, после которого начинает течь аномально вязкие жидкости; τ' — напряжение, после которого начинается зона аномальной зависимости $\dot{\gamma}$ от τ ;
1 — ньютоновская жидкость; 2 — бингамовский пластик;
3 — тиксотропная жидкость; 4 — дилатантная жидкость

Для расчета параметров потока рабочей среды при АЭО наибольшее распространение получила модель бингамовского пластика, или модель вязко-пластического тела Шведова–Бингама. Ее реологическое уравнение было предложено К. Хренемзером и В. Прагером как комбинация уравнений модели идеально пластического тела Сен-Венана и модели идеально вязкой жидкости Ньютона.

Характерной особенностью реологии высокомолекулярных жидкостей при течении, которая вызвана разностью давлений, является образование в центре канала зоны, в которой отсутствует напряжение сдвига. Иными словами, некоторая центральная часть потока движется как жесткий недеформируемый стержень, окруженный слоем деформирующейся жидкости [3].

При рассмотрении возникновения касательных напряжений при течении бингамовских жидкостей в круглом канале предложено уравнение расчета радиуса ядра при условии установившегося течения [4]:

$$r_y = R - \sqrt{\frac{\omega_y \cdot 2L \cdot \eta_{пл}}{\Delta P}}, \quad (3)$$

где ω_y – скорость слоев в зоне, $d\omega/dr = 0$; $\eta_{пл}$ – коэффициент пластической вязкости.

Однако до настоящего времени все еще нет теоретического обоснования зависимости составляющих сил резания при АЭО от величины r_y .

Использование модели бингамовского пластика позволяет сделать расчетную оценку таких напорно-расходных характеристик РС при абразивно-экструзионной обработке, как скорость потока ω , эффективная вязкость среды η , величина скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и касательных напряжений τ .

Модель бингамовского пластика характерна для низкомолекулярных полимеров или для деформации высокомолекулярных полимеров при низких напряжениях сдвига [2]. Для высокомолекулярных соединений, к которым относится кремнийорганическая полимерная основа РС для АЭО, характерно проявление аномальности зависимости $\dot{\gamma}(\tau)$. При этом аномальность свойств неньютоновских сред характеризует индекс течения n , являющийся показателем степени отклонения характера течения среды от ньютоновского, для которого $n = 1$.

В работе [5] отмечено, что величина ядра существенно зависит от n . Для бингамовских пластиков $n = 1$, так как эффективная вязкость не зависит от скорости сдвига. Для псевдопластических жидкостей и тиксотропных сред $n > 1$, в этом случае эффективная вязкость η уменьшается с увеличением скорости сдвига. Для дилатантных жидкостей $n < 1$, здесь эффективная вязкость увеличивается с увеличением скорости сдвига.

Модель бингамовского пластика не учитывает наличие нормальных напряжений при сдвиговом течении полимера, т. е. его упругих свойств. В общем случае для неньютоновских жидкостей при сдвиге полный тензор напряжений можно записать в виде

$$\{\sigma\} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Таким образом, при простом сдвиговом течении, кроме касательных напряжений σ_{12} и σ_{21} , могут возникать и нормальные напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} . Существование не-

равных нулю диагональных компонент тензора напряжений (4) представляет собой специфическую особенность реологических свойств полимерных систем. Эти напряжения отвечают за упругую деформацию, накапливаемую в полимере при сдвиговом течении как в псевдопластиках, так и истинно тиксотропных средах.

Наличие нормальных напряжений при деформации рабочей среды обуславливает ряд специфических свойств полимерной основы. В частности, уже при небольших скоростях потока наблюдается эффект упругого восстановления струи. По сравнению с гидроабразивной обработкой при АЭО значительно увеличивается степень закрепления абразивных частиц с полимерной основой рабочей среды [6].

Для расчета производительности АЭО по изменению размеров обрабатываемого канала, его шероховатости и микротвердости необходимо знать значения сил, возникающих при массовом микроконтакте неровностей поверхностного слоя детали и микровыступов абразивных зерен. Величина составляющих сил резания или смятия материала определяется возникающими касательными и нормальными напряжениями в среде при сдвиговом течении.

Методика определения параметров сдвигового течения рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке состоит в следующем.

Первоначально находят напорно-расходные характеристики РС выбранного состава. Для этого экспериментально определяют ее плотность ρ . Далее, используя специальное приспособление, моделирующее капиллярный вискозиметр непосредственно на установке для АЭО, опытным путем измеряют величины максимальной скорости потока $\omega_{\max}$ и перепада давлений ΔP на участке длиной L и радиусом R . Используя преобразованную формулу Пуайзеля, вычисляют эффективную вязкость среды η :

$$\eta = \frac{\Delta P}{\omega_{\max}} \frac{R^2}{8L}. \quad (5)$$

По известной зависимости объемного расхода среды в круглой трубе, с учетом неразрывности течения $\omega S_{\text{поп}} = \text{const}$, устанавливают величину скорости сдвига

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4\omega S}{\pi R^3} = \frac{4\omega S}{SR} = \frac{4\omega}{R}. \quad (6)$$

Другую нормированную напорно-расходную характеристику – величину касательных напряжений τ – можно получить по зависимости эффективной вязкости

$$\tau = \eta \dot{\gamma}. \quad (7)$$

Следующим этапом является определение зависимости вязкости полимерной РС от ее температуры по уравнению Аррениуса–Френкеля–Эйринга (АФЭ). При известных значениях энергии: активации течения E , газовой постоянной R_i и эффективной вязкости – при заданной температуре T рассчитывается значение коэффициента B :

$$\eta = BT^{3/2} \exp(E/R_i T). \quad (8)$$

Величина начальной вязкости η_0 имеет большое значение для характеристики свойств полимерных систем. Поэтому в тех случаях, когда область практически постоянной наибольшей вязкости экспериментально не дости-

жима, следует обратить особое внимание на метод ее нахождения экстраполяцией зависимости $\eta(P_{\text{вх}})$ к значению $P_{\text{вх}} \rightarrow 0$:

$$\eta = \eta_0 \exp(-\alpha P_{\text{вх}}), \quad (9)$$

где α – эмпирическая постоянная.

Если прологарифмировать зависимость (9) и затем рассмотреть зависимость $\lg \eta$ от $\lg P_{\text{вх}}$, то экстраполяция этой зависимости к $P_{\text{вх}} = 0$ позволяет определить величину η_0 .

Важным моментом является определение численных значений нормальных напряжений, возникающих в РС при АЭО. По отношению (10) устанавливают начальный коэффициент нормальных напряжений:

$$\xi_0 = 0,36\eta_0 / B. \quad (10)$$

Выявив значение ξ_0 , далее определяют коэффициент нормальных напряжений ξ для исследуемой РС:

$$\xi = (\xi_0 / \eta_0^2) \eta^2. \quad (11)$$

Величину нормальных напряжений σ рассчитывают по преобразованной формуле Лоджа

$$\sigma = \frac{2}{G_0} \tau^2 = 2 \left(\frac{\xi_0}{\eta_0^2} \right) \tau^2, \quad (12)$$

или по коэффициенту нормальных напряжений

$$\sigma = \xi(\gamma') 2\gamma'^2. \quad (13)$$

По результатам вычислений строят графики зависимостей $\eta(\gamma')$, $\eta(\tau)$, $\tau(\gamma')$, $\sigma(\gamma')$, $\eta(P_{\text{вх}})$, $\gamma'(P_{\text{вх}})$, $\tau(P_{\text{вх}})$ и $\sigma(P_{\text{вх}})$.

Для расчета сил микрорезания касательные и нормальные напряжения приводят к площади сечения единичного абразивного зерна $S_{\text{аз}} = \pi r^2$, так как рабочая среда воздействует на зерно как целое:

$$P_z = \tau \cdot S_{\text{аз}}, \quad P_y = \sigma \cdot S_{\text{аз}}. \quad (14)$$

По приведенной методике проведено исследование целого ряда рабочих сред различного состава. Например, определена максимальная скорость потока $\omega_{\text{max}} = 0,0204$ м/с сдвигового течения рабочей среды с зернистостью $B_{\text{аз20}}$ в канале радиусом $R = 0,0125$ м и длиной $L = 0,07$ м при $P_{\text{вх}} = 6$ МПа и $\Delta P = 2,7$ МПа [7]. При подстановке полученных значений в уравнение (5) получена величина эффективной вязкости $\eta = 36900$ Па·с.

Подсчитанная по формуле (6) скорость сдвига $\gamma' = 7,68$ с⁻¹ показывает значительное изменение скорости потока от максимального на оси канала (ядре потока) до нулевого на стенке канала. Величина касательных напряжений при этом составила $\tau = 283331$ Па.

Коэффициент B является важнейшей реологической характеристикой полимеров. Его величина в зависимостях $\eta(\gamma')$, $\eta(\tau)$ и $\tau(\gamma')$ характеризует переход в область аномальной вязкости (коэффициент B на рис. 1 находится пересечением кривых течения прямой τ'). Для рабочей среды рассматриваемого состава коэффициент $B = 0,015528$. Это значение показывает, что уже при низких сдвигающих напряжениях появляются нормальные напряжения, которые и обуславливают аномальную зависимость эффективной вязкости от напряжения сдвига.

В области температур, близких к температуре стеклования T_g , важное значение для полимеров имеет свободный объем и его изменение в зависимости от температу-

ры [2]. А при достаточно высоких температурах определяющим фактором становится скорость активационных процессов. Поэтому в области температур, близких к T_g , вязкостные свойства полимерных систем хорошо описываются уравнением ВЛФ, а при повышении температуры более точным оказывается уравнение АФЭ (8), учитывающее активационный характер течения. Температура стеклования силиконовых каучуков $T_g = -130$ °С. Таким образом, применение формулы ВЛФ для установления температурной зависимости вязкости полимерной основы при АЭО можно привести к ошибочным данным.

Энергия активации вязкого течения полимеров с достаточно большими молекулярными массами не зависит от молекулярной массы [2]. Наименьшей энергией активации течения отличаются высокомолекулярные соединения с высокой гибкостью цепи и слабым межмолекулярным взаимодействием. К ним и относятся кремний-органические полимеры. Величина энергии активации их течения равна 15 кДж/моль. Введение боковых заместителей в полимерную цепь увеличивает размеры сегмента и вызывает повышение величины E .

Расчеты зависимости вязкости полимерной основы АЭО от ее температуры по уравнению АФЭ (8) возможны при известных величинах B , E ($E = 15$ кДж/моль), ($R = 8,31$ Дж/(моль·К)).

Результаты теоретического расчета зависимости вязкости каучука СКТ от температуры в диапазоне, который характерен для АЭО, приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Результаты расчета зависимости вязкости η рабочей среды от температуры

Температура T , К	Вязкость η , Па·с
143 (стеклование)	8 055 938
253	78 401
273	52 105
293	36 892
303	31 659
313	27 478
333	21 326
353	17 121
373	14 137

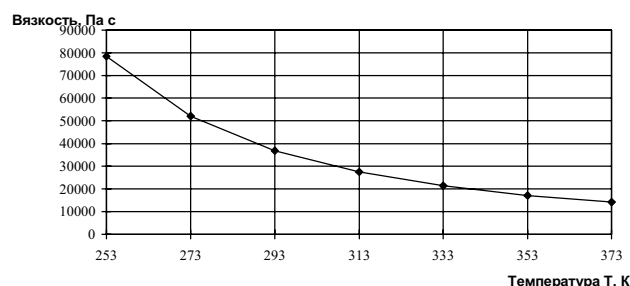


Рис. 2. Расчетная зависимость вязкости рабочей среды от температуры в диапазоне, характерном для АЭО

Рассматривая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что зависимость вязкости рабочей среды от температуры имеет характер экспоненты. Большое влияние на изменение температуры оказывает величина постоянной B , которая определяется молекулярно-массо-

вым распределением (ММР) рабочей среды. Соответственно ММР среды зависит от степени ее наполнения.

При рассмотрении аномалии вязкости во всех теориях принимается, что существует предельное значение вязкости, когда скорости и напряжения сдвига стремятся к нулю. При реальных измерениях вязкости это должно отвечать некоторой области достаточно малых τ и γ' , при которых вязкость постоянна и равна ее предельному значению – начальной вязкости.

Теоретические расчеты по формуле АФЭ (8) позволили рассчитать значения вязкости при данном P для других величин температуры рабочей среды. На основе этих данных проведена экстраполяция зависимости вязкости от напряжения сдвига, результаты которой представлены в табл. 2 и на рис. 3. Величина эмпирической постоянной $\alpha = 10^{-6}$.

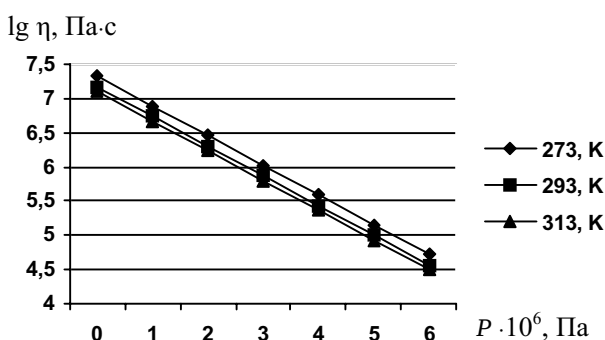


Рис. 3. Определение значений начальной вязкости рабочей среды АЭО при различных температурах

Прямое измерение значений η_0 , достигаемое с ошибкой не выше $\pm 10\%$, показало, что результаты определения значений η_0 методом экстраполяции укладываются в пределы, ограниченные этой ошибкой. Для рассматриваемой среды коэффициент начальной вязкости $\eta_0 = 14,9 \text{ МПа} \cdot \text{с}$. При такой вязкости рабочая среда ведет себя как твердое тело.

Начальный коэффициент нормальных напряжений, определяемый по выражению (10), имеет еще большее значение – $\xi_0 = 345 \text{ МПа} \cdot \text{с}^2$, а коэффициент нормальных напряжений для данной среды $\xi = 2120 \text{ Па} \cdot \text{с}^2$. Величина нормальных напряжений $\sigma = 250100 \text{ Па}$.

Для абразива зернистостью 320 мкм приведенная площадь единичного зерна $S_{\text{аз}} = \pi r^2 = \pi \cdot 0,0016^2 = 8,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Тогда по формуле (14) следует, что $P_z = 2,28 \text{ Н}$, $P_y = 2,01 \text{ Н}$.

Приведенная методика позволяет связать реологические характеристики РС при АЭО с возникающими силами резания, а величина рассчитанных значений P_z и P_y

подтверждает возможность применения АЭО для обработки любых материалов (для сравнения: величина сил резания P_{yz} , определенных по методике [8], в зоне контакта активного абразивного зерна с поверхностью при течении РС оказались настолько малы ($P_{yz} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$), что при максимальных размерах активного абразивного зерна и максимальном давлении в гидравлическом потоке РС не возможно не только резание, но и пластическая деформация материала).

Следует отметить, что размер нормальной составляющей силы резания, рассчитываемый по предложенной методике, еще ниже, чем суммарный.

Таким образом, расчеты режимов АЭО по модели вязкопластического тела остаются в пределах допустимой погрешности только для скорости потока. При расчете давления в канале и сил резания возникает значительная погрешность, так как эта методика не учитывает влияния нормальных напряжений. При обработке каналов с переменной или некруглой формой сечения деформация рабочей среды значительно больше, чем в случае течения в круглом канале с постоянной формой сечения. Чем больше деформация среды, тем больше значения принимают нормальные напряжения. Погрешность расчета по модели вязкоупругого тела будет еще выше.

В качестве выводов следует отметить, что построение теоретических основ процесса абразивно-экструзионной обработки возможно только на основе реологических особенностей вязкоупругих наполненных сред, влияющих на характер контакта микровыступов абразивных зерен с неровностями обрабатываемого поверхностного слоя, а следовательно, определяющих требуемые параметры технологического процесса обработки.

Применяя основные положения реологии вязкоупругих сред, впервые удалось выявить величину эффективной вязкости, скорости потока и градиента скорости рабочей среды для АЭО, а также рассчитать значения касательных и нормальных напряжений, коэффициентов начальной вязкости и нормальных напряжений в круглом канале. Это позволит провести теоретическую оценку степени закрепления абразивного зерна в среде и уточнить условия микроконтакта зерна с обрабатываемой поверхностью.

Библиографический список

1. Исследование, разработка и внедрение оборудования и технологии экструзионного шлифования каналов в

Таблица 2

Расчетная зависимость вязкости РС от сдвигающего давления при различных температурах

$P, \text{ Па } 10^6$	273		293		313	
	$\eta, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\lg \eta$	$\eta, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\lg \eta$	$\eta, \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\lg \eta$
6	52 105	4,72	36 892	4,57	31 659	4,50
5	141 636	5,15	100 283	5,00	860 58	4,93
4	385 007	5,59	272 597	5,44	233 930	5,37
3	1 046 557	6,02	740 996	5,87	635 888	5,80
2	2 844 837	6,45	2 014 235	6,30	1 728 523	6,24
1	7 733 068	6,89	5 475 258	6,74	4 698 612	6,67
0	21 020 657	7,32	14 883 295	7,17	12 772 152	7,12

деталей : отчет о НИР : 47 / Завод-втуз КПИ. Красноярск, 1988. № ГР 01 870061615. Инв. № 02880054957.

2. Виноградов, Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. М. : Химия, 1977.

3. Уилкинсон, У. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен / У. Уилкинсон ; под общ. ред. А. В. Лыкова. М. : Мир, 1964.

4. Лубнин, М. А. Разработка и внедрение технологии экструзионного шлифования труднодоступных поверхностей деталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / М. А. Лубнин. М., 1987.

5. Торнер, Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. М. : Химия, 1977.

6. Левко, В. А. Влияние нормальных напряжений на процесс абразивно-экструзионной обработки / В. А. Левко // Наука. Технологии. Инновации : тез. докл. Всерос. науч. конф. / Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2003.

7. Левко, В. А. Интенсификация процессов абразивно-экструзионной обработки деталей летательных аппаратов : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 / В. А. Левко. Красноярск, 1998.

8. Сысоев, А. С. Абразивно-экструзионное улучшение качества внутренних поверхностей каналов после электроэрозионной обработки в деталях летательных аппаратов : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 / А. С. Сысоев. Красноярск, 2002.

V. A. Levko

THE RHEOLOGY SINGULARITIES OF ABRASIVE MEDIA FOR ABRASIVE FLOW MACHINING PROCESS

In article, the reology singularities of abrasive media for abrasive flow machining process are considered. The technique of definition of parameters of shift current of an abrasive media in view of its visco-elastic properties are write. It is enunciated main principles of influence rheological properties of an abrasive media by conditions of contact of microprotuberances of abrasive grains with irregularities of a surface stratum at abrasive flow machining process.

АДАПТАЦИЯ И СОВМЕСТИМОСТЬ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрена роль адаптации в обеспечении совместимости современной техники на примерах трибосистем, радиотехнических объектов и кибернетических систем.

Введение. Адаптации как одному из основных показателей совершенства современной техники в научных и инженерных исследованиях уделяется все возрастающее внимание, а результаты довольно широко публикуются [1...9]. Основная цель этих работ – демонстрация используемой и разработанной методологии, а также возможностей и роли адаптации в оптимизации исследуемых объектов. При этом вопрос о связи адаптации и совместимости техники остается открытым.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы установить роль адаптации в обеспечении совместимости техники, получившей название «техническая совместимость» (*compatibility*) [10].

Адаптация трибосистем. В работе [5] рассмотрено явление стабилизации процесса изнашивания, названное структурной приспособляемостью (адаптацией) материалов при трении. Оно связано с закономерным изменением структуры и свойств поверхностных слоев в энергетически выгодном для данных условий направлении, что приводит к устойчивому динамическому состоянию материала по критериям износостойкости и антифрикционности. Работа сил трения $F_{\text{тр}}$ затрачивается в поверхностных слоях материалов ϵ_c :

$$F_{\text{тр}} = Q_{\text{тр}} + \epsilon_c, \quad (1)$$

где $Q_{\text{тр}}$ – теплота, выделяемая при трении.

Величины $F_{\text{тр}}$ и $F_{\text{тр}}/Q_{\text{тр}}$ зависят от внешней нагрузки, скорости относительного перемещения трущихся поверхностей, их материалов, характеристик рабочей среды и других условий трения. При нормальных условиях трения и изнашивания величина ϵ_c не превышает 1 % от силы трения $F_{\text{тр}}$, хотя последняя никогда не переходит полностью в теплоту. При малых значениях ϵ_c процесс находится в динамическом равновесии. Энергия ϵ_c идет в основном на образование вторичных структур, обеспечивающих стабилизацию скорости изнашивания.

Конечно, специалисты-кибернетики, ассоциирующие, например, понятие самоорганизации с понятием искусственного интеллекта, могут категорически возразить специалистам-механикам, что такое простое явление отнесено к высшему классу адаптации. Дело в том, что адаптация – это свойство системы изменять свое поведение с целью сохранения, улучшения или приобретения новых характеристик в условиях меняющейся во времени среды, априорная информация о которой является неполной [1]. Адаптивность проявляется при наличии у системы определенного механизма изменения параметров, стратегии управления или структуры на основе информации, поступающей в процессе функционирования системы, т. е. при взаимодействии ее с другими системами и (или) средой.

В механических системах, относящихся, как правило, к классу так называемых трибосистем, такая адаптив-

ность, разумеется, отсутствует. Тут большее внимание привлекает другое обстоятельство: изложенное свойство трибосистем является важным условием обеспечения совместимости трущихся поверхностей и представляет несомненный интерес для отрасли машиностроения, особенно для специалистов, занятых эксплуатацией станочного парка, автотранспорта и другой техники, структурно содержащей узлы трения.

Адаптация радиотехнических объектов. Более масштабное исследование получила адаптация радиотехнических объектов (РТО) [1]. Здесь разработана даже целая система ее классификации: по месту адаптации в РТО (адаптация на приемной, на передающей стороне и адаптация РТО в целом), адаптация по входному сигналу, по дальности работы, по достоверности приема информации, при смене режимов работы, как компенсация или устранение радиопомех.

Рассмотрим на примере радиотехнического объекта – ретранслятора (см. рисунок) связь адаптации и технической совместимости (ТС). Этот РТО, предназначенный для ретрансляции информации (РИ) и во многом аналогичный радиосистеме целевого назначения (РЦН) космических аппаратов связи (КАС), имеет радиоприемное устройство (РПРУ), радиопередающее устройство (РПДУ), блок преобразования (БП), измеритель параметров среды (ИПС) и устройство управления (УУ). ИПС регулярно выдает в УУ информацию о параметрах среды (ПС), например о помеховой обстановке. УУ принимает решение о необходимых изменениях параметров РТО с целью оптимизации его работы и реализует это решение выдачей управляющих воздействий (УВ) на РПДУ, РПРУ и БП. Контроль их работы осуществляется по анализу контрольной информации (КИ).

Адаптация по входному сигналу используется в РПРУ за счет применения автоматического режима усиления (АРУ) и автоматической подстройки частоты (АПЧ). В результате улучшается частотная избирательность РПРУ, что благоприятно отражается на электромагнитной обстановке (ЭМО) РТО.

Адаптация по дальности представляет наибольший интерес для ТС. Она осуществляется путем изменения мощности РПДУ в соответствии с дальностью L работы. При этом можно получить не только экономию электроэнергии, но улучшить скрытность, а также ЭМО для других радиосредств. С другой стороны, при работе на дальности $L < L_n$ (где L_n – предельная дальность) имеется возможность увеличить скорость V_n передачи информации, т. е. пропускную способность радиолинии. Это выполнимо, так как с уменьшением L возрастает мощность сигнала W_c на входе РПРУ. Как известно по формуле Шеннона, с увеличением W_c повышается V_n [1]. В этом можно убедиться, используя выражения

$$V_{\text{и}} \cong \Delta f \log_2 (W_{\text{с}} / W_{\text{ш}}), \quad (2)$$

$$W_{\text{с}} = B / L^2, \quad (3)$$

где Δf – полоса пропускания; $W_{\text{ш}}$ – мощность шума; B – коэффициент, имеющий постоянную величину при $W_{\text{с}} \gg W_{\text{ш}}$:

$$B = W_0 / A, \quad (4)$$

здесь W_0 – пороговое значение сигнала на входе РПРУ; A – постоянный коэффициент.

После подстановки (4) в (3), а затем во (2) получим выражение

$$V_{\text{и}} \cong \Delta f \log_2 \left[(1 / AL^2) (W_0 / W_{\text{ш}}) \right], \quad (5)$$

по которому видно, что с уменьшением L увеличивается $V_{\text{и}}$. Такой факт можно полноправно рассматривать как улучшение функциональной совместимости (ФС) РТО. Правда, для этого необходимо еще синхронизировать работу радиосредств абонентов с радиосредством РТО.

Адаптация по достоверности приема осуществляется для РТО в целом. Если, например, ухудшается прием за счет действия помех, то уверенный прием обеспечивается повторением сигнала. Такое мероприятие можно считать направленным на поддержание ФС в условиях ухудшения помеховой совместимости. Иногда то же самое достигается и за счет перехода работы РТО на другой диапазон частот.

Адаптацию путем смены режимов работы радиосредств также можно считать мероприятием по поддержанию ФС. Если же при этом проектировщиками решен вопрос по достаточно оперативному поиску оптимального режима передачи информации, то такая адаптация может рассматриваться как мероприятие по повышению помеховой и функциональной совместимости.

Адаптация путем компенсации или устранения радиопомех имеет разнообразные методы и схемные решения,

но в любом случае может считаться мероприятием по повышению помеховой совместимости, так как осуществляется через автоматическую реакцию РТО на помехи и противодействие им. Здесь не исключается возможность улучшения и ФС.

Адаптация технических кибернетических систем. Наибольшее количество работ по адаптации техники принадлежит технической кибернетике [2...4; 6...9]. Проводимые в этой области исследования весьма многочисленны и многогранны, чтобы по затронутым в данной статье вопросам дать хотя бы краткий их анализ. Поэтому остановимся лишь на одной из областей технической кибернетики, а именно: технической диагностике (ТД) [4; 8].

В настоящее время разработан целый ряд методов построения процедур поиска отказов и методов оптимизации этих процедур по различным критериям и показателям. К наиболее совершенным из их числа относятся методы теории распознавания отказов (РОт). Задача РОт как задача диагностирования заключается в определении состояния объекта (задача наблюдения состояния) и отнесении его к одному из заданных видов технического состояния (задача классификации) [4; 7].

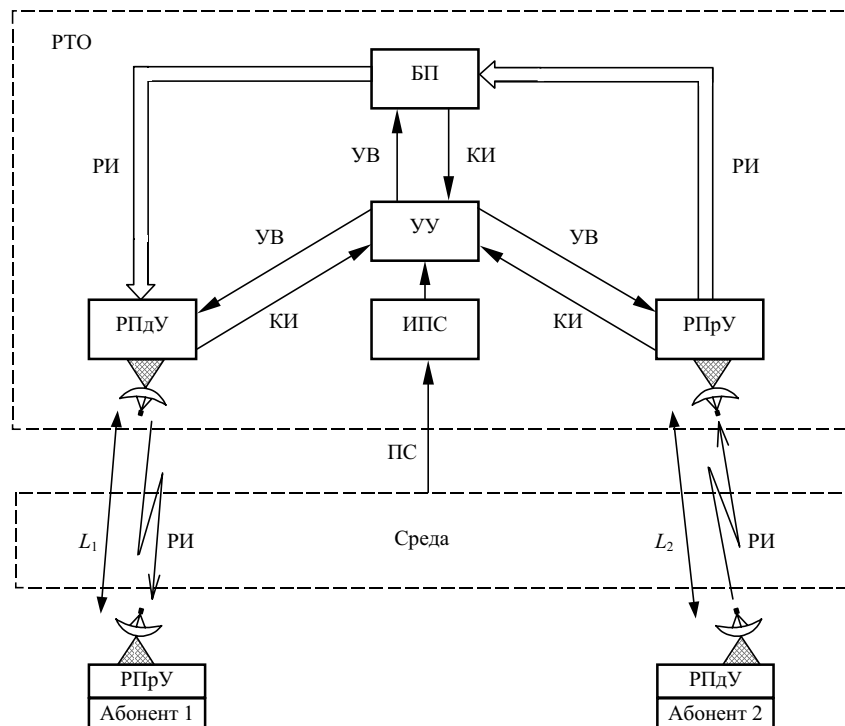
Чтобы более полно ответить на вопрос о связи адаптации и совместимости, необходимо хотя бы кратко остановиться на принципиальной сути процесса РОт [4].

При выполнении задачи наблюдения на основе выходного процесса $y(t)$ определяется неизвестное состояние объекта $z(t)$. В формальном виде эта задача сводится к решению относительно $z(t)$ уравнения

$$\vartheta [t, z(t), x(t), \tau] = y(t), \quad (6)$$

где $x(t)$ – входной сигнал объекта.

Объект диагностирования (ОД) называется наблюдаемым в состоянии $z(t)$ на множестве моментов времени $T = \{\tau\}$ при входном воздействии $x(t)$ и отсутствии воз-



Функциональная схема радиотехнического объекта-ретранслятора (обозначения см. в тексте)

мущений, если (6) имеет единственное решение. ОД называется полностью наблюдаемым, если это утверждение справедливо для любого

$$z(t) \in Z \subset \mathbb{R}^n, \quad (7)$$

где Z – n -мерное евклидово пространство (пространство состояний ОД); $\mathbb{R}^n$ – множество вещественных чисел.

Задача классификации сводится к определению класса, к которому относится наблюдаемое состояние ОД. Для этого при поиске, например, отказавшего элемента все множество Z состояний ОД разбивается на $m+1$ подмножеств $\check{A}_i (i=\overline{0, m})$, где $\check{A}_0$ – подмножество работоспособных состояний; $\check{A}_i (i=\overline{1, m})$ – подмножества неработоспособных состояний, обусловленных любыми неисправностями одного и того же i -го элемента.

Чтобы решить, к какому подмножеству из $\check{A}_i$ принадлежит конкретное состояние z , необходимо найти расстояние точки до каждого подмножества $\check{A}_i$:

$$\rho(z, \check{A}_i) = \inf_{z_\zeta \in \check{A}_i} \rho(z, z_\zeta) \quad (8)$$

Считается, что состояние z относится к классу z_i , если выполняются условия:

$$\rho(z, \check{A}_i) = \min_{k=\overline{1, m}} \rho(z, \check{A}_k); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho(z, \check{A}_i) &\leq \sup \rho(z'_\zeta, z''_\zeta), \\ z'_\zeta &\in \mathcal{S}_i, \\ z''_\zeta &\in \check{A}_i, \end{aligned} \quad (10)$$

Отображая пространство точек Z_c в пространство выходных сигналов Y , можно каждой области $\check{A}_i$ в пространстве Z_c поставить в соответствие область $\mathcal{S}_i$ в пространстве Y . Тогда изображение распознаваемого состояния можно записать в виде вектора

$$\mathcal{J} = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_l)^T, \quad (11)$$

в котором компоненты $\Delta_1, \dots, \Delta_l$ есть признаки любого вида.

Для распознавания испытуемого состояния используются заранее сформированные эталонные изображения (ЭИ), число которых равно заданному числу классов состояний ОД. Все ЭИ также представляются в виде векторов

$$\mathcal{J}_i = (\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{il})^T, \quad i=\overline{1, m}, \quad (12)$$

компонентами которых являются некоторые признаки, описывающие свойства данного класса.

Тогда задача классификации (распознавания) состояний ОД формируется следующим образом. Имеется набор классов состояний (или алфавит классов) ОД

$$\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2, \dots, \mathcal{S}_i, \dots, \mathcal{S}_m\}, \quad (13)$$

каждый из которых задан своим эталонным изображением (12). Требуется определить, к какому из классов (13) относится изображение (11) текущего состояния ОД. Математически это сводится к определению вектора $\mathcal{J}_i$ из (12), с которым вектор (11) имеет наибольшее сходство. Решающее правило имеет вид

$$\mathcal{J} \in \mathcal{S}_i \Leftrightarrow \rho(\mathcal{J}, \mathcal{J}_i) \dots = \max_{k=\overline{1, m}} \rho(\mathcal{J}, \mathcal{J}_k) \quad (14)$$

где $\rho(\mathcal{J}, \mathcal{J}_i)$ – некоторая мера сходства сравниваемых век-

торов $\mathcal{J}$ и $\mathcal{J}_i (i=\overline{1, m})$, в качестве которой используют, например, скалярное произведение этих векторов:

$$\rho(\mathcal{J}, \mathcal{J}_i) = (\mathcal{J}, \mathcal{J}_i) = \sum_{j=1}^l \Delta_j \Delta_{ij}. \quad (15)$$

Всякое состояние $\mathcal{J}_i = (\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{il})^T$ ОД случайно, а признаки $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_l$ – случайные величины. Вероятностные характеристики состояний ОД могут быть получены за счет обучения модели распознаванию случайных отказов, которые, как правило, непрогнозируемы.

Все разработанные к настоящему времени алгоритмы обучения сводятся к одной и той же математической схеме: строится некоторая разделяющая функция по «отказам» обучающих векторов $y = (y_1, y_2, \dots, y_l)$ с указанием, к какому классу они принадлежат. В ходе реализации алгоритма обучения по наблюдаемым значениям вектора y получается либо оценка вектора $g(k)$ на очередном k -м шаге, если вектор изменяется дискретно, либо оценка вектора $g(t)$, если он непрерывен. Для дискретного случая алгоритм обучения имеет вид

$$g(k) = g(k-1) - \Gamma(k) \nabla_g \vee [y(k), g(k-1)], \quad (16)$$

где $\Gamma(k)$ – квадратная l -мерная диагональная матрица, элементы которой есть значения $\gamma(k)$, на которые изменяются компоненты искомого вектора g на каждом k -м шаге; ∇_g – градиент случайной функции $\vee[\cdot]$ по g .

Смысл обучения заключается в установлении общих свойств изображений, включенных в один класс, поэтому каждый искомым коэффициент g_{ij} можно считать весовым коэффициентом, показывающим вклад признака y_j в общую меру сходства изображений. При использовании алгоритма (16) практически требуется определить такое число $k = k^*$, которое обеспечивает приемлемую точность установления весовых коэффициентов.

При реализации процедуры обучения, как правило, не стремятся получить точные результаты из-за больших затрат ресурсов. Считается достаточным получить приближенное значение искомого вектора $\tilde{g}$, позволяющего распознавать новые изображения, принадлежность которых к тому или иному классу не установлена. Априорная информация, полученная в результате распознавания этих изображений, используется для уточнения значений вектора $\tilde{g}$ и получения такого его значения g^* , при котором достигается минимальная вероятность ошибочных решений при распознавании. Такой процесс уточнения ранее полученных результатов называется самообучением.

Для осуществления обучения используют физическое или математическое (имитационное) моделирование различных отказов. Для этого в каждый блок заведомо исправного ОД (или его модели) вводятся отдельные дефекты (неисправности), и при этом фиксируются значения всех контролируемых выходных сигналов y_i при подаче на вход ОД сигналов, имитирующих внешние возмущения.

Анализируя изложенные выше материалы на предмет выявления элементов адаптации систем РОТ, можно констатировать наличие их в двух проявлениях. Во-первых, система РОТ, периодически обучаясь или самообучаясь, тем самым приспосабливается к более совершенному выполнению своих задач. Во-вторых, способность к обучению также является одним из проявлений адап-

тивного свойства системы РОТ. Наконец, в обоих проявлениях адаптации повышается функциональная совместимость пар: 1) «ОД – система РОТ» и 2) «система РОТ – система обучения (учитель)».

Таким образом, материалы представленной статьи позволяют, по мнению автора, достаточно полно представить роль адаптации в обеспечении совместимости технических систем. Эффективность адаптации заключается прежде всего в том, что она осуществляется автоматически и направлена на улучшение (в пределе – на оптимизацию) процесса функционирования. В этом и видна связь адаптации с функциональной совместимостью техники. А для радиотехнических объектов хорошо просматривается роль адаптации в обеспечении помеховой совместимости.

Библиографический список

1. Апорович, А. Ф. Проектирование радиотехнических систем / А. Ф. Апорович. Минск : Вышэйш. шк., 1988. 221 с.
2. Вальков, В. М. Автоматизированные системы управления технологическими процессами / В. М. Вальков, В. Е. Вершин. Л. : Политехника, 1991. 269 с.
3. Гитис, Э. И. Техническая кибернетика / Э. И. Гитис, Г. А. Данилович, В. Н. Самойленко. М. : Сов. радио, 1969. 488 с.
4. Дмитриев, А. К. Распознавание отказов в системах электроавтоматики / А. К. Дмитриев. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. 104 с.
5. Костецкий, Б. И. Фундаментальная закономерность самоорганизации технических трибосистем / Б. И. Костецкий // Физ.-мат. науки. Сер. А. 1989. № 4. 124 с.
6. Медведев, А. В. Основы теории обучающихся систем / А. В. Медведев. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 108 с.
7. Непараметрические системы классификации / А. В. Лапко, В. А. Лапко, М. И. Соколов, С. В. Ченцов. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. 240 с.
8. Носенков, А. А. Исследование путей повышения эффективности контроля технического состояния космических аппаратов связи : автореф. дис.... канд. техн. наук / А. А. Носенков. Красноярск, 1979. 23 с.
9. Семенкин, Е. С. Адаптивные поисковые методы оптимизации сложных систем / Е. С. Семенкин, О. Е. Семенкина, С. П. Коробейников ; СИБУП. Красноярск, 1996. 358 с.
10. ГОСТ 30709–2002. Техническая совместимость. Термины и определения. Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. 4 с.

A. A. Nosenkov

THE ADAPTATION AND COMPATIBILITY OF MODERN ENGINEERING

In article the role of adaptation in maintenance of compatibility of modern engineering on examples of tribosystems, radio engineering objects and cybernetic systems is considered.

ИНСТРУМЕНТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМ И СПОСОБОВ ФИНАНСИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Представлены основные положения исследования по финансированию инновационной деятельности на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Выявлены закономерности, принципы финансирования, специфические факторы, влияющие на финансирование инновационной деятельности (ИД) на предприятиях ОПК. Определены основные задачи, влияющие на процесс финансирования и предложены их формализованные модели. Разработана методика определения форм и способов финансирования ИД, включающая основные задачи финансирования.

Сегодня в России все сильнее ощущается потребность в глубоком понимании сущности, закономерностей и специфики развития инновационной деятельности, свидетельством чему служит введение науки и технологий в ранг высших приоритетов государственных интересов. Все большее значение как для развития экономики страны в целом, так и для обеспечения военно-технического и военно-стратегического баланса принимает развитие оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Несмотря на все проводимые реформы, на предприятиях ОПК традиционно сложились формы и способы, отвечающие условиям реализации именно оборонного заказа. В современных же условиях, когда наблюдается его сокращение, а устойчивое функционирование предприятия возможно только при реализации конверсионных программ, обеспечивающих диверсификацию производства, прежние подходы к решению проблемы финансирования инновационной деятельности (ИД) к сожалению, перестают работать.

Сокращение оборонных заказов и неразвитость конверсионных производств, а также рост задолженности по государственному оборонному заказу (ГОЗ) привели к неудовлетворительной структуре капитала предприятий ОПК. Вероятностный характер получения государственного заказа, вызванный его конкурсным распределением, приводит к дополнительным рискам, связанным с его получением. Снижение бюджетного финансирования и недостаточный объем внутренних источников финансирования приводит к снижению потенциалов экономического роста предприятия. Недостаточный уровень собственного капитала сдерживает экономический рост вследствие соответствующих ограничений по привлечению заемного капитала.

Рост инвестиций в инновационную сферу и, соответственно, экономический рост предприятий должны обеспечиваться за счет сбалансированного роста собственного и привлекаемого капитала, что вызвано необходимостью поддерживать структуру капитала. Следовательно, необходимо увеличивать собственный капитал, решая задачу максимизации его прироста. Преобладание государственной собственности в структуре капитала предприятий, сокращение объектов залога, значительные объемы и сроки реализации проектов, а также неудовлетворительная структура капитала и снижение инвестиционной привлекательности на фондовом рынке приводят к ухудшению финансового состояния и сложности привлечения банковских ресурсов.

Учитывая, что при производстве инновационной продукции возникают коммерческие, финансовые и технологические риски, а вероятность получения средств для финансирования проектов в течение длительного периода времени у одного источника мала, следует применять принцип множественности источников финансирования. Таким образом, в связи с невозможностью привлечения одного банковского кредита, необходимо решать задачу формирования портфеля, обеспечивающего диверсификацию рисков как кредиторов, так и заемщиков.

Для определения наиболее важных задач финансирования авторами были выявлены основные закономерности, характерные для предприятий ОПК, и сделана попытка определения принципов, отвечающих этим закономерностям и обеспечивающим решение поставленной цели – устойчивого финансирования инновационной деятельности. Описанные в литературе принципы сохраняют свое значение, но учет специфики предприятий ОПК позволил наряду с общеизвестными принципами финансирования выявить ряд дополнительных принципов:

- компенсации снижения объемов ГОЗ;
- поддержания ликвидности баланса;
- максимальной капитализации текущих финансовых ресурсов;
- синдицированности и диверсифицируемости источников финансирования.

Реализация данных принципов достигается на основе решения следующих задач:

- определения оптимальной структуры капитала;
- формирования графика потребностей в финансовых ресурсах;
- формирования портфеля источников финансирования предприятия.

Вместе с тем решение поставленных задач зависит от различных факторов, имеющих существенное значение для принятия решений по финансированию инновационной деятельности (см. таблицу).

Для выбора метода решения задачи необходимо не только выявить факторы, но и изучить характер их влияния на результат решения каждой из задач. В связи с этим возникает необходимость в систематизации этих факторов по ряду признаков, учитывающих, с одной стороны, особенности инновационного процесса, а с другой – цели финансирования. К этим признакам можно отнести регулируемость, характер информации и релевантность.

На основе комплексного анализа факторов, определяющих процесс финансирования инновационной деятельности и оказывающих существенное влияние на рассматриваемые задачи, сформулированы следующие требования к каждой из них:

– преобладание факторов, имеющих существенное значение для принятия решения и неопределенный характер, приводит к необходимости учета неопределенностей в ходе определения оптимальной структуры капитала;

Зависимость задач финансирования ИД от различных факторов

Основные задачи финансирования инновационной деятельности	Факторы, оказывающие влияние на основные задачи
Определение оптимальной структуры капитала	Рентабельность собственного капитала Налоговый корректор Уровень финансовых издержек за кредит Инфляционный фактор Сумма заемного капитала Сумма собственного капитала
Формирование оптимального графика потребностей в финансовых ресурсах	Структура совокупного капитала Период реализации проекта Финансовые издержки Период окупаемости проекта Период окончания строительства по проекту и начала выпуска продукции Совокупный капитал Задолженность по кредиту Амортизация
Формирование оптимального портфеля источников финансирования предприятия	Величина заемного капитала Разнообразие форм привлекаемых источников Финансовые издержки Бюджетная компенсация Способ выплаты % за кредит Уровень налогообложения Размер кредита Условия выплаты процентов Наличие обеспечения

– при решении задачи формирования графика финансирования необходимо определить такую последовательность реализации проектов, которая бы позволяла обеспечить рост собственного капитала при заданной структуре и в минимальные сроки обеспечить достижение поставленной цели;

– результаты исследования основных форм и способов финансирования инновационной деятельности на предприятиях ОПК, а также анализ тенденции развития финансового рынка позволили сделать вывод о доминирующей роли банковского кредитования при финансировании инновационной деятельности на современном этапе. В связи с этим возникла третья задача, в ходе решения которой необходимо найти такой портфель форм финансирования, при котором достигается минимум стоимости их совокупного привлечения.

Несмотря на существующее разнообразие форм и способов финансирования, предприятия ОПК испыты-

вают сложности в их выборе, обусловленные рядом причин: необходимостью разработки инструментов соответствия той или иной формы требованиям предприятия, определением основных направлений совершенствования существующих форм.

Инструментом решения данной проблемы может стать классификация форм финансирования, осуществляемая по признакам, соответствующим таким параметрам, как сроки погашения, способы взимания процентов, графики кредитования, виды процентных ставок, число кредитов. Опираясь на предложенные признаки, авторы предлагают метод отбора форм, позволяющий сформировать допустимое множество форм финансирования.

В ходе реализации данного метода строится лепестковая диаграмма, позволяющая выделить три принципиально различающиеся области: область приоритетных альтернатив, область удовлетворительных альтернатив и область неудовлетворительных альтернатив (рис. 1).

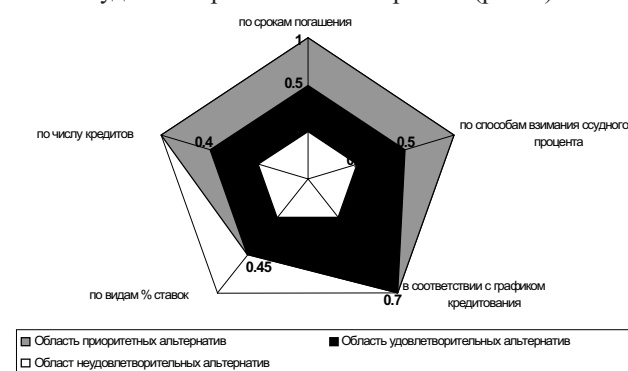


Рис. 1. Области альтернатив в соответствии с определенными весовыми коэффициентами

Первая область соответствует формам, полностью отвечающим требованиям финансирования инновационной деятельности на предприятиях ОПК. Ко второй области относятся формы, в которых хотя бы один из параметров не соответствует предъявляемым требованиям, но при определенных условиях этот параметр может быть принят либо доведен до соответствия. К третьей области относятся формы, не отвечающие предъявляемым требованиям.

Затем проводится систематизация выявленных форм банковского кредита на основе оценки предложенных параметров, позволяющих определить область, к которой относится та или иная форма.

Предложенная методика позволяет определить допустимые формы, а также основные направления совершенствования отдельных параметров. Формы финансирования, относящиеся к зоне возможного достижения полного соответствия, позволяющие как предприятиям, так и финансово-кредитным учреждениям найти направление дальнейшего совершенствования форм финансирования, обеспечивающее согласование интересов кредитора и заемщика.

Выбор конкретных форм из допустимого множества должен осуществляться с помощью специальных приемов и методов, в связи с чем был проведен анализ методов решения поставленных задач и разработаны соответствующие инструменты финансирования инновационной деятельности.

С учетом особенностей отраслевой специфики предприятий ОПК, авторами разработана методика финансирования инновационной деятельности, включающая основные задачи, определенные в ходе исследования, которые влияют на процесс финансирования (рис. 2).

На *первом этапе* формируется поток входящей информации: постановка цели финансирования, параметры инновационных проектов, финансовые планы предприятия, система факторов влияния, в соответствии с которой формируются возможные ограничения.

На *втором этапе* происходит анализ возможностей предприятия по осуществлению финансирования инновационной деятельности и, в связи с необходимостью соблюдения принципа ликвидности баланса и обеспечения инвестиционной привлекательности, формируется оптимальная структура капитала.

Существенное влияние на структуру капитала оказывает уровень инфляции, налоговый корректор, бюджетная компенсация процентов по кредиту, рентабельность

операционной деятельности предприятия, однако эти факторы являются неопределенными. Каждый из этих факторов может находиться в одном из двух состояний: пессимистическом или оптимистическом.

При формировании структуры капитала необходимо использовать вариант, обеспечивающий приемлемый уровень финансовой рентабельности и минимальный риск реализации инновационного проекта. Поэтому предлагается решать данную задачу с учетом неопределенностей на основе теории статистических решений. Преимущество данного подхода заключается в выборе критерия, позволяющего учесть склонность лица, принимающего решение (ЛПР), к риску. Наличие формальных критериев отражения исходной информации позволяет построить модель, адекватную реальности. В результате можно получить оптимальную стратегию, соответствующую структуре капитала при минимальном риске, т. е. оптимальное соотношение собственного и заемного капитала.

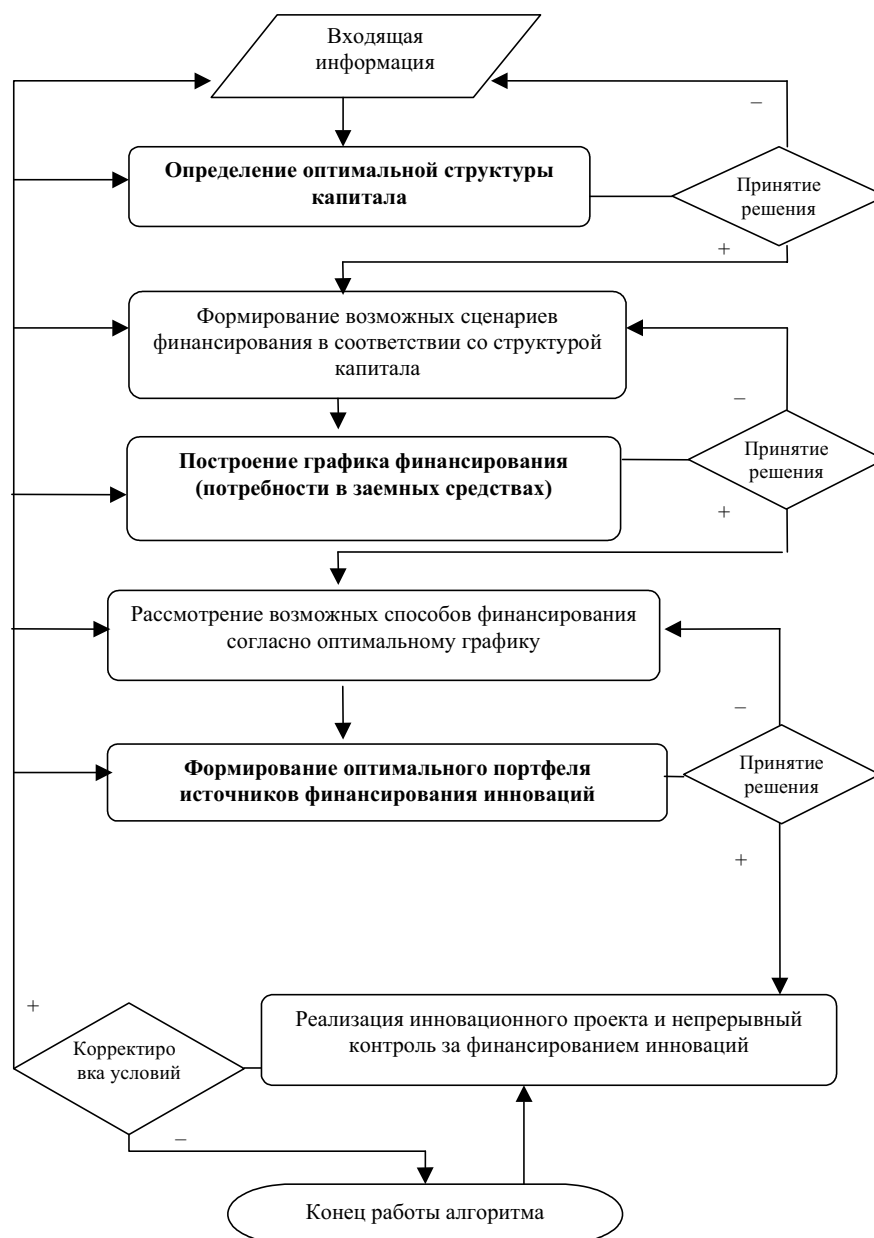


Рис. 2. Блок-схема методики определения форм и построения способов финансирования инновационной деятельности

На *третьем этапе*, в соответствии с оптимальной структурой капитала, возникает необходимость в решении задачи максимизации темпов роста объемов финансирования, в связи с чем формируются возможные сценарии финансирования.

На *четвертом этапе* на основе исходных данных с учетом определенной оптимальной структуры капитала строится оптимальный график потребностей в финансовых средствах в каждый интервал финансирования.

Поддержание оптимальной структуры капитала является сдерживающим фактором в обеспечении экономического роста предприятия. В связи с этим возникает потребность в поиске таких путей реализации инновационной программы на предприятии, которые обеспечивали бы в ходе ее реализации максимизацию прироста собственного капитала и, как следствие, возможность привлечения совокупного капитала для реализации программы в целом. Таким образом, возникает необходимость в определении последовательности реализации проектов, обеспечивающих максимизацию прироста собственного капитала либо минимизацию привлеченных заемных источников финансирования.

Для решения этой проблемы была построена формальная модель, в качестве критерия которой предложена величина задолженности по кредиту (KRZ). Выбор оптимального графика финансирования инновационных проектов осуществляется минимизацией данного критерия: $D = \min_i (KRZ_{N_i})$. В качестве ограничений выступают ограничения по структуре капитала и ограничения, связанные с необходимостью покрытия потребности реализации проектов в рассматриваемом периоде. Сформированный таким образом график финансирования представлен на рис. 3, где можно увидеть количество реализуемых проектов в каждый период (TK_j), общую сумму привлекаемых средств (SOV_j) и соответствующую потребность в заемных источниках финансирования (ZK_i^R).

На *пятом этапе* методики анализируются преимущества и недостатки возможных форм финансирования для развития положительного и нейтрализации отрица-

тельного влияния факторов, на основании чего выбираются или разрабатываются соответствующие финансовые инструменты и операции.

Как уже было отмечено, важнейшим направлением совершенствования форм и способов финансирования инновационной деятельности является развитие синдицированных форм финансирования. На *шестом этапе*, с учетом определенных принципов множественности источников финансирования, синдицированности и диверсифицированности, возникает задача, связанная с определением портфеля привлекаемых заемных форм финансирования в каждом из рассматриваемых периодов графика финансирования, полученного в результате решения предыдущей задачи. Решение данной задачи заключается в нахождении такого портфеля источников, при котором достигается минимум стоимости их совокупного привлечения.

В качестве критерия оценки затрат на кредитование будем использовать сумму выплат по кредиту (PC_j), определяемую на каждом этапе.

Поскольку у каждого финансового источника своя процентная ставка, то величину p_k можно выразить как зависимость от номера кредитного источника $p(u_j)$, где u_j – номер кредитного источника на j -м интервале финансирования $j = 1...n$. Очевидно, что переменные, характеризующие кредитный источник, $u_j, j = 1...n$, можно рассматривать как управляющие переменные. Размер заемных средств S_j будет складываться из потребности в заемном капитале на соответствующем этапе ZK_j и суммы выплат за кредит предыдущего этапа PC_{j-1} .

Требуется найти такой вариант последовательности кредитования (в каком банке и на каком этапе должен быть получен кредит), при котором общая сумма выплат за весь плановый период обращается в минимум:

$$\sum_{j=1}^n PC_j(u_j) \rightarrow \min_{u_j=1,K}$$

На каждом интервале финансирования предприятию необходима лишь часть от общей потребности. Поэтому нет необходимости в получении всей суммы для реализа-

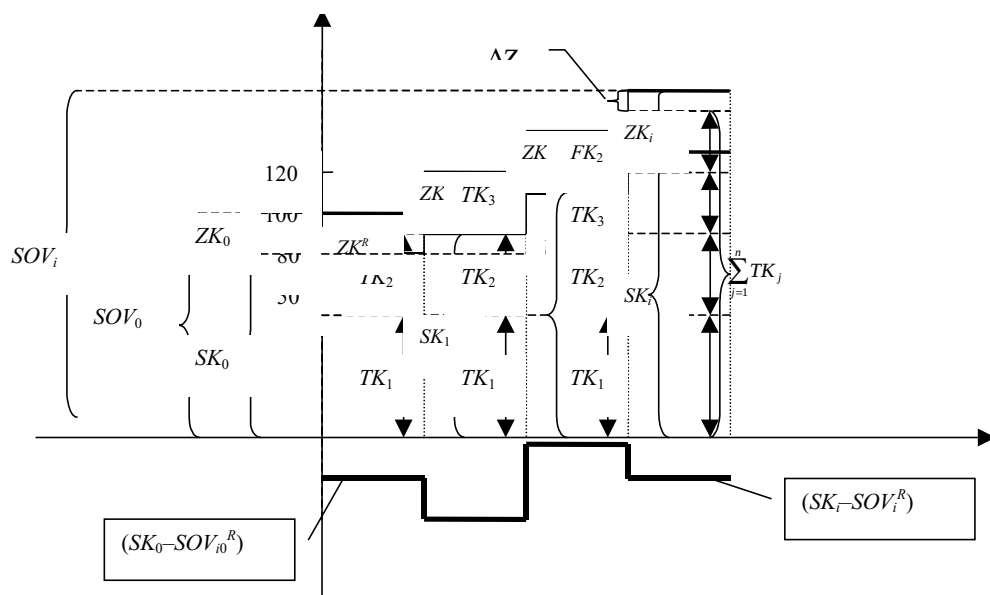


Рис. 3. График финансирования инновационной деятельности, отражающий потребности в заемном капитале

ции проектов сразу. Решение этой задачи заключается в нахождении такого портфеля источников, при котором достигается минимум стоимости их совокупного привлечения. В итоге ЛПР получает оптимальный портфель заемных источников и может осуществлять инновационную деятельность согласно графику, изображенному на рис. 3.

Выбрав приемлемые схемы финансирования, предприятие заключает контракты на привлечение средств и осуществляет контроль за инновационным процессом

(*седьмой этап*) и, если необходимо, корректирует соответствующие финансовые планы (*восьмой этап*).

В заключение отметим, что апробация разработанных инструментов на примере предприятий оборонно-промышленного комплекса подтвердила их адекватность и практическую значимость для принятия решений по определению форм и способов финансирования инновационной деятельности.

Yu. V. Yerigin, O. I. Karelin

THE INSTRUMENTS FOR DETERMINING OF FORMS AND METHODS OF FINANCING OF INNOVATIVE ACTIVITIES AT THE DEFENSE INDUSTRIAL COMPLEX ENTERPRISES

The article is devoted to the basic points, concerning the research on financing of innovative activities at the enterprises of DIC. Laws, financial principles, specific factors which influence the financing of innovative activities at DIC enterprises, have been determined. Major tasks, affecting the financial process have been indicated and formalized models have been offered. The methods, determining ways and methods of innovative activities financing, including the main financing tasks, were developed.

ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА

Рассмотрены мировые тенденции и проблемы развития экономики Красноярского края в сложившихся и прогнозируемых условиях.

Экономика Красноярского края, как и других регионов Сибири, находится в условиях значительно более сложных, чем в центральных регионах страны. Новые проблемы, возникшие в период перехода на рыночные отношения, отражены во многих публикациях и программных материалах. В то же время имеющиеся проблемы имеют более глубокие корни и связаны как с исторически сложившейся структурой производства, так и с принципиально новыми условиями функционирования сибирской экономики. Многие ее отрасли создавались исходя из ориентации на дешевую электроэнергию, транспортные тарифы и оставались длительное время стабильными, при этом отдельные отрасли субсидировались государством. Размещение предприятий осуществлялось не всегда с учетом их эффективного функционирования.

Так, оценивая политику размещения предприятий машиностроения в крае, В. Абовский признает, что строители серьезно подвели край: «Абаканвагонмаш» был построен без учета проблемы обеспечения металлом, комплекс электротехнических предприятий в Минусинске так и не был достроен, завод тяжелых экскаваторов в Красноярске, построенный ускоренными темпами, не имел проектной продукции и т. д. [1]. Очевидно, что переход к рыночным условиям обострил проблему конкурентоспособности указанных предприятий. Да и предприятия многих других отраслей, ориентированные на дешевые ресурсы, в настоящее время также находятся в сложной ситуации: резко сократил объемы производства шинный завод, возникли проблемы у комбайнового завода, прекратил функционировать шелковый комбинат и т. д. Конкуренция и новые реалии регионального рынка ставят проблему формирования эффективной отраслевой структуры промышленности.

Возникает необходимость поиска реальных возможностей эффективного функционирования экономики края в сложившихся и прогнозируемых условиях, главные из которых приведены ниже.

Глобализация мирохозяйственных связей. Ни одно крупное предприятие не может осуществлять эффективную деятельность без учета деятельности конкурентов не только на региональном уровне, но и на мировом. Информационные технологии позволяют крупным корпорациям использовать все современные преимущества мирового разделения труда и вовлекать в производственный процесс наиболее дешевые и качественные ресурсы из любой точки мира, обеспечивая таким образом снижение издержек и повышение конкурентоспособности продукции. Развитая мировая логистическая система является одной из важнейших составляющих глобальных процессов.

Для России региональные аспекты логистики приобретают особую актуальность. Первостепенное значение

имеют формирование региональных логистических транспортно-распределительных систем и их последующая интеграция с федеральной и международной логистическими системами товародвижения, способствующие вхождению России в мировое сообщество в качестве равноправного партнера. К сожалению, созданные в Советском Союзе крупные логистические транспортно-экспедиционные центры остались за пределами России.

Важнейшим параметром является время доставки продукции к потребителю. Рассматривая проблемы транспортировки, можно констатировать тот факт, что в странах Европы и Америки продукция от производителя к потребителю передвигается ежедневно в течение 22 ч со средней скоростью 1 300 км в сутки, а в России соответственно лишь 8...10 ч и 350 км в сутки.

Отдельный вопрос – это российская тарифная политика. Так, в 2004 г. по Транссибу было перевезено 150 тысяч контейнеров, из которых 125 тысяч поступили в Финляндию, которые далее доставлялись как российский импорт в Москву и другие регионы. Причиной такого транзита послужила российская тарифная политика: затраты по перевозке контейнера из Находки в Москву в два раза дороже, чем до российско-финской границы [2].

Отдельные предприятия России, особенно Центрального региона, начали использовать логистические каналы с учетом их эффективности, а в регионах Сибири проблемы транспортировки и временные рамки доставки остаются еще слабо решенной проблемой.

Обостряющаяся мировая конкуренция за рынки сырья и сбыта. В мировой экономике сложилась жесточайшая конкуренция, и процессы глобализации ее только усиливают. Опираясь на оценку зарубежных экспертов, можно говорить о снижении конкурентоспособности российского бизнеса: в 2002 г. наши предприниматели заняли 58-е место (из 80), а в 2003 г. – уже 63-е [3]. Результаты опроса более 700 респондентов, проведенного Институтом экономики переходного периода (ИЭПП), показали, что среди факторов, усиливающих конкуренцию на рынках сбыта российских предприятий, следует отметить повышение значимости роста объема импорта высокого качества по низким ценам, что отражено в таблице [4].

В качестве одной из важнейших причин, усиливающих конкуренцию, отмечается сокращение внутреннего платежеспособного спроса. К сожалению, рост заработной платы сопровождается повышением затрат в сферах, не связанных с производством. Растут объемы импорта и повышается его качество (особенно это касается китайских товаров).

Вступление России в ВТО в 2006 г. только обострит конкуренцию для отечественных производителей. Для экономики края это связано с ограничением рынков сбыта продукции обрабатывающих отраслей и проникновением за-

рубежных производителей на региональный рынок, особенно из стран Азиатского региона. Так, например, объем выпуска автопокрышек китайскими производителями по прогнозным оценкам в 2005 г. составит свыше 210 млн, что позволит им стать вторыми после Японии производителями в мире, при этом перспективным рынком сбыта они рассматривают Россию [3]. Рассматривая выигрышные позиции сырьевых отраслей Сибири в данной ситуации, необходимо учесть возможность возникновения проблем, связанных со слаборазвитой инфраструктурой транспортировки, складирования и т. п.

Стандартизация в области менеджмента. Единое экономическое пространство, сложившееся в развитых странах и формируемое в развивающихся, способствовало созданию стандартов в области менеджмента, определяющих уровень издержек производства и обращения, и распространению современных управленческих технологий, обеспечивающих конкурентоспособный уровень действующих предприятий. Глобальный менеджмент является результатом отбора самых передовых управленческих технологий, выработанных практикой лучших фирм мира. Перевод капитала в развивающиеся страны осуществляется совместно с управленческими технологиями: предприятие имеет стандарты в области информационных технологий, операционного менеджмента, системы управления качеством, развитую логистику и т. д., обеспечивая таким образом конкурентоспособный уровень издержек.

Развитие новых организационных форм регионального производства. Необходимость поиска региональных факторов снижения издержек и выхода предприятий на мировые рынки способствовало дальнейшему развитию новых организационных форм взаимодействия предприятий и организаций на региональном уровне, позволяющих выявить конкурентные преимущества отдельных предприятий и обеспечить их взаимодействие на основе общих экономических интересов. Широко известен опыт

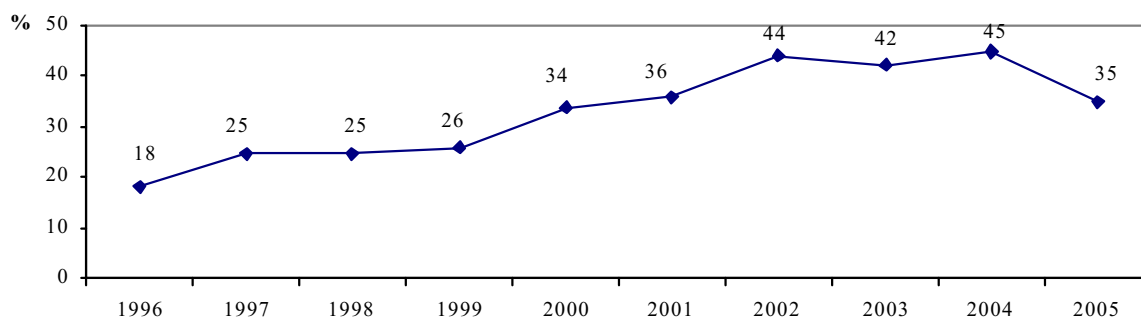
применения новых форм в экономике развитых стран (сетевые структуры, в том числе кластеры, инновационные объединения и т. п.). Так, базируясь на лесной промышленности, Финляндия стала мировым лидером в производстве бумаги высшего качества, а также оборудования для лесной и бумажной промышленности и других связанных с ними подотраслях. Таким образом, системы регионального взаимодействия стали определяющими факторами повышения конкурентоспособности входящих в них предприятий.

Межрегиональная конкуренция. К новым факторам ужесточения конкуренции на региональном рынке можно отнести и межрегиональную конкуренцию внутри России. Расширяется имиджевая политика регионов в борьбе за инвестиции, размещение производственных баз, привлечение и закрепление наиболее квалифицированных кадров, получение и распространение материальных потоков. Эта форма конкуренции при развитии рынка будет только нарастать (см. рисунок).

Роль распространения китайской экономики. Согласно последним оценкам Мирового банка, Китай сегодня имеет вторую в мире по размерам после США экономическую систему (а Россия – десятую). Оценка тенденций развития и экспансии китайской экономики показывает, что усиливается ее влияние на перспективы развития отраслей в экономике России и особенно сибирских регионов. Товарооборот России с Китаем в 2004 г. составил порядка 15 млрд долларов, из них 4 млрд долларов пришлось на Сибирь [5]. Конкуренция нарастает не только на рынке ширпотреба, она проникает и в сферу тяжелой промышленности. Китай прочно утвердил свое первенство на мировом рынке цветных металлов (олово, цинк, свинец, молибден и т. д.), аналогично выглядит ситуация с поставками инструментов, некоторых строительных материалов и других видов промышленной продукции [6]. Еще одним ярким примером распространения китайской экономики является реализация китайских авто-

Факторы, усиливающие конкуренцию на рынках сбыта российских предприятий, в % к числу опрошенных

Факторы	1998	2000	2002	2004
Сокращение внутреннего платежеспособного спроса	76	48	53	31
Сдерживание цен российскими конкурентами	15	23	26	24
Рост объема импорта	28	9	23	30
Низкие цены импорта	18	9	12	16
Лучшее качество импорта	11	14	18	26
Деятельность торгово-посреднических структур	16	22	15	16
Возможность рекламировать продукцию	4	6	5	4
Деятельность ФАС и Правительства РФ	4	3	6	3



Проникновение на рынки сбыта российских производителей [4]

мобилей на российском рынке. Рассматриваются проекты сборки внедорожников и пикапов марки FAW на Алтае, а в Новосибирской области – выпуска легковых автомобилей Chery с объемом двигателя 1,6 и 2,4 л. Их цена может составить от 8 000 до 12 000 долларов. Китайские автопроизводители способны стать глобальной угрозой для других автоконцернов в России уже через 5...7 лет [7].

Фактически уже сейчас оценка стратегий ведущих предприятий России обязательно включает китайский фактор или как потребителя (энергоресурсы), или как производителя (легкая промышленность, автомобилестроение, информационные технологии, электроника и др.). Примерами развития российско-китайских отношений могут служить ряд соглашений, подписанных в 2005 г.:

- соглашение между администрацией Санкт-Петербурга и Шанхайской заграничной объединенной инвестиционной компанией по строительству мегакомплекса «Балтийская жемчужина» на 1,25 млрд долларов;

- соглашение между администрацией Санкт-Петербурга и китайской компанией «Хуавэй Тек Инвестмент» о строительстве единой мультисервисной телекоммуникационной сети исполнительных органов государственной власти на 3 млрд долларов;

- соглашение о заготовке и разработке древесины в Хабаровском крае между Китайским государственным банком, корпорацией «Синь Чжоу» и администрацией Хабаровского края на 42 млн долларов;

- соглашение о создании Новгородского агропромышленного центра по производству агропродукции и логистике между Гуаньсийской агропромышленной холдинговой компанией и администрацией Новгородской области на 31 млн долларов;

- договор о совместной деятельности по строительству китайской оптовой фруктово-овощной базы в Иркутске между Инкоуской фруктовой компанией и ООО «Аттис» на 20,48 млн долларов;

- соглашение о сотрудничестве по производству полиуретановых материалов и коррозионно-устойчивых смазок между Ляонийской компанией тонкохимической промышленности «Тяньхэ» и ВНИИ коррозии на 10 млн долларов;

- дополнение к инвестиционному договору между ООО «Хенда-Сибирь» и Яньтайским северо-западным обществом лесного хозяйства на 21 млн долларов;

- меморандум о сотрудничестве между Сычуаньской компанией электротехники «Чанхун» и российской фирмой «М-видео» на 10 млн долларов [8].

Экономика Красноярского края не может развиваться без учета имеющихся мировых тенденций на рынках товаров и услуг и обостряющейся конкуренции. В условиях происходящей стабилизации экономических процессов в России необходима выработка стратегии развития региона. Оценивая имеющийся потенциал региональной экономики, следует выделить проблемы, оказывающие определяющее влияние на возможные направления ее дальнейшего развития:

- высокий износ производственных фондов. Проблема касается всей экономики страны. В Красноярском крае большинство крупных предприятий были созданы в

60-е, 70-е гг. и практически не подлежат реконструкции и модернизации. Следствием высокого износа являются высокие издержки и неконкурентоспособность выпускаемой продукции. Новые собственники, оценивая перспективы их развития, предпочитают вложение капитала в центральные районы страны, имеющие рынки сбыта и транспортную доступность. Можно предположить в будущем банкротство всех крупных предприятий, имеющих устаревшую производственную базу и не имеющих достаточных для рентабельности рынков сбыта. Настораживает и тот факт, что по материалам исследований, проведенных в марте 2005 г. общероссийской общественной организацией малого и среднего предпринимательства «ОПОРА России» совместно с ВЦИОМ, Красноярский край занимает последнее (80-е) место среди регионов по условиям работы малого бизнеса [9];

- уровень заработной платы. Высокие издержки не способствуют росту заработной платы, которая, за исключением ведущих отраслей, очень низкая по соотношению с центральными регионами страны. Низкая заработная плата является социальной нагрузкой на бюджет и предприниматель, выплачивая ее, получает дополнительный доход, а бюджет оказывает социальную помощь его работающим. По данным Красноярского краевого комитета статистики, средняя номинальная заработная плата, начисленная работникам крупных, средних и малых организаций, в ноябре 2004 г. составляла 9579,6 руб., при этом, если рассматривать в разрезе отраслей экономики, то лидирующее положение занимают финансы, кредит, страхование, а на последнем месте – сельское хозяйство. Сложившийся низкий уровень заработной платы не стимулирует повышения качества рабочей силы, ее закрепления и поиска новых управленческих технологий, снижающих издержки производства и обращения;

- отсутствие механизма координации экономических интересов разных субъектов региональной экономики. На территории края недостаточно развита координация экономических интересов собственников предприятий и организаций с целью выработки общих стратегий развития, обеспечивающих повышение конкурентоспособности производства товаров и услуг. В развитых экономиках под влиянием конкуренции это понимание достигается путем создания и совершенствования интегрированных структур, имеющих общие цели. Реализация программ социально-экономического развития, разработка стратегических планов и стратегий возможна только при участии всех субъектов регионального рынка;

- рост цен на определяющие конкурентоспособность факторы производства и обращения. Проблемы ценообразования особенно актуальны для сибирских регионов. Объективно сложившиеся условия в энергозатратах и транспортных услугах усугубляются постоянным ростом цен. На грань выживания за счет диспаритета цен поставлено сельское хозяйство. Энергозатраты как базовые при размещении предприятий в советское время потеряли свое преимущество и включены в общую схему роста. Транспортная составляющая не включает преимуществ для регионов Сибири и т. д.

Таким образом, рассмотренные мировые тенденции и проблемы Красноярского края предопределяют необходимость выработки новых концептуальных подходов к стратегии экономического развития на основе промышленной политики, отражающей реальные условия эффективного развития экономики региона. Необходимо понимание, что к регионам Сибири нельзя подходить только с позиций критериев рынка. Механизм эффективного функционирования ее экономики должен опираться на активное взаимодействие власти и бизнеса.

Библиографический список

1. Абовский, В. У нас был принцип – быть на шаг впереди других / В. Абовский // Красноярский рабочий. 2004. 14 апр. С. 2.
2. Махлин, М. 350 километров в сутки / М. Махлин // Рос. газета. 2005. 21 июня. С. 4.

3. Головачев, В. Да здравствует честная конкурентоспособность / В. Головачев // Экономика и жизнь. 2004. № 2. С. 32.
4. Васильчук, Е. Спрос уходит в импорт / Е. Васильчук // Рос. бизнес-газета. 2005. № 32. С. 7.
5. Самсонов, Н. Дорога в Китай / Н. Самсонов // Эксперт – Сибирь. 2005. № 34. С. 8.
6. Курьянов, Ю. Рядом с большим соседом / Ю. Курьянов, А. Думлер, Л. Южанинова // Эксперт – Сибирь. 2003. № 8. С. 10–13.
7. Фомченков, Т. «Евро-2» вышел на большую дорогу / Т. Фомченков // Рос. бизнес-газета. 2005. 5 июля. С. 2.
8. Владиславлев, А. Наше дело – предложить. Китайское – найти инвестиции / А. Владиславлев // Рос. газета. 2005. 21 июня. С. 3.
9. Ивантер, А. Не в дверь, так в окно / А. Ивантер // Эксперт. 2005. № 28. С. 21–25.

E. V. Belyakova

THE PROBLEMS OF EFFECTIVE DEVELOPMENT OF ECONOMY OF THE REGION

The world trends and problems of development of economy of the Krasnoyarsk territory in the existing and forecasted conditions are considered.

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ

Проблема конкурентоспособности региональной экономики носит актуальный характер в современном мире. От того насколько успешно она решается, зависит многое в экономической и социальной жизни как региона, так и страны в целом.

В мировой экономике происходят качественные изменения, связанные с глобализацией, неравномерностью развития, обострением конкурентной борьбы между странами, регионами, отдельными фирмами. В этих условиях, когда рынок получает признание в качестве общечивилизованной ценности, мощь любого государства во все большей степени определяется конкурентоспособностью его производителей. Именно обеспечение конкурентоспособности лежит в основе разработки стратегии развития страны, региона или фирмы.

Развитие страны и ее регионов зависит от всех элементов рынка и, в первую очередь, от конкуренции фирм. Но конкурентное преимущество фирм создается и удерживается в тесной связи с местными условиями. Несмотря на глобализацию отраслей, роль стран и региона базирования фирмы в последнее время усилилась, и успех фирм в состязании с конкурентами прежде всего зависит от положения дел в стране и регионе. В свою очередь, страны и регионы развиваются в конкурентной среде. Обеспечение условий для цивилизованного и динамично развивающегося рынка, создание (формирование) конкурентоспособности – ключевой элемент в числе национальных и региональных приоритетов в любой стране, важнейшая функция государственного регулирования экономики. Однако многие проблемы определения и формирования конкурентоспособности региона и роли государства в этом процессе остаются нерешенными.

Понимание сущности межрегиональной конкуренции (в том числе между городами как местами концентрации экономического и интеллектуального потенциалов регионов) и овладение методами укрепления конкурентоспособности регионов приобретают все большее значение для региональных политиков и администраций. Необходимо понять, овладеть, научиться применять и использовать в управлении ключевые аспекты конкурентоспособности регионов, модели и показатели ее оценки, выбирать направления повышения конкурентной силы в условиях конкретных регионов, знать и учитывать тенденции развития регионов-конкурентов и возможности сотрудничества с ними. Эти проблемы актуальны для макрорегионов всего мира. Усиливается их осознание и в Российской Федерации, где региональный протекционизм все еще преобладает в сознании властей, снижая общую конкурентоспособность страны в евроазиатском и мировом пространстве. В то же время развитие межрегиональной конкуренции может быть тем фактором, который ищет центральная власть для резкого усиления темпов роста России, ибо сильные конкурентоспособные регионы означают сильную страну.

Отечественные и зарубежные ученые внесли существенный вклад в разработку теории конкуренции и кон-

курентоспособности. Теория конкуренции, впервые обобщенная А. Смитом, была впоследствии развита Д. Рикардо, Ф. Эджуортом, Э. Чемберлином, Г. Л. Азоевым, А. Ю. Юдановым и др. М. Портер, И. Ансофф, Р. Уотерман, А. Стрикленд, В. Д. Андрианов, П. С. Завьялов, Р. А. Фатхутдинов исследовали не только природу конкуренции и конкурентоспособности, но и проблемы их обеспечения.

Сравнительно недавнее формирование и развитие теории конкурентоспособности обусловило тот факт, что в настоящее время общепринятого определения конкурентоспособности нет, и данное понятие трактуется в зависимости от того, к какому объекту (предмету) оно относится.

В самом общем виде конкурентоспособность в экономической науке понимается как способность конкурировать с аналогичными объектами на конкретном рынке, используя конкурентные преимущества для достижения поставленных целей.

Конкурентоспособность – сложная экономическая категория, которая может рассматриваться на нескольких уровнях [1]. Между всеми этими уровнями существует достаточно тесная внутренняя и внешняя взаимосвязь (см. таблицу).

Анализируя опыт зарубежных стран и формулируя применительно к российским условиям понятие конкурентоспособности, необходимо уточнить сущностный подход к понятию конкурентоспособности продукции как определяющей и положение отдельного производителя в борьбе за покупателя, и способность страны в условиях свободной конкуренции предлагать на мировом рынке товары и услуги, реализация которых увеличивает благосостояние страны в целом.

Проведя анализ определения конкурентоспособности на разных уровнях, можно сделать следующие выводы:

1. В понятие «конкурентоспособность товара» вкладываются такие характеристики, как цена товара и условия ее реализации. В определении конкурентоспособности широко используется подход, сравнивающий качественные и стоимостные характеристики. Таким образом, конкурентоспособность товара определяется совокупностью его характеристик, которые учитываются потребителем, и проявляется в результате сравнения с товарами-аналогами. Данный подход широко применим среди отечественных авторов.

2. Применительно к организациям и предприятиям понятие конкурентоспособности связывается с понятием эффективности их функционирования, предпосылкой которой является производство и реализация конкурентоспособных товаров, т. е. конкурентоспособностью обладают те хозяйствующие субъекты, которые эффективно фун-

кционируют и представляют потребителю конкурентоспособные товары и услуги. Данная позиция разделяется как зарубежными, так и отечественными авторами.

3. Проблема определения конкурентоспособности отрасли в настоящее время проработана не достаточно. Более подробный анализ конкурентоспособности отрасли проведен М. Портером.

4. Понятие конкурентоспособности региона основывается на том, насколько эффективно в регионе используются имеющиеся ресурсы, и может быть выражено в качестве валового регионального продукта. По мнению М. Портера, единственное, на чем может основываться концепция конкурентоспособности на уровне региона, – это продуктивность использования ресурсов [2]. Подход к оценке конкурентоспособности региона можно сформулировать, опираясь на концепцию конкурентоспособности страны, предложенную М. Портером. Роль региона в создании конкурентных преимуществ можно исследовать по четырем взаимосвязанным направлениям (детерминантам), образующим региональный ромб:

- параметрам факторов (природные ресурсы, квалифицированные кадры, капитал, инфраструктура и др.);
- условиям спроса (уровень дохода, эластичность спроса, требовательность покупателей к качеству товара и услуг и др.);

- родственным и поддерживающим отраслям (обеспечивают фирму необходимыми ресурсами, комплектующими, информацией, банковскими, страховыми и другими услугами);

- стратегиям фирм, их структуре и соперничеству (создают конкурентные преимущества).

В свою очередь, каждый из детерминантов анализируется по составляющим, степени их воздействия на конкурентное преимущество региона, а также необходимости их развития.

Однако главным субъектом региона является население, поскольку именно здесь люди реализуют свои экономические интересы и удовлетворяют потребности. Поэтому при определении конкурентоспособности ре-

гиона целесообразно учитывать критерии, характеризующие уровень и качество жизни населения. Данный подход широко распространен в мировой практике. Например, страны Организации экономического сотрудничества и развития определяют конкурентоспособность как «способность компаний, отраслей, регионов и наций обеспечивать сравнительно высокий уровень доходов и заработной платы, оставаясь открытыми для международной конкуренции» [3].

В итоге наиболее полным будет такое определение конкурентоспособности региона, которое включает три основополагающих аспекта:

- необходимость достижения высокого уровня жизни населения (конкурентоспособность на рынке труда или конкурентоспособность, обеспечиваемая населением);
- эффективность функционирования хозяйственного механизма региона (конкурентоспособность на рынке товаров или конкурентоспособность, обеспечиваемая производством);
- инвестиционная привлекательность (конкурентоспособность на рынке капитала или конкурентоспособность финансов).

Поэтому можно сделать вывод, что под конкурентоспособностью региона следует понимать его способность обеспечить высокий уровень жизни населения и дохода собственникам капитала, а также эффективно использовать имеющийся в регионе экономический потенциал при производстве товаров и услуг. В конечном счете конкурентоспособность региона определяет его роль и место в экономическом пространстве России, этот показатель необходим для комплексного представления о позиции региона, его сильных и слабых сторонах. Каждая из составляющих конкурентоспособности имеет важное значение для постановки глобальных целей развития региона, а интегрирует эти составляющие именно показатель конкурентоспособности.

5. Единого подхода в определении конкурентоспособности страны в целом не выработано до сих пор. М. Портер считает, что единственно разумной концепцией на национальном уровне является изучение производитель-

Характеристика уровней конкурентоспособности

Уровень конкурентоспособности	Объект или субъект конкурентоспособности	Факторы конкурентоспособности
Товарный	Товары (работы, услуги)	Качество продукции, соответствие нормам и стандартам. Цена. Соответствие потребительскому спросу
Микроуровень	Товаропроизводитель (организация, фирма)	Сравнительная конкурентоспособность продукции. Эффективность производственной деятельности. Финансовые показатели деятельности. Эффективность организации и сбыта продукции на рынке и его доля
Мезоуровень	Объединение предприятий, отрасли	Внутренняя структура отрасли. Влияние внешней среды. Конкурентоспособность отдельных элементов. Взаимодействие между элементами системы
Макроуровень	Страновая конкурентоспособность, конкурентоспособность регионов	Инвестиционный климат. Научно-технический уровень. Конкурентоспособность промышленности и отраслей народнохозяйственного комплекса в целом

ности, при этом концентрировать внимание необходимо на определенных отраслях и сегментах отрасли, а не на экономике в целом. Всемирный экологический форум, Мировой банк оценивают конкурентоспособность экономики страны по 330 критериям, выделяя ряд определяющих факторов, таких как совокупная мощь страны (экономический потенциал); интернационализация (степень участия в международной торговле и инвестиционных потоках); правительство (стимулирующая роль государства); финансы (функционирование рынка капиталов и качество финансовых услуг); инфраструктура (соответствие ресурсов базовым потребностям бизнеса); наука и технология (потенциал и результативность НИОКР); люди (численность и качество трудовых ресурсов). Конкурентоспособность экономики страны определяется как результат взаимодействия перечисленных факторов, особенностей хозяйственно-политической среды, организационных способностей и эффективности механизма функционирования экономики, хозяйствующих субъектов [4].

В результате проведенного анализа понятия конкурентоспособности на различных уровнях можно сделать вывод, что основной и наиболее значимой целью повышения конкурентоспособности является улучшение и рост уровня жизни населения. Безусловно, что уровень жизни населения неразрывно связан с функционированием экономики региона, активной и профессиональной деятельностью региональной власти, других институциональных структур, выражающих интересы граждан. Потенциал региона реализуется в результате функционирования регионального рынка, вовлекающего в производственный процесс все имеющиеся в регионе ресурсы и эффективно их использующего.

Конкуренция заставляет и будет все больше заставлять регионы как можно полнее использовать тот общий потенциал, которым они обладают. Следовательно, оценить конкурентоспособность можно на основе определения наличия и уровня развития тех составляющих потенциалов, которыми обладает регион. Оценка этих потенциалов позволит повысить эффективность их использования и будет способствовать повышению уровня региональной конкурентоспособности. Остановимся более подробно на каждом из них.

1. *Человеческий потенциал* подразумевает наличие, сохранение и привлечение нового, трудоспособного населения, высококвалифицированных кадров, молодежи и молодых семей с детьми. На достижение благоприятных условий оказывает влияние ряд факторов: наличие рабочих мест, соответствующих образованию и квалификации населения региона; уровень заработной платы; система социальной поддержки, действующей в регионе; наличие и качество жилья; экологическое благополучие; состояние торговли, снабжения, уровень потребительских цен; культурная среда, духовная жизнь; качество и эффективность транспортной системы; учреждения детского и юношеского воспитания; система высшего образования; развитие образования и здравоохранения как отраслей специализации; уровень криминогенности; природно-климатические условия; степень демократизации местного управления, не высокая степень коррумпированности; развитие электронного управления и доступ к информации.

2. *Организационный потенциал* – это способность региональных властей мобилизовать факторы развития территории и организовать сотрудничество целевых групп местного сообщества. Основными характеристиками организационного потенциала выступают политическая стабильность в регионе, эффективность структур регионального и муниципального управления, наличие документов стратегического видения, разработанной и реализуемой стратегии развития региона, применение методов регионального маркетинга и активного позиционирования, обеспечение участия граждан в принятии политических решений и управлении [5].

3. *Инфраструктурный потенциал* – это рыночная инфраструктура, мониторинг окружающей природной среды, здравоохранение, наука и образование, культура, торговля, общественное питание, транспорт и связь, сельское хозяйство, строительство, жилищно-коммунальное хозяйство, бытовое обслуживание населения, промышленность. Каждый регион заинтересован в увеличении удельного веса конкурентоспособной продукции организаций и, соответственно, в увеличении массы прибыли как отдельных организаций, так и всего региона. От качества работы инфраструктуры региона во всех отраслях во многом зависит устойчивость и эффективность работы каждой организации. Поэтому регион как глобальная система по отношению к организации должен оказывать всестороннюю помощь своим компонентам (подсистемам). Эффективность глобальной системы будет увеличиваться при совершенствовании связей в системе [6].

4. *Финансовый потенциал* оказывает важнейшее влияние на развитие экономики, создание благоприятного и привлекательного инвестиционного климата и обеспечение бесперебойной работы социальной сферы. Финансовый потенциал определяют бюджетная сила региона (профицит бюджета, степень бюджетной задолженности в расчете на одного жителя), уровень развития инфраструктуры банковских, финансовых и страховых учреждений, надежность функционирования финансовой сферы, параметры инвестиционного климата. Положительное развитие финансового потенциала достигается за счет следующих факторов: размещения новых промышленных предприятий; сохранения существующих промышленных предприятий; создания новых центров компетенции; размещения науки и новых технологий; основания новых строительных предприятий; создания новых торговых предприятий и усиления торговой специализации; размещения банков и страховых компаний; получения новых инвестиций из различных источников в сферу экономики; открытия головных офисов крупных фирм; развития транспортно-транзитных функций.

5. *Природные ресурсы* – это географическое положение, наличие природных ресурсов и характеристики климатических условий развития, земельные ресурсы. Степень экологичности региона занимает все более значимую роль для роста качества жизни и обеспечения его устойчивого развития, что служит существенным критерием для определения конкурентной силы территории. Поэтому характеристиками благоприятного экологического потенциала выступают качество воды и воздуха, состояние окружающей природы, красота ландшафтов [5].

6. *Инновационный потенциал* подразумевает приоритетное развитие наукоемкой продукции, использование новых технологий в финансовых схемах, в проектировании предприятий, применение современных технологий в менеджменте, современную структуру регионального рынка труда.

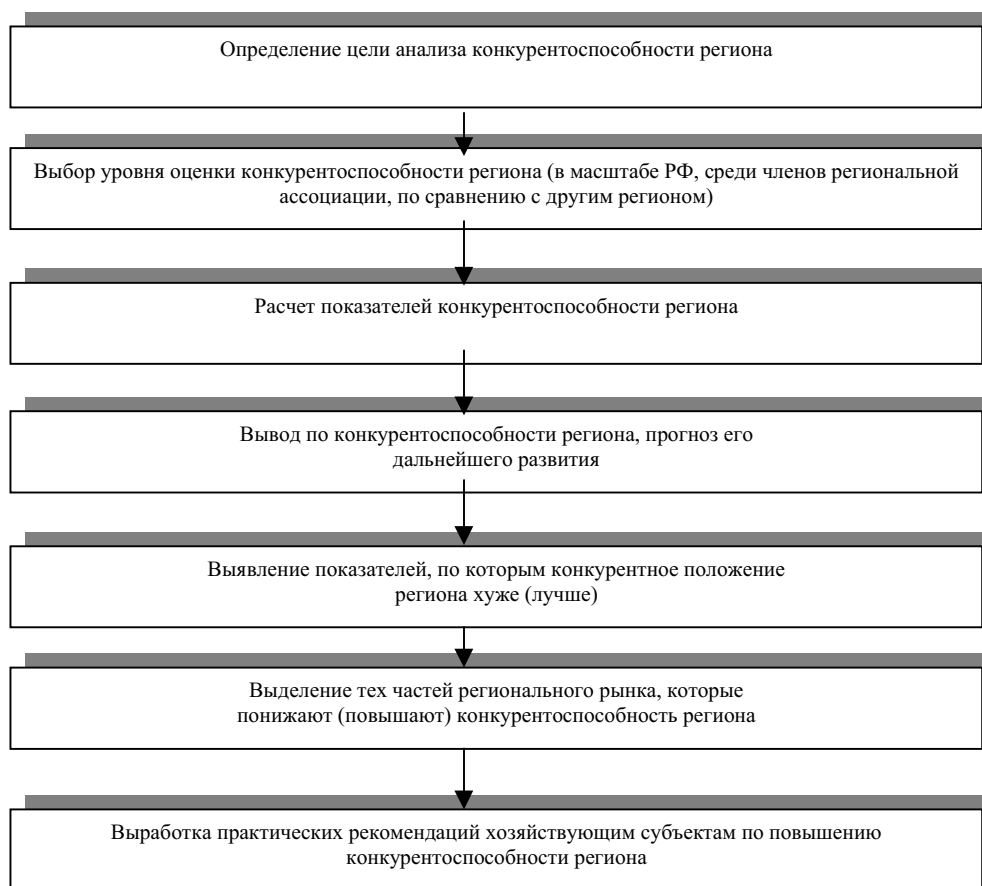
7. *Информационный потенциал* – информатизация и внедрение принципов электронного управления, в первую очередь это российский сектор Интернета – Рунет, характеризующийся количеством серверов, пользователей, средним временем работы в сети, посещаемостью сайтов, а также электронные средства коммуникации, которые являются самой современной и эффективной информационно-коммуникационной технологией, способной обеспечить регионам серьезные конкурентные преимущества в презентации региона во внешней среде; активном маркетинге сильных конкурентных преимуществ региона; активном содействии привлечению в регион инвестиций; возможности внедрения принципов электронного управления в направлении де бюрократизации и повышения эффективности регионального управления; повышении информированности жителей региона; облегчении проведения выборных кампаний, референдумов, опросов; усилении принципов демократического общества и обеспечении более значительного участия граждан в региональном и местном управлении; возможности участия в сетевом межрегиональном и международном Интернет-партнерстве [5].

8. *Культурный потенциал* включает наличие в регионе привлекательных историко-архитектурных и культур-

ных объектов; наличие туристического интереса к посещению региона; качество туристической инфраструктуры и цены на услуги туристического комплекса; транспортная доступность особо привлекательных объектов региона; благоприятность экологии и наличие красивых природных ландшафтов; эффективность регионального маркетинга; структура типов туризма, которые имеют предпосылки развития в регионе; проведение ярких событий: традиционных праздников, ярмарок, выставок, фестивалей, чемпионатов и других крупных спортивных мероприятий, конгрессов, конференций, семинаров; активность позиционирования в Интернете. Достижение благоприятного климата в культурной среде региона возможно за счет привлечения туристов всех типов отдыха (историко-культурного, делового, спортивного, экономического, семейного); открытия новых туристических маршрутов; приращения исторического и архитектурного потенциалов; создание новых музеев, театров и их филиалов; размещения головных офисов учреждений культуры и туризма; получения новых инвестиций из различных источников в сферу культуры, туризма и спорта; исполнения административных функций государственного, международного и мирового масштаба.

Оценка уровня конкурентоспособности регионов является важным этапом в цикле повышения их конкурентной силы и продвижения их позитивного имиджа в межрегиональном и международном пространстве. Она может выполняться на основе различных методических подходов.

Анализ региональных условий имеет в России довольно давнюю историю. Такой анализ проводился и в «допе-



Алгоритм оценки конкурентоспособности региона

рестроечное» время при плановой экономике – в ходе учета региональных особенностей при определении показателей эффективности капитальных вложений, и в «постперестроечное» время – в ходе применения для оценки регионального инвестиционного климата различных, в основном зарубежных, методик (индексы Доу-Джонса, БЕРИ, промышленной активности, системы конъюнктурных опросов руководителей предприятий, методики Гарвардской школы бизнеса, Тейна–Уотерса, Котлера–Хейзера, журналов «The Economist», «Fortune», «Euro money») [3].

За последние годы появилось значительное количество отечественных или специально адаптированных к российским реалиям зарубежных методик оценки региональной конкурентоспособности, складывающейся в различных регионах России. При анализе методических подходов был определен примерный алгоритм оценки конкурентоспособности региона (см. рисунок).

Сравнительный анализ новых методик и результатов их применения показал, что, несмотря на определенные позитивные сдвиги, достигнутые за последние годы в изучении и оценке в области конкурентоспособности регионов сдвиги происходят только в направлении оценки положения организаций и отдельных товаров. Оценка сравнительного положения регионов осуществляется по показателю инвестиционной привлекательности, что совершенно не достаточно для определения перспектив развития регионов, выделения тех из них, которые имеют высокий неиспользованный потенциал, а также тех регионов, которые по ряду причин просто незаслуженно не востребованы инвесторами, экспортерами товаров, людьми

[7]. Таким образом, в рейтингах инвестиционной привлекательности учитывается только привлекательность для инвесторов, но этот показатель не может быть самым объективным, ибо миграции подвержены не только капиталы, но и другие ресурсы: товарные и трудовые, информационные и технологические.

Библиографический список

1. Прахова, Т. С. Понятие и сущность конкурентоспособности / Т. С. Прахова // Сб. науч. тр. Сев.-Кавк. гос. техн. ун-та. Сер. «Экономика». 2005. № 2.
2. Портер, М. Международная конкуренция: конкурентные преимущества стран / М. Портер. М.: Дело, 1994.
3. Ушвицкий, Л. И. Конкурентоспособность региона как новая реальность: сущность, методы оценки, современное состояние / Л. И. Ушвицкий, В. Н. Парахина // Сб. науч. тр. Сев.-Кавк. гос. техн. ун-та. Сер. «Экономика». 2005. № 1.
4. Андрианов, В. Д. Конкурентоспособность России в мировой экономике / В. Д. Андрианов // Экономист. 1997. № 10.
5. Гринчель, Б. М. Важнейшие факторы повышения конкурентоспособности регионов (краткая версия) / Б. М. Гринчель; Институт «Евроград». СПб., 2003.
6. Фатхутдинов, Р. А. Управление конкурентоспособностью / Р. А. Фатхутдинов // Стандарты и качество. 2000. № 1.
7. Шахназаров, А. Национальная система гарантирования инвестиций на региональном уровне / А. Шахназаров, И. Гришина, И. Ройзман // Инвестиции в России. 1999. № 12.

E. V. Belyakova, N. V. Veretnova

THE COMPETITIVENESS OF THE REGION ECONOMICS

A problem of competitiveness of regional economy is rather pressing in today's world. A great deal in economic and social life of both the region and the country as a whole depends on the successful solution to this problem.

ХОЗЯЙСТВЕННЫЙ МЕХАНИЗМ КАК НАУЧНАЯ КАТЕГОРИЯ

Показывается развитие понятия «хозяйственный механизм» от интуитивных, простейших определений до научной категории, формирующейся в процессе познания на основе хозяйственной практики.

Проблема углубления понимания сущности хозяйственного механизма, его общего и особенного на разных уровнях хозяйственных систем обнаружилась вместе с развитием парадигматического кризиса в науках о хозяйственном механизме. Выявилась парадоксальная ситуация. Смыслом экономических исследований является нахождение и использование объективных существенных, устойчивых связей и взаимосвязей экономических явлений в процессе производства, распределения, обмена и потребления материальных благ и услуг, т. е. законов хозяйственных систем. В то же время детерминированные связи между ключевыми элементами экономических систем являются имманентным атрибутом понятия «хозяйственный механизм». Таким образом, можно делать вывод, что экономика как наука и практика своим предметом имеет хозяйственный механизм и законы его существования и функционирования. «Вместе с тем, изменения хозяйственного механизма вследствие научно-технического и социального прогресса обуславливают изменения детерминирующих связей между ключевыми элементами, то есть изменение законов, что противоречит сущности закона по определению. Следовательно и целью современной экономической науки является уже не отыскание каких-то “хрупких” экономических законов с “дистрофичной” областью применения, а понимание «работы действующих хозяйственных механизмов» [1. С. 155].

Вместе с осознанием парадоксальности ситуации меняется точка зрения на значение термина «хозяйственный механизм»: «Хозяйственный механизм – одна из самых сложных экономических категорий. Она включает в себя всю систему экономических категорий в самом различном соотношении. Труд, издержки, цена, прибыль, заработная плата, рента, капитал, деньги, налог, кредит и т. д. – все эти категории, как и многие другие, здесь не перечисленные, но практически используемые в экономической жизни общества, так или иначе входят в хозяйственный механизм» [3. С. 131].

Таким образом, мы можем констатировать следующее:

- термин «хозяйственный механизм» связан с системным представлением хозяйственной деятельности, но отличается от него наличием условия (фактора) детерминации. Это позволяет с большей адекватностью отражать в сознании целевую сущность хозяйственных систем;

- этот термин прошел путь развития от интуитивных, простейших определений до сложных структурно-детерминированных его представлений как категории, формирующейся в процессе исторического развития познания на основе общественной (хозяйственной) практики;

- неоднозначность понимания сущности термина «хозяйственный механизм», его особенностей на разных уровнях системного представления хозяйственных систем обуславливает необходимость дополнительных до-

казательств того, что к настоящему времени из интуитивного понятия уже сформировалась научная категория, используемая при необходимости в том числе и в процессах создания корпоративных образований.

В силу последнего пункта выводов обратимся к анализу свойств хозяйственного механизма как научной категории. Основными признаками понятия как научной категории являются отражение в понятии наиболее общих и фундаментальных свойств и отношений явлений действительности; использование понятия в гносеологии и практической деятельности; способность понятия развиваться и обогащаться по мере развития объективной действительности и научного знания [2. С. 557].

Таким образом, следует доказать следующие предположения:

- категория «хозяйственный механизм» отражает наиболее общие и фундаментальные свойства хозяйственных систем и принимает многообразные формы с применением конкретных признаков уровней хозяйственных систем (в том числе корпоративных образований);

- категория «хозяйственный механизм» служит инструментом теории и практики хозяйствования, связывая термины и представления в дескриптивных и нормативных частях системных парадигм хозяйственных систем (в том числе корпоративных образований);

- категория «хозяйственный механизм» подвижна, гибка и развивается в сторону полного и всестороннего отражения хозяйственной практики.

Отражение общих и фундаментальных свойств хозяйственных систем в категории «хозяйственный механизм» доказывается соотношением понятий «система» и «механизм». Категория «система» шире, богаче, универсальнее. Категория «хозяйственный механизм» отражает систему с определенным качеством – детерминированностью, конкретизируя ее в аспекте законов устройства, развития и функционирования. В определенном значении понятия «механизм» и «система» являются синонимичными: как только вопрос касается устройства системы, ее организации, сразу появляется ее синоним «механизм»; вместе с тем, описывая эмерджентные характеристики хозяйственного механизма, используется понятие-синоним «система». Итак, фундаментальные свойства систем присущи хозяйственному механизму. Рассмотрим ряд системных законов и наличие их в хозяйственных механизмах.

Закон целостности отражает возникновение у системы новых интегральных качеств, не свойственных ее элементам:

- а) свойства системы Q не являются суммой свойств ее элементов g_i :

$$Q_s \neq \sum g_i;$$

- б) свойства системы зависят от свойств элементов:

$$Q_s = f(g_i).$$

Целостность характеризует взаимоотношения системы со средой и утрату элементами части своих свойств при включении их в систему. Хозяйственный механизм интерпретирует эти взаимоотношения в системное представление причин, обеспечивающих эти свойства.

Закон интегративности выражается наличием таких системообразующих факторов как противоречивость элементов, неоднородность и стремление к объединению. Хозяйственный механизм системно интерпретирует этот закон в причинности интеграции хозяйственной системы.

Закон коммуникативности проявляется в связях со средой как сложным неоднородным образованием. Хозяйственный механизм выражает эти связи в детерминированной форме. Закон связи со средой способствует иерархичному построению мира в целом.

Закон иерархичности основан на явлениях дифференциации и интеграции вследствие коммуникативности между уровнями иерархии сложной системы, при этом каждый уровень иерархии обладает двойственностью: в отношении нижележащего лежащий выше уровень имеет характер автономного целого; в отношении вышеразположенного уровня нижний уровень имеет зависимые свойства. Вследствие этого закона хозяйственный механизм имеет иерархическое устройство и вместе с тем отражает в детерминированной форме это общее свойство систем.

Закон инвариантности структурных связей обуславливает перенос инвариантных связей независимо от элементов системы в многообразных конкретных формах хозяйственного механизма.

Категория «хозяйственный механизм» в той или иной форме присутствует в сознании человека, осуществляющего научную и практическую хозяйственную деятельность, и переносится вследствие детерминированного мироощущения на многие другие естественные и искусственные системы. Сложность отражательной природы этой категории заключается также в том, что к детерминированию хозяйственных систем подходят в двух смыслах: внут-

реннем и внешнем. Во внутреннем смысле хозяйственный механизм есть детерминированная собственными внутренними целями совокупность ключевых элементов хозяйственной системы. Во внешнем смысле хозяйственный механизм является функциональным элементом системного образования более высокого уровня, образующимся вслед за требованиями надсистем, являющихся объективными условиями (по отношению к собственным целям хозяйственной системы), которые функционально формируют структурные параметры хозяйственного механизма, т. е. внешнее детерминирование.

Как гносеологическая единица категория «хозяйственный механизм» может иметь множество аспектов отражения сущности хозяйственных систем, прежде всего следующих:

- это структурная причина получения желаемого (требуемого) или фактического эффекта (результата) хозяйственной системы;
- система причинно-следственных связей между элементами хозяйственной системы;
- внутренняя закономерность связей элементов (частей) хозяйственной системы;
- форма выражения свойств гомеостаза хозяйственной системы (способ обеспечения целостности хозяйственной системы в среде);
- форма выражения свойств эквифинальности хозяйственной системы (обеспечение устойчивости функционирования и развития);
- дескриптивная и (или) нормативная часть системных парадигм хозяйственной системы.

Гносеологические аспекты категории «хозяйственный механизм» при использовании конкретных признаков хозяйственных систем способно породить множество определений этой категории в ее конкретных проявлениях. Рассмотрим этот момент на примере корпоративного образования. Определения хозяйственного механизма корпоративного образования, разработанные на основе отмеченных выше аспектов, представлены в таблице.

Некоторые определения понятия «хозяйственный механизм корпоративного образования»

Аспект категории «хозяйственный механизм»	Определение понятия «хозяйственный механизм корпоративного образования»
Структурная причина получения требуемого или фактического эффекта (результата) хозяйственной системы	1. Причинно-следственная структура взаимодействия средств и способов получения эффекта (результата) от деятельности корпоративного образования. 2. Совокупность взаимосвязанных средств для достижения хозяйственных целей
Система причинно-следственных связей между элементами хозяйственных систем	Совокупность причинно-следственных связей средств реализации хозяйственных процессов корпоративного образования
Внутренняя закономерность связей частей (элементов) хозяйственной системы	Закономерно обусловленные связи средств реализации хозяйственных процессов корпоративного образования
Форма выражения свойств гомеостаза хозяйственной системы (средство обеспечения целостности хозяйственной системы)	Детерминированная система взаимосвязей элементов хозяйственной системы корпоративного образования, обеспечивающая относительное постоянство внутреннего состава и свойств элементов и устойчивость основных функций корпоративного образования во внешней среде
Форма выражения свойств эквифинальности хозяйственной системы	Закономерно обусловленные взаимосвязи элементов, обеспечивающие способность корпоративного образования достигать состояния, не зависящего от времени и условий
Дескриптивная или нормативная часть парадигм хозяйственной системы	Концептуальная теоретическая или прикладная модель, дающая целостное представление о закономерностях и существенных связях корпоративного образования и его элементов в процессе достижения корпоративных целей

Категория «хозяйственный механизм» является откликом на научную и практическую потребность в анализе и синтезе имеющихся знаний для системной трансформации хозяйственных систем. При формировании корпоративных образований с помощью данной категории определяют отраслевую специфику корпоративного образования, системообразующие факторы, характер иерархических уровней корпоративного образования, закономерно получаемые эффекты (результаты) функционирования корпоративного образования, структурно-генетические аспекты, объясняющие развитие корпоративного образования, поведение корпорации во внешней среде и границы ее существования, и многие другие системные аспекты корпоративного образования.

В конечном итоге, детерминированная детализированная системная модель корпораций служит исходным моментом трансформации корпоративного образования и критериальной основой всех хозяйственных корпоративных решений. Определенную роль в разработке и реализации хозяйственных решений играет систематизация и классификация разновидностей хозяйственных механизмов корпоративного образования. Если в качестве типологических признаков принять виды условий детерминирования структур корпоративных образований, то образуются две типологических группы механизмов. Группа по видам элементов структур имеет две подгруппы хозяйственных механизмов: реальные и идеальные хозяйственные механизмы. Виды системных связей выделяют три основных подгруппы данных механизмов: связи развития – механизмы развития и саморазвития; связи функционирования – механизмы состояния и функционирования; связи управления – механизмы управления. Использование конкретных признаков и связей позволяет в рамках выделенных подгрупп выделять классификационные виды механизмов. Так, основные связи в социально-экономических системах позволяют выделить экономические, социальные, организационные механизмы и т. д.

Способность категории «хозяйственный механизм» к развитию и обогащению по мере развития хозяйственной практики и научного знания потенциально велика.

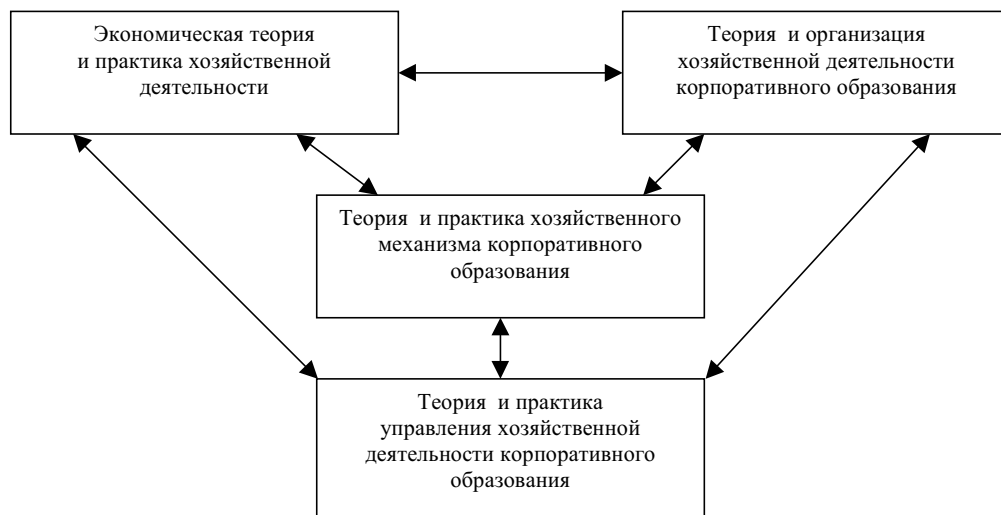
Прежде всего изучение статики и динамики хозяйственного механизма выявляет, с учетом конкретных экономических условий, определенные качественные и количественные явления – эффекты, появляющиеся в процессе функционирования механизма.

При неизменности механизма и относительной устойчивости хозяйственных условий выявленные эффекты начинают стабильно воспроизводиться, и повторяемость однотипных эффектов образует закономерность. Если изучаемый механизм является устойчивым и универсальным, то выявленная закономерность настолько растягивается во времени и распространяется в пространстве, что превращается в закон. Представление хозяйственного механизма предприятия в виде модели (или совокупности моделей) с выведением из нее возможных эффектов, закономерностей и законов представляет собой теорию хозяйственного механизма, актуальную для принятия хозяйственных решений.

Категория «хозяйственный механизм предприятия», являясь ключевой для современной хозяйственной деятельности, позволяет построить самостоятельную парадигматическую концепцию. В основе этой концепции лежит построение модели механизма (вербально-логической, структурно-графической, математической и т. д.). Категория «хозяйственный механизм» появилась в результате обобщения теории и практики хозяйствования и, прежде всего, развития знаний об экономике, организации и управлении хозяйственными системами, а любая из названных областей знаний включает и базируется на другой. Знания о хозяйственном механизме, с одной стороны, представляют нормативную часть любой из теоретических концепций экономики, организации и управления, с другой – дескриптивная часть теории и практики хозяйственного механизма является синтезом теорий экономики, организации и управления. В целом теория хозяйственной деятельности представляется интегрированной совокупностью знаний этих четырех основных областей хозяйственной теории и практики (см. рисунок).

Таким образом, теория и практика хозяйственного механизма является системообразующим ядром хозяй-

Хозяйственная теория корпоративного образования



Место теории хозяйственного механизма в системе знаний (хозяйственной теории) корпоративных образований

ственной теории корпоративного образования. Такое ее положение вытекает из соотношения структурных частей парадигм, синтезированных хозяйственной теорией. Любая парадигма корпоративного образования, касающаяся его существования и развития, как указывалось выше, содержит дескриптивную и нормативную части. Логически связанные друг с другом в дескриптивной части научные истины требуют подтверждения в практической деятельности. Вследствие этого парадигмы экономики, организации и управления, полученные на основе прежде всего целевого детерминатора, в нормативной части содержат описания соответствующих механизмов, конкретные признаки которых изложены в дескриптивной части. Интуитивно или осознанно, но категория «хозяйственный механизм» используется как интегрирующий инструмент гносеологической и практической деятельности. Чем выше прикладной уровень парадигмы, тем чаще конкретные формы категории «хозяйственный механизм» являются дескриптивной частью, а использование ее свойств – нормативной частью.

В связи с местом теории хозяйственного механизма естественна интегрированность его понятийного аппарата, с помощью которого раскрываются основные свойства категории «хозяйственный механизм» и осуществляется ее парадигматическое развитие. По своему научному статусу парадигма хозяйственного механизма относится не к общим аналитическим (коллекторским), а к интегрирующим (исследовательским) теориям, объединяющим парадигмы экономики, организации и управления и порождающим новые знания.

Парадигматический кризис создал предпосылки для формирования системной парадигмы. Одним из направлений разрешения этого кризиса видится развитие хозяйственной теории. На основе принципа единства науки синтез областей хозяйственных знаний создает основу для создания философской методологии в виде обобщенных знаний, каждый элемент которой развивается в неразрывной взаимообусловленности. Единой философской методологией хозяйственной теории является интенсивно формирующееся в настоящее время прикладное направление философии – хозяйственная философия.

Целостный подход к системному представлению корпоративного образования на основе категории «хозяйственный механизм» отражает переход от аналитического к системному мышлению, к всестороннему познанию хозяйственных явлений. Детерминация системных моделей в парадигмах корпоративного образования неизбежно приводит к синтезу знаний в парадигме хозяйственного механизма. Следовательно, единство и синтез знаний в

хозяйственном механизме корпоративного образования определяют прогресс науки и практики формирования корпоративных образований.

В заключение обобщим результаты исследований в следующих выводах:

– детерминирование системных представлений хозяйственных систем обусловило использование понятия «хозяйственный механизм» сущностью которого является детерминированная форма структурных связей объектов и субъектов в хозяйственной деятельности, вытекающая из определения «механизм» как структурной формы детерминизма любой системы. Проведенными исследованиями доказывается, что понятие «хозяйственный механизм» обладает всеми признаками научной категории: отражением общих и фундаментальных свойств хозяйственных систем; использованием ее как гносеологического и практического инструмента хозяйственной деятельности; способностью парадигматического развития. Парадигматические свойства этой категории обуславливают ее роль системообразующего ядра хозяйственной теории корпоративного образования;

– типологизация хозяйственных механизмов корпоративного образования на основе признаков условий детерминирования хозяйственных систем выделила две группы хозяйственных механизмов с подгруппами в соответствии с определенными признаками. Использование конкретных признаков системных элементов и связей и свойств инвариантности детерминированных структур приводит к существованию большого количества разновидностей конкретных хозяйственных механизмов корпоративного образования. Вместе с тем их классификация затруднена из-за отсутствия непротиворечивой концепции системных связей как научной категории. Конкретный хозяйственный механизм определяется системным представлением системообразующего элемента хозяйственного механизма – детерминированной единичной хозяйственной связи. Общие и конкретные свойства этого элемента в научной литературе освещены мало и требуют дополнительных исследований.

Библиографический список

1. Балацкий, Е. В. О виртуализации экономической науки / Е. В. Балацкий // Науковедение. 2003. № 1(17). С. 154–160.
2. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. М. : Сов. энцикл., 1984. 1600 с.
3. Экономическая теория : учеб. / под ред. А. Г. Грязновой, Т. В. Чечелевой. М. : Изд-во «Экзамен», 2003. 592 с.

G. S. Mikhalev

THE ECONOMIC MECHANISM AS A SCIENTIFIC CATEGORY

This article concerns development of concept «economic mechanism» beginning from the simplest intuitive forms of definition to scientific category which forms in the process of historic development of cognition on the basis of economical practice.

Н. М. Зубарев

ПРОМЫШЛЕННАЯ ПОЛИТИКА: СОСТОЯНИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ НОВОГО ВЗГЛЯДА НА СТРАТЕГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

Рассмотрены методологические подходы к промышленной политике в целом и, в частности, в Байкальском регионе. Определены задачи формирования оптимального набора целевых программ, обеспечивающих максимум целевой функции при ограничениях на их финансирование за счет собственного капитала.

Необходимость концептуального и методологического обоснования нового видения государственной промышленной политики в России и ее регионах обусловлена рядом обстоятельств. Имеющиеся наработки в этом направлении имеют существенные недостатки и повторяют идеи, ориентированные на развитие импортозамещения, протекционизм и поддержку экспорта, активной инновационной деятельности. Отсутствуют явно выраженные приоритеты государственной промышленной политики, не развит механизм ее реализации. Тем не менее на поддержку промышленности и ее отдельных отраслей из бюджета выделялись определенные средства, и их доля в структуре бюджета имела тенденцию к увеличению. Однако эффективность расходования этих средств при отсутствии выверенной стратегии промышленного развития была минимальной.

В подобных обстоятельствах актуальным становится применение селективного (избирательного) подхода. Но и здесь мы наблюдаем пробелы, которые объясняются двойственностью, возникающей при использовании этого подхода. С одной стороны, появляются возможности для лоббирования интересов отдельных групп. С другой стороны, значимой становится проблема составления точных прогнозов развития ключевых технологий и определения перспективных рынков. Принятие решений селективного характера в значительной степени уже не определяется логикой развития внутреннего рынка страны. В условиях глобализации появляется ранее не учитываемый объект – новые экономические явления, которые достаточно сложно учесть в качестве объекта промышленной политики.

В экономической литературе и практике можно встретить методики обоснования направлений промышленной политики, основанные на ранжировании объектов по определенным признакам и применении нового инструментария к группам этих объектов. В качестве признаков группировки выступают показатели эффективности, конкурентоспособность продукции, значимость объекта для муниципальной, региональной или федеральной экономики.

Широкое распространение получила точка зрения, исходящая при выборе приоритетов только из импульсов конечного спроса. В ней акцентируется внимание на появление эффекта мультипликатора, при котором увеличение потребительского спроса на продукцию отечественных производителей вызывает максимально полный эффект прироста спроса в сопряженных отраслях.

Ряд исследователей связывают достоинства теории селективного воздействия на экономические процессы с возможностью распространения мультипликативных

импульсов и получения желаемого эффекта при меньших затратах. Мультипликативное взаимодействие между выбираемыми и смежными объектами и их влияние на конечные результаты функционирования экономики могут быть эффективно оценены методом измерения взаимосвязи между структурными сдвигами на основе корреляционно-регрессионного анализа.

В работе [1] О. Ю. Красильниковым показано, что для осуществления широкомасштабной структурной перестройки экономики нередко достаточно инициировать первоначально относительно небольшой структурный сдвиг в одной из локальных экономических подсистем. Для выявления сдвигов в [1] вводится понятие коэффициента взаимодействия структурных сдвигов в экономике.

Находит применение и метод прямого счета, при котором наряду с показателями экономической, бюджетной, социальной, научно-технической, экологической эффективности проекта рассчитываются и дополнительные объемы производства, требуемого оборудования и затрат в смежных отраслях, инициирующих прирост прибыли подобными действиями в этом секторе экономики. А затем бюджетная эффективность пересчитывается с учетом воздействия проекта на смежные отрасли и производства. Но при этом достаточно сложно выявить межотраслевые взаимосвязи.

Классификацию объектов промышленной политики можно дополнить новым признаком и соответствующими ему классификационными элементами: по цели, результату воздействия и подходу к обоснованию влияния на приоритеты, точки роста и кризисные объекты.

Наряду с достоинствами, рассмотренные подходы имеют и определенные недостатки, что делает их неадекватными для достижения целей формулируемых в рамках концепции промышленной политики. Так, экономические расчеты, как правило, выполняются экстраполяцией уже существующих процессов, что может вступить в противоречие с сущностью и характером селективной промышленной политики. При использовании отмеченных методов возможно отражение лишь частных структурных сдвигов и их взаимодействий. Наконец, возникают большие сложности в определении степени влияния мер селективного характера на конечные результаты функционирования экономики.

С учетом выявленных обстоятельств наиболее приемлемым методом учета межотраслевых взаимодействий при выборе направлений и прогнозирования результатов промышленной политики становится межотраслевой баланс (МОТ) производства и распределения продукции (метод «затраты–выпуск»).

Достоинствами МОБ можно считать возможности количественной оценки мультипликативных эффектов с использованием коэффициентов не только прямых, но и полных затрат: количественного определения технологической взаимосвязанности производств, учета многих макроэкономических показателей, анализа валового выпуска продукции в зависимости от изменения факторов конечного спроса и технологических возможностей, количественной оценки прироста количества прямых и сопряженных рабочих мест при изменениях конечного спроса. Можно также определить эффективность последствий импортозамещения.

Сложности же применения этого подхода связаны с трудоемкостью разработки МОБ. В частности, необходимо спрогнозировать технологические коэффициенты на долгосрочную перспективу, для чего следует привлекать дополнительную информацию, связанную с единовременными обследованиями предприятий и организаций. Это обуславливает запаздывание разработок коэффициентов МОБ в сравнении с другими статистическими показателями.

Практически значимой при обосновании направлений промышленной политики является оценка прироста соответствующих стоимостных показателей деятельности (валовых выпуска, добавленной стоимости, прибыли) в зависимости от изменения конечного спроса. На основании информации, представленной в таблицах «затраты–выпуск», и основного тождества МОБ рассчитываются приросты этих показателей при приросте конечной продукции на 1 000 руб. Выполненные расчеты подтверждают гипотезу о том, что наибольший мультипликативный эффект вызывает развитие отраслей, ориентированных на потребительский сектор: производство продуктов пищевой, химической и нефтехимической, а также легкой промышленности. Исключением является производство черных металлов, где показатели прироста валового выпуска являются самыми высокими.

Однако следует отметить и такую зависимость: чем более производство ориентировано на конечные потребности (особенно населения), тем более низки показатели прироста валовой прибыли предприятий и организаций. В частности, из комплекса производств наименьший прирост прибыли наблюдается у производства продуктов легкой промышленности. Анализ эффективности импортозамещения на основании таблиц «затраты–выпуск» за 1998–2003 гг. подтверждает вывод о том, что сокращение импорта продукции химической и нефтехимической промышленности, машин и оборудования, продуктов металлообработки и, соответственно, сокращение экспорта энергоресурсов, цветных металлов способно обеспечить значительную экономию валютных ресурсов.

Одним из эффективных инструментов государственной промышленной политики в дополнение к предложенному подходу, основанному на методе МОБ, становится программно-целевой метод планирования. Целевые программы призваны сыграть важную роль в развитии экономики, включая такие ее направления, как стимулирование спроса для развития новых секторов экономики, характеризующихся эффектом сети, когда выход на соответствующий рынок для хозяйствующих субъектов становится экономически выгодным.

Механизм программно-целевого планирования стратегического развития промышленности основан на фор-

мировании портфеля целевых программ и моделей оптимизации их финансового обеспечения. Это способствует эффективному использованию имеющихся ресурсов в условиях дефицита бюджетного финансирования и нормирования инвестиций.

Программно-целевой подход в условиях высокой неопределенности и риска становится системным инструментом развертывания эффективной промышленной политики, взаимоувязанной по ресурсам, срокам и исполнителям приоритетных стратегических мероприятий, учитывающей вероятностные сценарии реализации стратегии развития, конечные результаты достижения поставленной цели, оптимальные пути и средства решения проблем.

В Байкальском регионе реализация действенной промышленной политики лишь в малой степени отражена в законодательстве о целевых программах. Исправление этого состояния, как нам представляется, имеет большую актуальность для практики. Анализ показывает, что недостаточная результативность целевых программ связана с постоянным снижением средств на инвестиции и с увеличением текущих расходов в структуре их финансирования. Дело в том, что на федеральном уровне до 46 %, а в Байкальском регионе до 95 % по доле финансирования расходов на реализацию целевых программ в совокупном объеме бюджетных расходов на них и 50 % по количеству приходится на программы производственной и инфраструктурной направленности. На практике такие программы стали скорее способом бюджетного софинансирования множества разрозненных проектов, нежели средством обеспечения прогрессивных сдвигов в экономике. Это происходит из-за отсутствия целостной, сбалансированной промышленной политики, обосновывающей национальные приоритеты в программном регулировании экономического развития.

В этой связи следует обратить внимание на совершенствование правовой базы, регламентирующей разработку и реализацию целевых программ развития промышленности. Бесспорным является и тот факт, что совершенствование системы нормативно-правового обеспечения целевых программ является основной функцией государства. В основу этого процесса следует положить базовые принципы программно-целевого планирования: целенаправленность, комплексность, оптимальность, научность.

Необходимы и новые методы, основанные на адресном характере работ, на принципе блочности базовых составляющих. Это позволит дифференцировать подходы к применению мер поддержки администрацией региона различных субъектов промышленной деятельности, а также субъектов инфраструктуры промышленности, имеющих различный уровень социально-экономической значимости для территории и занимающих разные позиции на внутреннем и внешнем рынках. Формирование оптимального портфеля этих программ следует вести с ориентацией на такие критерии, как стратегическая чистая дисконтированная стоимость, чистая прибыль, налоговые отчисления в местный и федеральный бюджеты, денежные доходы населения, обеспечение занятости. Этот подход следует использовать при формировании целевых программ, направленных на развитие любой отрасли промышленности.

Задача формирования оптимального набора целевых программ заключается в определении интенсивности реализации того или иного проекта как составной части промышленной политики (мероприятия) z_{ji} из n_{ji} всех проектов, обеспечивающих максимум целевой функции $\sum_{i=1}^n Y_{ki} z_{ji} \rightarrow \max$ при ограничениях на их финансирование за счет собственного капитала $\sum_{i=1}^n N_0 z_{ji} \leq F_j$, где Y_k – критерии отбора проектов и мероприятий для включения в целевые программы как составные элементы промышленной политики; z_{ji} – интенсивность реализации того или иного проекта (мероприятия); N_0 – объем собственного авансированного капитала инвестора, направляемого на исполнение отдельного проекта, $N_0 > 0$; F_j – предельный инвестиционный бюджет программы. Другое условие ориентировано на интенсивность использования проектов $0 \leq z_{ji} \leq 1$.

Обозначенные выше критерии описывают многие стороны деятельности, но каждый из них имеет и определенные недостатки. Принятие решений на основе анализа по количественным критериям формирования и отбора целевых программ должно быть дополнено оценкой по качественным критериям, в числе которых можно отметить соответствие целевой программы приоритетам социально-экономического развития, комплексность решаемой проблемы для территории, привлечение внебюджетных средств к реализации мероприятий, наличие прогнозных результатов эффективности их реализации, обеспеченность финансовыми ресурсами бюджета соответствующего уровня.

Такой методический подход позволяет оптимизировать финансовое обеспечение целевых программ, используя, в частности, метод опционов. На этой основе органы государственного управления совместно с корпорациями при реализации целевых программ получают возможность формировать опционные стратегии для их осуществления.

Принятие экономических решений – процесс дедуктивный, который характеризуется точностью, аналогичной точности математических доказательств

Поэтому экономисты в первую очередь отдают предпочтение идее анализа окружающей реальности в терминах решений. Представители же государственных бюрократических структур, равно как и все другие члены общества, обычно руководствуются в своем поведении, если не полностью, то хотя бы частично, собственными интересами. К примеру, политические деятели развитых стран ищут преимуществ как для себя лично, так и для своего электората, стараясь максимизировать выгоды и минимизировать потери.

Экономические науки, заложив в основу концепции микроэкономики идею стремления собственника к максимизации выгод, используют в поиске решения методы оптимизации, дополняя этот процесс логикой и математическими расчетами, с учетом наблюдения и опыта. Если использовать анализ типа метода «затраты–выгоды», то идеи логического позитивизма в процедурах формирования эффективной промышленной политики могут оценены по двум пунктам.

Определив общую систему ценностей и игнорируя субъективные ощущения, можно построить суждение о поведении, оптимально соответствующем данной ситуа-

ции. Анализ «затраты–выгоды» помогает определить некоторый стандарт оптимальности, по отношению к которому затем оцениваются конкурирующие альтернативы. Выполненные расчеты могут помочь разобраться в сложных, требующих комплексного решения, ситуациях. Анализ типа «затраты–выгоды» может вскрыть замаскированные или скрытые факты, предложить пути, позволяющие раздвинуть границы интуитивного подхода.

Вместе с тем по опыту развитых стран известно, что подобный подход зачастую приводит к недооценке мероприятий, которые более справедливо распределяют общественные блага, и к переоценке тех из них, которые способствуют росту экономического неравенства. Чтобы избежать подобного явления, планируемые решения должны оцениваться в терминах возможных альтернатив.

Применение систематического формального анализа гораздо меньше сопряжено с вероятностью потери важных фактов, чем использование конкурирующих подходов, например таких, как политический, и скорее помогает определить общественные интересы, чем абстрактные соображения субъективного характера.

Сторонники активного государственного вмешательства в экономику в качестве главного недостатка метода «затраты–выгоды» при его использовании в процедурах формирования эффективной промышленной политики, отмечают его невозможность обеспечить именно то, в чем роль государства наиболее значительна, – ее социальную составляющую. Ограниченность отмеченного подхода состоит в том, что лица, принимающие решения, даже в искусственно смоделированной ситуации осуществляют окончательный выбор на основе иных, отличных от предлагаемого подхода критериев. В их числе приемлемость с управленческой точки зрения и риск возможных злоупотреблений. На практике они очень часто оказываются более весомыми, чем экономические показатели, в частности соотношение затрат и выгод.

Важным моментом является процесс взаимодействия механизмов рыночного саморегулирования и хозяйственного планирования. В современных условиях наряду с использованием рыночных механизмов активно применяются административно-правовые инструменты регулирования экономики. Тем не менее в условиях ее кризисного состояния желаемого синергетического эффекта от этих направлений промышленной политики не наблюдается. Поэтому наиболее значимые решения в области макроэкономической, структурной и региональной политики должны быть дополнены решениями, касающимися социальных отношений, в связи с чем возникает вопрос о выработке и согласовании целей экономической и промышленной политики и их приоритетности.

В настоящее время все большее распространение получает непосредственная интеграция социальных и экономических целей в рамках единого процесса государственного регулирования промышленной политики. Вектор целей стабилизации экономического роста и основных целей промышленной политики совместно с институциональными и политическими решениями призван предопределять долгосрочную стратегию развития. При таком подходе социальная политика будет максимально способствовать стабилизации и экономическому росту.

Для оценки эффекта воздействия социальных переменных на состояние промышленной политики используется методологический подход, основанный на концепции внешнего влияния с оценкой эффектов замещения и дополнения. Этот подход может быть применен к исследованиям взаимодействия элементов системы. Увеличение объема социальных инвестиций приводит к замещению производственных вложений. Обратный замещающий эффект вызывает рост объемов производственных инвестиций. Вложения в социальную сферу могут способствовать повышению эффективности человеческого капитала, рационализации структуры потребительских предпочтений и позитивному изменению других внешних факторов деятельности, что послужит улучшению инвестиционного климата, благоприятствующего формированию эффективной промышленной политики.

Оценка эффекта такого рода с учетом неопределенности производится путем проектирования соответствующих функциональных зависимостей для факторов, определяющих конечные результаты. Таким образом, выбор предпочтительного варианта согласования решений предполагает достоверную оценку эффектов замены и дополняемости. Игнорирование этих обстоятельств приводит к недопустимым материальным и финансовым потерям. С целью устранения или сглаживания этих последствий и принятия своевременных управленческих решений при формировании и реализации как составных частей промышленной политики, так и ее в целом предлагается применять процедуры моделирования эффективного использования лимитируемых ресурсов. Одним из таких инструментов становится теория опционов.

Недостаток рыночной системы заключается в неспособности удовлетворить индивидуальный спрос на товары и услуги, потребляемые коллективно. Только часть из них может обеспечиваться рыночной системой, остальные же коллективные потребности рынок удовлетворить не может. Теория благосостояния предусматривает исправление этих недостатков путем бюджетного перераспределения доходов. По мнению ее сторонников, государство должно регулировать внешние воздействия и удовлетворять спрос на общественные товары.

Подходы к решению проблемы благосостояния применительно к условиям развитой рыночной среды можно проиллюстрировать на примере экономики Франции. Взаимосвязь коллективного оптимума и функционирования рынка в условиях частной собственности определяется как конкурентное преимущество. Если преимущество существует, то это будет оптимум по Парето при условии, что

индивидуальная функция полезности строго возрастает. Если же она непрерывна, квазивогнута, строго возрастает и множество производственных возможностей выпукло, то можно найти такую систему рыночных цен, в которой это состояние воспроизводится.

На наш взгляд, существует два важных направления вмешательства государственных (общественных) органов в процесс удовлетворения потребностей на общественные товары: регулирование и перераспределение. Если рыночная экономика удовлетворяет спрос потребителей по самым низким (приемлемым) ценам, то уменьшается потребность в прямых государственных инвестициях. Когда участники этих мероприятий не могут учесть выгоду и дополнительные издержки, то и рынки не способны обеспечить эффективное размещение и оптимизацию ресурсов.

О необходимости вмешательства следует думать и тогда, когда рынки не справляются со своей работой, т. е. когда имеется неудовлетворенный спрос или велики цены. В этом случае нужны государственные инвестиции, а это значит, что возникла потребность в надрыночных установлениях. Именно здесь проявляется весь спектр противоречий, а также компромиссов, призванных смягчить напряженность в обществе, на которые будет способна пойти администрация территории. И все это можно осуществить в рамках формирования эффективной промышленной политики.

Таким образом, предложенный в данной статье методологический подход становится основанием для разработки рациональных направлений промышленной политики и выявления точек роста. Он позволяет определить степень соответствия мероприятия конкретному критерию, осуществить интегральную оценку его влияния на развитие промышленности региона и на этой основе принять оптимальное решение по всей совокупности программ-мероприятий. Однако в случае выбора приоритетов и кризисных объектов окончательное решение должно приниматься не на основании оценки мультипликативных эффектов, а с учетом возможных последствий для экономики от принимаемых решений с использованием изложенного выше подхода или его отдельных элементов.

Библиографический список

1. Красильников, О. Ю. Структурные сдвиги в экономике / О. Ю. Красильников. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2001.

N. M. Zubarev

THE INDUSTRIAL POLICY: THE CONDITION METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE CREATION OF THE VIEW ON THE STRATEGIC DEVELOPMENT

The methodological approaches to the industrial policy are researched in the article, on the whole and in the Baikal region particular. Besides, the tasks of creation of the optimal set of the special programs are defined and they the tasks provide the maximum of the special function with the limitation on their financing at the expense of own capital.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Рассмотрены методологические подходы к решению проблем алгоритмизации процесса формирования корпоративных образований, предложена классификация методов формирования этих образований на основе системного уровня объекта и частей алгоритма.

Актуальность и значимость проблемы выбора методов формирования корпоративных образований общеизвестна. Вместе с тем, несмотря на многочисленные предлагаемые рекомендации в этой области, она остается во многом не решенной по ряду обстоятельств.

Как показал проведенный нами анализ, проблема создания системного методического обеспечения процессов деятельности по формированию корпоративных образований является практически не освещенной в известных литературных источниках. Методическое обеспечение, используемое в практике создания и реализации корпоративных проектов, является случайным набором отдельных методов, возникшим в результате выбора конкретного метода для отдельного действия по формированию корпоративного образования. При этом совершенно не учитывается системная взаимосвязь и взаимообусловленность используемых методов и возможность интеграции промежуточных результатов в итоговые. Обращает на себя внимание эклектизм в сочетании данных методов, их бессистемность даже в рамках одной стадии проектирования. Все эти обстоятельства являются типичными в методическом обеспечении процессов проектирования хозяйственных образований и реализации экономических проектов.

Решение проблемы выбора методов формирования корпоративных образований видится автору в следующих направлениях: а) выбор принципа типологизации методов и классификация методов в увязке с деятельностными алгоритмами формирования корпоративных образований; б) идентификация методов получения результатов в аспекте их известности, т. е. поиск и привлечение требуемых методов; в) особенности взаимосвязи привлекаемых методов и их влияние на алгоритмизацию деятельности по формированию корпоративных образований. Рассмотрим эти направления подробнее.

Как показал анализ алгоритмизации процессов формирования корпоративных образований, в основе этих ал-

горитмов лежит деятельность субъекта, связанная с исходным и завершающим моментами, отражающими различные аспекты цели как общего атрибута сознательной деятельности человека. Вследствие особенностей субъективно-объективного устройства природы человеческой деятельности методологические проблемы появляются в соотношении и взаимодействии двух ее составных частей: сознания и материального бытия. В общем виде цель-потребность появляется в форме несоответствия *имеющегося* материального и идеального и *желаемого*, принимающего форму эталона, образца, состояния материального и идеального. Трансформация антропогенных систем из состояния «как есть» в состояние «как должно быть» опосредуется деятельностью, которая в силу природы сознания также представляется идеальной и реальной (материальной) деятельностной системой. Таким образом, данные рассуждения позволяют схематично представить логические связи указанных аспектов (рис. 1).

На основе этой схемы можно выделить следующие основные типологические группы методов, рассматривая их как способ осуществления деятельности и получения результата:

- методы создания идеальной системы «как есть»;
- методы создания идеальной деятельностной системы;
- методы создания идеальной системы «как должно быть»;
- методы создания, организации и управления функционированием реальной системы «как есть»;
- методы организации и управления реальной деятельностной системой по устранению несоответствий;
- методы создания, организации и управления реальной системой «как должно быть».

При анализе типологических групп методов должны учитываться два обстоятельства. Во-первых, в хозяйственной человеческой деятельности, выступающей в качестве сознательной, целевой, идеальное первично, а реальное –

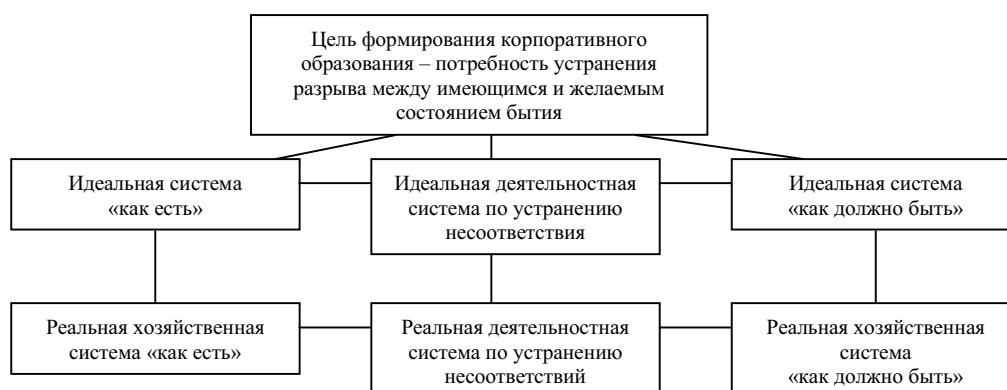


Рис. 1. Взаимосвязь компонентов процесса формирования корпоративных образований

вторично. Таким образом, последовательность использования типологических групп методов представляет линейную цепь, отражающую деятельностную структуру «цель—средство—результат» с последовательным переходом от идеального к реальному. Во-вторых, идеальное, существующее в форме человеческих знаний (общественного сознания) относительно самостоятельно по отношению к реальным хозяйственным системам (бытию) и существует и развивается по собственным законам. Хозяйственные системы, являющиеся искусственными, представляются материализованными, застывшими в качествах соотношения и взаимосвязи материальных объектов, удовлетворяющих потребности человека. В этом аспекте типологические группы методов, относящихся к реальным системам, направлены на изменение материальных знаний. Проблема адекватности методов целям деятельности при таком подходе приобретает четкие границы: а) адекватность внутренним условиям типологической области своего использования; б) адекватность условиям трансформации идеального в реальное. В последнем случае речь идет о том, насколько правильно определяются области, «точки» хозяйственной системы и деятельностной системы для получения желаемого состояния. Решение проблемы адекватности в разрезе деятельностной алгоритмизации приобретает форму установления обратных связей для коррекции компонентов (см. рис. 1) как по горизонтали, так и по вертикали типологической системы методов.

Отдельный вопрос — это анализ методологической проблемы формирования систем «как есть» и «как должно быть» и проблемы детерминирования ими деятельностной системы по устранению несоответствий. Здесь возникают два основных методологических аспекта.

Первый заключается в соотношении понятий потенциальных и реальных¹ потребностей. Если учесть, что понятие реальных потребностей связано с наличием у субъекта средств их удовлетворения, то предложенные в данной статье типологические группы методов определяют возможности трансформации систем «как есть» в системы «как должно быть». Более того, использование конкретных методов и приемов определяет требуемые для их реализации ресурсы, а это в свою очередь вызывает образование самостоятельной области методологических и прикладных проблем по поиску, выбору, привлечению и использованию требуемых ресурсов. Вместе с этим отмеченная область проблем является частной, подпадающей под логику наших рассуждений.

Второй методологический аспект состоит в детализации систем «как есть» и «как должно быть». Системное представление корпоративного образования формируется на основе представления его как элемента среды и как системной структуры в среде (так называемые «черный» и «прозрачный» ящики в научных подходах).

Первый подход связан с проблемами ответа на вопрос: «До какой степени детализации выделять параметры корпоративного образования как целого и, соответственно, до какой степени детализировать факторы внеш-

ней среды, так или иначе связанные с параметрами корпорации как целого?». Ответ на этот вопрос осложняет такая особенность корпораций, как активное формирование внешней среды. Примеры активного формирования корпорациями внешней среды: создание лобби в государственных органах управления, давление на другие хозяйствующие субъекты для изменения общей системы логистических цепей и производственных цепочек, финансовых потоков и т. п. Для этого используются соответствующие методы, образующие отдельную совокупность относительно положения в системном представлении и системном формировании корпоративных образований.

Второй подход связан со структурным представлением корпорации и также обуславливает проблему глубины детализации этого представления. Поскольку корпоративное образование представляет собой открытую систему и ее функциональные элементы имеют свои связи со средой, то, как и при первом подходе, возникают проблемы детализации функциональных областей внешней среды по связям элементов системы. Каждый уровень детализации увеличивает в геометрической прогрессии количество методов для получения частных результатов и интеграции их по уровням детализации в системном представлении корпоративного образования.

Как указывалось выше, общее и детализированное системные представления присутствуют в деятельности в качестве исходных и завершающих моментов, а также опосредованно участвуют в самой деятельности, детерминируя ее (рис. 2). Рассмотрим их роль в процессе формирования корпоративных образований.

Сам процесс формирования состоит из двух больших этапов: этапа получения идеальной системы «как должно быть» и следующего за ним этапа создания реальной системы «как должно быть». Роль и назначение системных представлений корпоративного образования на этих этапах различна.

На *первом этапе* системное представление само является результатом деятельности в виде прикладной системной модели (проектной документации), содержащей качественное и количественное описание желаемой реальной системы «как должно быть» и описание алгоритма трансформации (перехода) реальной системы «как есть» в состояние «как должно быть». Специфика результата, требуемого на этом этапе, обуславливает специфику содержания и организации деятельности. В аспекте соотношения общего и детализированного системных представлений сущность деятельности на данном этапе состоит в переводе целостного образа, характеризующегося малой квантифицируемостью и высокой степенью непрерывности, в дискретную формальную системную модель. Первичное придание дискретности общему системному представлению осуществляется работами по формированию задания на проектирование, являющихся одной из фаз этого этапа.

Достаточно часто в проектной деятельности все фазы этапа, предшествующие созданию задания на проект, объединяют под названием «концептуальная стадия». На этой стадии оперируют понятием «идея» и последующей ее дискретизацией в виде начальной системной модели объек-

¹ Автору сознательно приходится в этом месте исследование использовать определенную тавтологию для того, чтобы не уходить в семантические проблемы.

та проектирования (по сути, данный подход можно назвать «полупрозрачным ящиком»). Эта начальная модель обуславливает систему действий по получению конечного результата, принимающую конкретную форму программы (планов) проектной деятельности, итогом которой будет детализированная дискретная системная модель. Методологической особенностью данного этапа является то обстоятельство, что происходит оперирование идеальными построениями предполагаемого результата и предполагаемой деятельности для его получения. Реализация алгоритма этой деятельности представляет собой материальный процесс, но результатом этого материального процесса является идеальный результат, который на следующем этапе формирования требуется трансформировать в реальную систему «как должно быть».

Методологические проблемы этапа создания идеальной детализированной системной модели корпоративного образования порождаются существованием и взаимодействием реальной системы (реальных действий разработчика) в идеальном окружении (идеальные исходный и конечный моменты деятельности и алгоритм деятельно-

сти). В этой связи прежде всего выделяется группа проблем, связанных с критериальными оценками, в общем виде отраженными на рис. 2 блоком «Определение степени удовлетворенности идеальной системой “как должно быть”». В практике формирования корпоративного образования данный блок реализуется процедурами экспертизы проекта. При этом критериальные оценки делятся на две части: одна часть отражает качество идеального результата (детализированной системной модели), другая – параметры функционирования реальной системы (реальных действий разработчиков).

Первая группа критериальных оценок связана с сравнением полученной модели корпоративного образования с некоей эталонной моделью. В методологическом аспекте эта модель означает возврат к паре «общее системное представление – детализированное системное представление формирования корпоративного образования». После этого процедуры создания уже *эталонной* идеальной системы «как должно быть» повторяются.

Далее процедуры экспертизы связаны с решением проблем адекватности полученного на данном этапе ре-

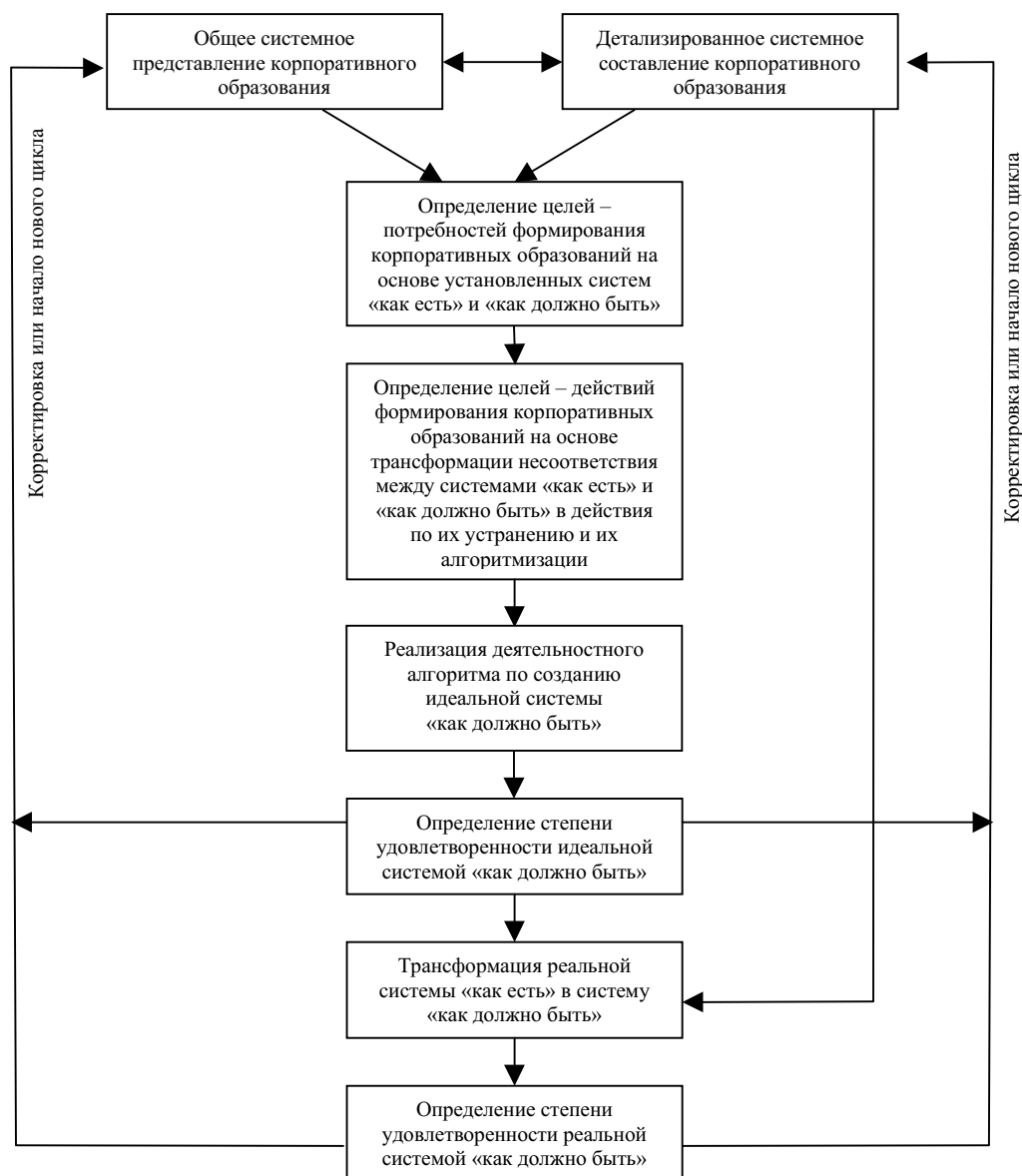


Рис. 2. Блок-схема алгоритма процесса формирования корпоративных образований

зультата эталонному системному представлению. И речь начинает идти о методологических подходах к системному видению и представлению экспертами эталона идеальной системы. С одной стороны, это связано с различием методологических подходов, использованных разработчиком для первичного общего и детализированного представлений. С другой стороны, это приводит к различию методов получения промежуточных результатов и итогового идеального результата. При этом следует иметь в виду, что идеальная система «как есть» означает использование наличных знаний, накопленных в общественном сознании, а идеальная система «как должно быть» связана с использованием этих знаний в проектной области, а также с возможным их приращением, что проявляется в научной новизне разработок.

Таким образом, процедура экспертизы предполагает оценку целевой эффективности идеального результата, в нашем случае – теоретической эффективности, связанной с сравнением полученной и эталонной систем «как должно быть», а по сути – с привлеченным использованием существующих и выработкой и использованием новых знаний. Также здесь проверяется реализуемость идеальной системы «как должно быть», обуславливающей оценку ресурсной эффективности, т. е. установлений соотношения «потенциальная потребность – реальная потребность». Отметим, что выделение отдельных аспектов целевой и ресурсной эффективности и их интеграция в системном представлении исследуемых объектов породили множество методов и показателей оценки эффективности проектов. Не отвлекая внимание на это обстоятельство, являющееся предметом для самостоятельного исследования, продолжим анализ рассмотрением содержания экспертизы результатов реальной деятельности, отражающей вторую группу критериальных оценок.

Создание, организация и управление реальной системой проектирования является предметной областью научного и прикладного направления, называемого «проектный менеджмент», и ему посвящено множество исследований, сформирована даже целая учебная дисциплина для подготовки специалистов в этой области. Исходя из обусловленности содержания и организации проектной деятельности, данное направление в центр своего внимания ставит методы решения проблем эффективного использования всех видов ресурсов, требуемых для получения проектного результата. С одной стороны, результатом является идеальная система «как должно быть», уже сформированная для экспертной оценки в рамках целевой эффективности. С другой стороны, исходный момент проектной деятельности в форме принимаемого исходным (и отраженным в задании на проект) системного представления корпоративного образования конкретизируется проектной деятельностью в завершающий момент – результат в форме детализированной системной модели. При этом эффективность привлеченных и использованных ресурсов оценивается в процессе трансформации исходного момента проектной деятельности в завершающий. В силу сознательного и в то же время бессознательного разрыва методологической связи целевой (теоретической) эффективности и целевой эффективности реальной проектной системы могут появляться диа-

метральные противоположные экспертные оценки: высокий уровень теоретической эффективности с низкой ресурсной эффективностью проектной организацией (реальная система проектирования) и, наоборот, низкая теоретическая эффективность и высокая ресурсная эффективность проектной организации. Проблемы оценки системной эффективности считаются малоисследованной областью методологического анализа, и в научной и прикладной проектной деятельности остаются открытыми, т. е. решение их осуществляется по усмотрению специалиста (в том числе эксперта) или потребителя результатов проектирования.

Потребление специфического продукта в виде идеальной детализированной модели корпоративного образования происходит на *втором этапе* формирования этого образования – этапе трансформации реальной хозяйственной системы «как есть» в систему «как должно быть» (см. рис. 2). Данная модель является исходным моментом для реальной системы действий по изменению параметров хозяйственной системы по направлению от того «как есть», к тому «как должно быть».

Вместе с тем, часть идеальной системы «как должно быть» на этом этапе используется по-разному, поскольку она выступает в роли инструмента трансформации. Модель (алгоритм) действий по устранению несоответствий кладется в основу временной, пространственной и ресурсной координации реальных действий, а модель корпорации «как должно быть» используется как критериальная база целевой и ресурсной эффективности трансформации реальной хозяйственной системы. Вследствие этого при принятии хозяйственных решений на первый план выходят аспекты адекватности идеальных моделей реальным системам, и проблемы обеспечения их полной адекватности решаются в деятельностном плане. Но временные различия в появлении исходных системных представлений для этапа создания идеальной системы и для этапа трансформации реальной хозяйственной системы из-за высокой динамики хозяйственных процессов приводят к расхождению идеальной системы, возникающему вследствие принятых исходных условий на один момент времени и «наложением» идеальной модели на хозяйственную систему с изменившимися условиями в другой момент времени, отстоящий от первого на период создания идеальной модели. Период трансформации системы также характеризуется временной протяженностью и изменением условий на начало и конец трансформационных преобразований. Такое объективное обстоятельство требует постоянной корректировки исходного момента в системе трансформационных действий, что ведет в образованию развитой сети обратных связей, корректирующих целевое начало, алгоритмическое и ресурсное обеспечение этого вида деятельности. Интегральное накопление частных коррекций в определенных случаях приводит к необходимости смены, обновления детализированной системной модели корпоративного образования, т. е. повторения цикла создания идеального результата. На практике в этом случае говорят об устаревании проекта, проекте «вчерашнего дня» и т. п., однако методологическая проблема здесь состоит только в повторении цикла с учетом изменившихся условий.

В полном объеме детализированная системная модель корпоративного образования как критерий используется при определении степени удовлетворения потребностей в реальной хозяйственной системе «как должно быть». Здесь, как уже отмечалось выше, также возникает двойственность оценок эффективности трансформации хозяйственной системы вследствие использования разных системных представлений корпораций.

Первая системная оценка эффективности преобразований выстраивается по направлению сравнения: параметры реальной системы «как было» – параметры реальной системы «как стало» – в системе критериальных оценок, задаваемых общим системным представлением с обратным движением к видению корпоративного образования, послужившему когда-то основой общего и детализированного представления. Оценка ресурсной эффективности здесь играет подчиненную роль по отношению к адекватности видения и созданной хозяйственной системы. Данное направление системной оценки эффективности трансформации характерно для субъек-

та, который отражается понятием «заказчик» в проектном менеджменте и «собственник корпорации» в корпоративном менеджменте.

Второе направление оценки удовлетворенности трансформациями реальных систем основано на оценке адекватности модели «как должно быть» параметрам созданной в результате трансформации реальной системы, при этом методы оценки ресурсной эффективности выходят на первый план, а целевая (теоретическая) эффективность является производной. Это обусловлено доказательством истинности теории, критерием которой является практика, т. е. ресурсная эффективность. Данное доказательство служит основой для включения идеального результата в систему общественного сознания в качестве теоретических и прикладных знаний для последующего их использования. Это направление оценки эффективности характерно для субъекта, который фигурирует под названием «исполнитель», «специалист проектного менеджмента», «эксперт». Достаточно часто конфликтное противостояние заказчика и исполни-

Классификация методов формирования корпоративных образований по уровням и компонентам процесса деятельности

Объект процесса формирования корпоративного образования	Модель системы «как есть»	Модель системы «как должно быть»	Модель системы трансформационной деятельности	Реальная система деятельности по трансформации систем	Оценка удовлетворенности трансформацией системы «как есть» в систему «как должно быть»
Общесистемный уровень «корпорация – среда»	1. Методы формирования общего и детализированного системного представления системы «как есть» и их формализации. 2. Методы формирования интегрированных моделей по общекорпоративным функциям системы «как есть»	1. Методы формирования общего и детализированного системного представления системы «как должно быть» и их формализация. 2. Методы формирования интегрированных моделей по общекорпоративным функциям систем «как должно быть»	Методы формирования модели деятельности трансформации системы «как есть» в систему «как должно быть» на уровне «корпорация – среда»	Методы управления реальной системой действия по трансформации системы «как есть» в систему «как должно быть» внешней среды корпорации	1. Методы оценки эффективности изменения системы на уровне «корпорация – среда». 2. Методы использования оценок эффективности в реальной системе действий
Общекорпоративный функциональный уровень «общекорпоративная функция – среда»	1. Методы формирования моделей по отдельным общекорпоративным функциям системы «как есть» 2. Методы формирования интегрированных функционально-объектных внутрикорпоративных моделей	1. Методы формирования моделей по отдельным общекорпоративным функциям системы «как должно быть» 2. Методы формирования интегрированных функций объектных внутрикорпоративных моделей и систем «как должно быть»	Методы формирования модели трансформационной деятельности на уровне «общекорпоративная функция – среда»	Методы управления реальной системой действий по изменению общекорпоративных функций	1. Методы оценки эффективности изменений на уровне «общекорпоративная функция – среда». 2. Методы использования оценок эффективности в реальной системе действий
Объектно-функциональный внутрикорпоративный уровень «внутрикорпоративный объект (функция) – корпорация»	Методы формирования отдельных объектно-функциональных внутрикорпоративных моделей системы «как есть»	Методы формирования отдельных объективных функциональных внутрикорпоративных моделей системы «как должно быть»	Методы формирования модели трансформационной деятельности на объектно-функциональном внутрикорпоративном уровне	Методы управления реальной системой действий по объектно-функциональным внутрикорпоративным изменениям	1. Методы оценки эффективности изменений на объектно-функциональном внутрикорпоративном уровне. 2. Методы использования оценок эффективности в реальной системе действий

теля имеет в своей основе именно разные оценки эффективности.

Таким образом, рассмотрение методологических проблем выбора принципов типологизации методов и решения задач классификации методов в увязке с деятельностными алгоритмами формирования корпоративных образований привело нас к результату, представленному в таблице. Классификация составлена на уровне совокупности методов, объединяемых по двум типологическим признакам: системному уровню объекта формирования и компонентам структуры хозяйственной деятельности человека. Она является базой выбора конкретного метода в рамках типологических групп, т. е. базой построения классификационных уровней более низкого уровня, построенных на классификационных признаках с высоким уровнем конкретности.

Выбор конкретного метода в рамках типологической группы связан с двумя методологическими процедурами: а) идентификации метода при его привлечении и использовании для конкретной деятельности; б) системной увязкой (обеспечением сочетаемости) методов между собой в алгоритмизации деятельности по формированию корпоративного объединения.

На основании вышеизложенного сделаем следующие выводы:

– процесс формирования корпоративных образований связан с двумя аспектами человеческой деятельности: идеальным и реальным. Идеальная (сознательная) деятель-

ность и ее результаты образуют идеальную систему, реальная (материальная) деятельность и ее реальные результаты – соответственно реальную систему. Формирование корпоративных образований в своей сущности представляют процесс деятельностной трансформации идеальной и реальной систем из состояния «как есть» в состояние «как должно быть». Алгоритм формирования корпоративного образования распадается на две последовательно связанные части: трансформацию идеальной системы, результатом которой является детализированная системная модель корпорации «как должно быть», и трансформацию реальной хозяйственной системы в соответствии с моделью, являющейся исходным моментом деятельности в этой части алгоритма, результатом при этом выступает реальная хозяйственная система «как должно быть». Соответственно методологическое обеспечение распадается на две части: методы трансформации идеальной системы и методы трансформации реальной системы;

– проведенная типологизация методов по частям алгоритма и компонентам структуры человеческой деятельности «цель–средства–результат», с одной стороны, и системный уровень процесса формирования – с другой, обусловили построение классификации методов формирования корпоративных образований, включающий 15 классификационных групп;

– решение проблем выбора конкретных методов формирования корпоративных образований связывается с идентификацией метода и его системной привязкой к требуемым результатам.

G. S. Mikhalev

THE METHODOLOGICAL BASES OF ALGORITHM OF CORPORATIONS PROJECTION

In this report methodological approaches to settling problems of algorithmization of process of corporations projection are revealed. Also here is given a classification of forming methods on the basis of system level of object and parts of algorithm.

А. В. Михайлов

ВЕРБАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА И ПРИЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ГРУППОВОГО СОЗНАНИЯ

Рассматривается ряд вербальных средств и приемов, используемых для обеспечения единства группового сознания.

В отличие от материальных феноменов, общественное сознание относится к структурам, существующим не непосредственным образом, а проявляющимся, отражаемым, что подчеркивает их зависимость не собственно от них, так сказать, бытийствования, но прежде всего от их понимания: конструирования, оценки, трансформаций. Иными словами, общественное сознание существует постольку, поскольку его признают и осуществляют. И для осуществления сознания наиболее приспособлено слово.

Общественное сознание, несомненно, есть сложный продукт взаимодействия многих разнородных факторов. Для облегчения его понимания предпочтительно введение понятия *структуры* общественного сознания. С другой стороны, можно говорить об *аспектах* общественного сознания. Не менее плодотворно для раздробления объекта рассмотрения и выделение *этапов развития* сознания. Также полезно *различение* индивидуального и общественного сознания.

Сложный феномен сознания рассматривается разными отраслями знания соответственно специфике их методов познания. Наиболее важными, по всей видимости, являются те определения сознания, которые выработаны в философии, психологии, социологии, социальной психологии и социальной философии.

В *философии* сознанием принято считать «способность идеального воспроизведения действительности, а также специфические механизмы и формы такого воспроизведения на разных его уровнях» [19. С. 43]. Сознание может быть индивидуальным (личным) и общественным.

Однако существуют и иные точки зрения. К примеру, Дж. Серл полагает сознание индивидуальным свойством личности, объединяющей ее с человечеством [22. С. 8].

Признаками сознания выступают субъективность, активность, связь с эмоциональной стороной. Следствием субъективности становятся его своеобразие и неполнота. Тенденциозность сознания может привести к его субъективизму. Активность сознания проявляется в его направленности прежде всего на познание, следовательно – на целеполагание. Предпосылкой существования сознания и его развития является наличие противопоставленности субъекта и объекта, раздражимость воспринимающего субъекта, изначально рефлексивная, далее – инстинктивная [19. С. 43–45].

Следующими ступенями развития сознания могут быть названы развитие условных рефлексов, усложнение системы восприятия, развитие контроля над процессом восприятия. Ф. Энгельс считал, что сознание может возникнуть «как функция... связанных с ним форм знаковой коммуникации» [11. С. 490].

Применение орудий и системы речевых знаков в виде жестов и звуков, т. е. переход к опосредствованной не

только практической, но и символической деятельности, в условиях первобытного человеческого стада, а затем и родового общества видоизменил структуру человеческой деятельности. Орудием внутренней деятельности (планирования) выступает система знаков — язык. «Язык так же древен, как и сознание; язык есть практическое, существующее и для других людей и лишь тем самым существующее также и для меня самого, действительное сознание» [12. С. 29].

В *социологии* же «сознание есть духовная жизнь общества в совокупности всех ее форм (наука, философия, искусство, нравственность, религия, правосознание, социальная психология)» [19. С. 48]. Ключевыми понятиями, помогающими описывать природу сознания в социологии, являются *социальная общность* (класс) и *группа* (большая, малая).

В *психологии* сознание понимается как «психическая деятельность, обеспечивающая отражение внешнего мира в знаковой форме; связывание новой информации с прежним опытом; выделение себя из окружающей среды, целеполагающая деятельность; контроль и управление поведением личности» [19. С. 347]. Конституирующими признаками сознания в психологии называются отражение, отношение, целеполагание, управление. Сознание трактуется как свойственный человеку способ отношения к объективной действительности, опосредствованный всеобщими формами общественно-исторической деятельности людей. Сознание считается высшей формой психики. Психика же понимается как «свойство высокоорганизованной материи, форма отражения субъектом объективной реальности» [19. С. 286].

Процесс сознания есть процесс сопоставления представления, опосредствующего деятельность, с отражением ее продукта. «Он может осуществляться лишь в том случае, если объект выступит для субъекта в своей отраженной в языке форме; поэтому осознанное есть всегда также словесно означенное. В этой своей функции язык является не только средством общения людей, но он есть их действительное сознание, существующее для индивида лишь постольку, поскольку он существует для других людей» [12. С. 29]. Таким образом, возникновения сознания как формы проявления психики возможно лишь в обществе.

В *языкознании* также выработано собственное понимание феномена сознания. Описание сложных отношений между языком и сознанием составляет важную часть и проблему теоретического изучения языка.

Общественное сознание – исторически подвижное и многообразное явление. В самой структуре лексемы *сознание* содержатся указания на существенные свойства этого понятия. Процессуальность, протяженность во вре-

мени достигнутого результата в целях его сохранения, напряженность, многосоставность состояния и общность этого множества элементов обозначаются прежде всего сложным формантом *-ан-и/*-. Формант *со-* привносит в семантику этой лексемы значения обращенности на Другого, совместности. По этой причине сочетание *общественное сознание* в некотором смысле плеонастично, поскольку сознание предполагает не только наличие: 1) предмета знания — ситуации, события, состояния, 2) субъекта — адресанта знания (= носителя сознания*), но и 3) адресата обмена знанием, т. е. наличия общества. Знание становится сознанием лишь будучи коллективным. Состав «сознающего» коллектива может быть как минимальным — два его субъекта, так и расширенным. При этом допустимо конструирование субъекта сознания другим субъектом. Речь идет о так называемом *внутреннем голосе*, *втором Я* (латинское *alter ego*). Возникает своеобразная группа сознающих субъектов, виртуально множественная, а в реальности представленная одним физическим телом.

Интересно, что множественность субъектов сознания, представленных единым физическим телом, очень часто оценивается как заведомо негативное явление (ср. явление шизофрении, при котором субъекты сознания существуют и выражают себя синхронно, а также ситуации с измененными состояниями сознания, при которых субъекты сознания сменяют друг друга). Как заведомо негативное явление оценивается и множественность форм самоосознавания этнической общности (ср. «межеумочность» русского государственно-этнического сознания в начале XX в., проявлявшаяся в «богоносности», «богоборчестве», «богооставленности», или «коммунистичность» и «капиталистичность» конца XX в.).

Наряду с этим множественность сознающих субъектов, порождающих множественные описания реальности, используется в искусстве. Более того, именно множественность возможных интерпретаций, или глубина художественного произведения, вызываемая умножением количества сосуществующих и одновременно выражающих себя виртуальных субъектов сознания, считается основным достоинством художественного произведения.

Ясно, что именованная «художественный мир», «мир» писателя, поэта и других деятелей искусства суть термины-метонимии, замены именованных «отражение мира», «образ мира» и т. п. При этом следует отметить, что не миров много, а много отражений, описаний единого мира. Лишь невозможность ощущать мир непосредственно, без словесного посредства, вынужденность использования языка как инструмента описания порождает эти неточные определения.

В связи с такой постоянно не менее чем двучленной структурой сознающего субъекта М. М. Бахтиным был

* Термин *носитель сознания* не отражает субъектную активность сознающего, поэтому для того чтобы подчеркнуть отрефлексированность сознания, правильнее было бы использовать термин *субъект сознания*, или *Сознающий*. (Таким образом, вслед за терминами *Говорящий* и *Слушающий*, известными в лингвистике уже давно, предлагается ввести и термин *Сознающий*).

поставлен в свое время вопрос о диалогичности дискурса в форме любого жанра [1]. Способы формальной организации такого диалога (часто в случае отсутствия реального собеседника, соучастника речевой ситуации — квазидиалога) весьма различны.

Диалог, или квазидиалог, организуется в процессе конструирования субъектом речевой ситуации образа ее другого участника (или участников). Для этого используются разные способы: чередование форм 1-го, 2-го и 3-го лица глаголов, метатекстовые показатели, модальные слова, собственно средства *модуса* по отношению к *диктуму* в терминах семантического синтаксиса. Частотны приписывание реплик, риторические вопросы, включая гипотезы и т. п. (см. подробнее [17. С. 3–8]).

Таким образом, сложность и неоднозначность феномена общественного сознания состоит в целом ряде его специфических свойств:

- общественное сознание по своей природе не может быть присуще одновременно в равной мере всем его носителям, а также не может быть однородным и тождественным в силу нетождественности индивидуальных субъектов. С точки зрения распределения прав субъектов сознания на его конструирование и его выражение, оно очевидным образом несправедливо, т. е. иерархично;

- оно всегда есть совокупность индивидуальных сознаний некоторого, всегда количественно ограниченного, множества субъектов сознания, это сознание *группы*. Такая группа должна быть отделена от целого, в данном случае как от других групп, так и от всего человечества. При этом она может быть объединена по различным критериям разной весомости;

- в то же время названная совокупность индивидуальных форм сознания может объединяться в единое целое общественного сознания лишь благодаря игнорированию различий. Дифференцирующие же признаки в свою очередь динамичны и подвержены ситуативным изменениям. Сознание есть итог компромисса;

- общественное сознание фрагментарно и неустойчиво. Не достающие для построения полной картины фрагменты воссоздаются или игнорируются. Интересно также и восполнение при необходимости отсутствующих элементов структуры сознания. Сознание имеет сетевую структуру;

- познание общественного сознания может производиться только через его проявления, отражения. Среди множества следов и проявлений общественного сознания есть его универсальное проявление — язык. Универсальность языка как формы проявления состоит в теоретической и практической возможности его использования для описания любых элементов структуры общественного сознания, любых его аспектов, исторических состояний и видов. Сознание вербально;

- общественное сознание может быть чрезвычайно экономным в средствах выражения: целое легко обозначается его мельчайшей частью, и одновременно оно исключительно расточительно: для выражения одного и того же значения используется множество форм. Сознание противоречиво;

- поскольку общественное сознание есть форма существования активных субъектов сознания, постольку оно

может подвергаться воздействию – конструктивному и деконструктивному. Точно также его отдельные свойства могут подвергаться разрушительному действию или поощряться в своем развитии. Сознание осуществляется.

Для понимания особенностей функционирования общественного сознания, прежде всего технологий его созидания или деструкции, необходим учет названных выше свойств сознания.

В данной работе речь пойдет о том общественном сознании, которое объединяет русскоязычные группы на территории России в синхронном аспекте, т. е. в качестве признаков для делимитации объема субъекта русского общественного сознания как более объективные взяты, во-первых, общность территории обитания, во-вторых, единство языка осуществления.

Отдельные формы и подвиды общественного сознания: мораль, религия [20], право [11], политика (также и государственные представления, а в дореволюционной России и, отчасти, в постперестроечной, – и сословные), материальная культура (собственно методика создания предметов материальной культуры, приемы их порождения), формы хозяйствования (в виде представлений о формах хозяйствования), искусство, спорт*, быт (так называемая повседневность) и др. – включаются в единое целое национально-государственного общественного сознания [16. С. 107–118]. При этом определение *национально-государственное* – всего лишь ярлык, поскольку термин *государственный* указывает только на привязку к территории, не обязательно отграниченной именно государственными границами, а термин *национальный* – на язык (!), в данном случае *русский*, но не на национальность.

Единое целое «национально-государственного» русского общественного сознания включает его локальные реализации: от общественного сознания групп регионов, отдельных регионов до локального сознания отдельного поселения, которые Э. Бенвенист называл «локальными умонастроениями».

Существенно, что каждая из областей общественного сознания может располагать и располагает кругом текстов, описывающих ее собственное бытование [14; 23]. Известно и то, что отдельные группы из целого сообщества, формирующиеся по различным признакам, организуют собственные вербальные формы, часто даже герметичные, например у старообрядцев, но наиболее открыто это происходит в дискурсе семьи или рода [20].

Наконец, общественное сознание как результат взаимодействия индивидуальных актов самоосознания есть акт самоидентификации, и поэтому он является интенционально-волевым актом [16. С. 130–132].

Предельная сфокусированность человеческого сообщества на собственных ментальных переживаниях, зна-

чительная степень отрефлексированности общественно-го сознания и обуславливают постоянные усилия по влиянию на него. Не случайно в языке сильно развиты лексико-семантические группы со значениями речи, восприятия, контроля [6; 10; 21].

Интересен вопрос о субъектах конструирования общественного сознания. В традиции материалистического подхода такие субъекты обезличены и называются «общественными потребностями», вырастающими из значимых для существования больших групп людей материальных условий. Другой подход связан с выявлением тех сил во внешнем окружении, которым в ближайшем или отдаленном будущем будет экономически или иным образом выгодно то или иное изменение в общественном сознании.

Второй подход условно можно назвать «западным». Одним из его проявлений стало развитие учения о PR (*Public Relations*), или общественных связях. Некоторые известные практики PR, в частности Е. Островский, говорят теперь о «развитии общественных связей», тем самым подчеркивая процессуальность и активность этой области гуманитарной деятельности. Та же семантика заложена и в сочетании *гуманитарные технологии* (Г. П. Щедровицкий и др.).

Необходимо различать собственно языковые способы «работы» с общественным сознанием и невербальные средства воздействия на общественное сознание. Очевидно, что при укрупнении социального масштаба степень слитности тех и других резко возрастает и, более того, средства воздействия будут определять содержание воздействия, подобно тому, как совершенствование средств доставки оружия массового поражения дополняется развитием этого оружия и наоборот. Так, например, наиболее эффективным средством (хотя и наиболее дорогим) рекламного воздействия в настоящее время является телевидение, в котором вербальный элемент проявляет, на первый взгляд, тенденцию к полному устареванию. Тем не менее восприятие зрителя обрабатывает получаемую информацию в вербальных структурах. Этот феномен специально изучался в рекламной деятельности, и именно живучестью ведущей вербальной составляющей сознания объясняется интенсивность продуцирования текстов в жанре рекламного слогана [18].

Невербальные средства воздействия на общественное сознание или служат переносу вербальных форм к адресатам воздействия, или каким-либо образом модифицируют этот перенос (масштабируют, интенсифицируют, ослабляют, относят в более отдаленное время). Это прежде всего средства массовой информации (СМИ): телевидение, кино, литература и другие виды искусства. Специальное исследование позволяет выделить даже отдельные лексические и семантические особенности различных каналов ретрансляции в целях направленного воздействия на общественное сознание [3].

Конструирование всех форм общественного сознания осуществляется через общие и частные приемы.

К общим приемам можно отнести внедрение, редукцию, иерархизацию, итерацию, ритмизацию, амплификацию, сопоставление, антитезу, переименование, замещение. Существуют частные реализации этих приемов, о

* Обычно такие сферы, как спорт, система других форм развлечений и отдыха (шоу-бизнес, популярная музыка и т. д.), социальные субкультуры (например, связанные с измененными состояниями сознания и т. д.) и пр., не относят к формам общественного сознания. Однако правильнее было бы рассматривать и их. Существенно, что в этом случае собственно к общественному сознанию надо относить не сами эти области, а сумму *отношений*, возникающих по отношению к ним и внутри них.

которых будет сказано ниже. И обычно приемы конструирования общественного сознания обычно используют комбинированно [9].

Необходимо отметить, что для того чтобы названные приемы позитивным, т. е. созидющим образом влияли на цельность общественного сознания, нужен *полный охват* этими приемами группы субъектов, осуществляющий данный объем общественного сознания. В этом случае эти приемы организуют доминирование элементов в дискурсе как важнейшее условие их эффективности [16]. Наиболее важное здесь – добиться включения аспектов бытия группы как архитемы в дискурс.

Этапы формирования представлений в сознании и обуславливают очередность процедур по их созданию.

Рождение представлений в сознании происходит через первоначальное *внедрение*. Внедрение, с одной стороны, есть процедура построения из звуковых устных или буквенных письменных знаков слов или словосочетаний, функцией которых является наименование социально значимых явлений, создание их значений, т. е. *номинация**; с другой стороны, при внедрении происходит установление устойчивой связи между внедряемым явлением и его значением, т. е. *предикация*.

Собственно существование имен не влияет на динамику общественного сознания. Но на нее влияет введение лексических элементов, которые несут так называемые ключевые значения, т. е. ключевых слов. Имена, используемые здесь, тем или иным (чаще метонимическим) образом отсылают к некоторому объему человеческой общности.

Для номинации используются различные группы имен:

- имена собственные с общим значением указания на территорию — топонимы: *Россия, Российская Федерация, Сибирь, Красноярский край* и т. п., причем эти лексические средства могут входить в иерархические группы родо-видового типа, а могут выстраивать разнородные ряды, ср.: *...за нами Россия, Москва и Арбат...; ...за президента Урал, Сибирь и Дальний Восток...* От них легко образуются лексемы, называющие общность или множество лиц: *россияне, уральцы, жители Дальнего Востока* и т. д. Во многих работах по русской топонимике подробно говорится о топонимических системах, организованных по различным группам признаков [7]. Одним из важных принципов построения топонимии следует назвать их концентричность, полярные свойства центробежности и центростремительности [2];

- личные имена собственные или дериваты от них: *христиане, ленинцы, виссарионовцы* и др.;

- имена с общим значением признака, свойственно-го в целом человеческой общности: *русские, православные, славяне* и т. п.

Для области внедрения как приема характерно использование номинаций генерализующего характера (*россияне, русские, сибиряки*), включение квалификаторов всеобъемлющего значения (*весь, всякий, каждый, любой, всегда, навсегда*).

Генерализация позволяет игнорировать индивидуальные различия входящих в различные множества элементов и лежит в основе *редукции*. Редукция есть упроще-

ние ситуации, отсечение из большого количества признаков, аспектов минимального количества. При редукции предназначенная для передачи информация сокращается в объеме. Редукция существенно упрощает дальнейшие действия по итерации и замещению, поскольку сокращенные элементы значительно проще повторять, заменять и т. д.

Другим приемом, дополняющим редукцию, является *иерархизация* рядоположенных элементов. Разновидностью иерархизации является *изменение* признанных взаимоотношений. Для иерархизации свойственно выстраивание родо-видовых отношений: *восточные славяне – русские, украинцы, белорусы* и др.

Описываемые языковые приемы связаны с двумя типами процедур: созданием новых языковых единиц, соответствующих или не соответствующих связанным с ними реальными сущностями; оперированием с уже готовыми языковыми единицами, которое в свою очередь может порождать новые языковые единицы.

Приемы внедрения и иерархизации в большей степени создают новые единицы или создают новые конфигурации.

Другие же приемы: итерация, ритмизация, амплификация, сопоставление, антитеза, переименование, замещение – являются собой операции с уже существующими элементами.

Итерация есть прием, основанный на многократном повторении информации, особенно через использование разных каналов. Итерация способствует перемещению в доминирующие семантические позиции даже весьма незначительных значений. К примеру, совершенно не актуальные для большинства жителей России темы тягот жизни эстрадных звезд навязываются через СМИ, прежде всего телевидение. В технологии PR этот прием включается в так называемую тематизацию проблемы (проблема здесь – одновременно и лицо, и событие, и процесс).

Ритмизация – это организация итерации в виде равномерно интенсифицируемых и затухающих колебаний, обладающих различными амплитудами, которые можно вычислить. Важным свойством социально значимой ритмизации является ее ритуальность, которая формирует заданные ожидания [15].

В осуществлении сознания (подчеркнем активность и отрефлексированность этого процесса) важно соотношение его с сознанием других групп. Приемы *амплификации, сопоставления, антитезы* связаны с горизонтальным расположением элементов и дальнейшими взаимопредопределениями их функций и семантических отношений. Весьма часто сама рядоположенность элементов организует их отношения: *Россия, Русь, храни себя, храни... – Россия-сука, ты за это мне заплатишь...*

Переименование используется официально, оно легализует изменение реалий: *Советы, Союз, Советский Союз – Россия, Российская Федерация*.

Замещение часто бывает произвольным, не совмещаемым с реальными, образующим ядро виртуальности, ее каркас. К примеру, *коммунисты, лица, придерживающиеся левых взглядов – красно-коричневые*.

Замещение часто производится с созвучными элементами: *демократы – дерьмократы, приватизация – прихватизация*.

В общественном сознании синхронно проходят процессы созидания—деструкции, т. е. поддержания или разрушения его цельности. Изменения в нем, как уже говорилось выше, происходят не спонтанным образом. Процессы деструкции в общественном сознании не менее активны, чем конструирования, тем более что часто конструирование новых фрагментов сознания сопровождается полным или частичным разрушением прежних. Деструктивные процессы общественного сознания (как впрочем, и позитивные) диагностируются также по его проявлениям, прежде всего по языковым и фактуальным. В качестве отражений сознания вербальные отражения следует признать более точными, нежели фактуальные, так как общественные действия и процессы (особенно действия толпы, масс) отражают сознание косвенно, будучи вызываемыми различными причинами.

Языковыми проявлениями деструкции группового сознания можно считать те проявления, которые противоположны выражающим цельность. Наиболее важным из них представляется *элиминация* темы группы из публичного дискурса, которые выражается либо в замалчивании, либо в смене тематики, либо в ее варьировании.

Используется также *«снятие»* *противопоставленности* групп, поскольку известно, что напряженное противопоставление группы другим группам заставляет активизироваться консолидирующим тенденциям в ее сознании. Подобную процедуру проделали в 1985–1999 гг. некоторые национальные группы в лице их лидирующих частей, прежде всего интеллигенции, что было названо «мобилизованной этничностью», «этнизмом» [5]. Странно, что при этом второй субъект противопоставления — «русские» — не смог активизировать до степени проявленности признака этничности противопоставленных сторон собственную этничность. Это явление требует своего изучения. Параллель при этом, однако, наблюдается в истории Югославии, где сербская этничность также оказалась «неотмобилизованной» должным образом.

Вариацией этого приема является *снижение уровня напряженности противопоставления*. В таком виде прием применяется, к примеру, внутри малых групп (*семья, спортивная команда* и пр.).

Используется также *подмена признака противопоставления*, допустим *русским* противопоставляются *мусульмане*, или, наоборот, *татары* противопоставляются *православным*. В массовом сознании это явление сплошь и рядом присутствует: *арабы* приравниваются к *арабским террористам*, *мусульмане* — к *ваххабитам*, *русские* — к *ворам*, *пьяницам*, *тунеядцам*.

Интересен прием *смены* или *подмены* значимых для группы имен, предикатов и атрибутов. К примеру, значимое для русских и молдаван имя Стефана Батория было присвоено только молдаванами. Отчасти комичен пример присвоения имени поэта Пушкина эфиопской интеллигенцией.

Для ослабления единства крупной структуры эффективно используется *подчеркивание разнообразия* компонентов этой структуры, прежде всего *использование дискретных именовании*. Верно, однако, и то, что ослабление цельности структуры через различение разнородности и разнофункциональности ее компонентов сопро-

вождается и осознанием фактических связей и зависимостей между ними, т. е. этот прием является амбивалентным. Например, при развитии конфликта между соседствующими семьями внутренние распри могут быть отложены (см. об этом в исследованиях Европейского университета в г. Санкт-Петербурге).

Деструкция может быть применена в отношении основного признака группы (пол, возраст, локус действия, профессия, конфессия, интересы и пр.). Такой признак либо интенсифицируется, либо элиминируется (ср. течение экуменизма в религиозной мысли и практике).

Для деструкции используются иногда те же способы, что применяются при изучении авторефлексии группы и ее отдельных представителей, в том числе через СМИ, социологические процедуры и т. п., когда монолитность представлений группы размывается через постановку вопросов, содержащих сомнения в единстве группы, релевантности признака противопоставленности другим группам.

Для поддержания единства общественного сознания очень важна его рефлексия о самом себе. Рефлексия группы субъектов носителей сознания всегда представлена в виде текстов более или менее устойчивой структуры и устойчивых условий бытования.

Для таких текстов характерно тематическое единство, которое представляется среди названных выше свойств центральным: это семантика обладания общим для группы набором знаний, а для всей группы носителей языка в целом фундаментальна общность языка. Обладание (необладание) таким набором знаний выполняет дифференцирующую функцию. Общность языка продолжается в общности пользования именником уникальных и собственных имен и т. д.

Данные текстовые структуры не могут быть слишком точно определены, тем не менее в своей совокупности они объединяются по своей предназначенности (архисмыслу), а их части структурируются по семантическим доминантам.

Ситуации обращения текстов, обеспечивающих единство общественного сознания, — это ситуации, в которых происходит передача или повторение сведений идентификационного характера: собирательские, воспитательные (включая родо-семейную самоидентификацию), ситуации напоминания, познавательные (научные, обучающие, новостийные), нормативизирующие (правовые), художественно-эстетические и развлекательные (высокая литература и беллетристика), организующие (политические).

Функция самовоспроизведения группового сознания в современном речевом бытовом общении выполняется всем множеством обращающихся в группе текстов, и весьма многообразно. Именно в текстовых структурах происходит встреча субъектов общественного сознания.

Авторефлексия субъектов группового сознания свойственна прежде всего, наиболее активной части общества — молодежи (ср. рассуждения носителей молодежного сленга о «лохах» (ударение здесь в жаргоне ставится на последний слог!) как *ненастоящих*, или неправильных, людях [4. С. 67]). Но постоянное вглядывание внутрь себя, сосредоточенность на себе, тяга к самопознанию свойственна всей совокупности субъектов общественного сознания. Такое постоянное порождение группой текстов

о себе вызывает следующие конститутивные признаки проявлений общественного сознания:

- общность небольшого круга тем обсуждения;
- общность эмоциональных оттенков при обсуждении;
- единство оснований номинаций и используемых имен;
- единство прошлого и единство в его оценке;
- единство описаний и др.

Итак, мы можем сделать вывод, что общественное сознание и создается, и подвергается разрушению посредством вербальных средств.

Библиографический список

1. Бахтин, М. М. Проблема речевых жанров / М. М. Бахтин // Эстетика словесного творчества. М., 1986.
2. Березович, Е. Л. Русская топонимия в этнолингвистическом аспекте / Е. Л. Березович. Екатеринбург, 1998.
3. Васильев, А. Д. Слово в телеэфире (очерки новейшего словоупотребления в российском телевидении) / А. Д. Васильев. Красноярск, 2000.
4. Веселовская, Т. М. О жаргонизме «лох» / Т. М. Веселовская // Диалектологические и историко-лингвистические проблемы : сб. ст. памяти Г. А. Садретдиновой. Омск, 1999. С. 66–69.
5. Губогло, М. Н. Языки этнической мобилизации / М. Н. Губогло. М., 1998.
6. Демидов, Д. Г. Русская определенность и славянская неопределенность / Д. Г. Демидов // Материалы XXX Межвуз. науч.-метод. конф. преподавателей и аспирантов, 1–17 марта 2001 г., Санкт-Петербург. Вып. 17. Секция «Язык и ментальность». СПб., 2001. С. 37–38.
7. Зеленин, А. В. Имя Россия в эмигрантской публицистике / А. В. Зеленин // Проблемы исторического языкознания и ментальности. Вып. 4 : Имя в русском общественном сознании и дискурсе : сб. ст. Красноярск, 1999.
8. Ильин, И. А. О русском правосознании / И. А. Ильин. М., 1994.
9. Кара-Мурза, С. Г. Манипуляция сознанием / С. Г. Кара-Мурза. М., 2000.
10. Ким, И. Е. Контроль и причастность в личной сфере человека и их отражение в языке / И. Е. Ким // Проблемы исторического языкознания и ментальности. Вып. 3 : Современное русское общественное сознание в зеркале вербализации : сб. ст. Красноярск, 1999. С. 72–83.
11. Маркс, К. Собр. соч. / К. Маркс, Ф. Энгельс. 2-е изд. Т. 20. М., 1971.
12. Маркс, К. Собр. соч. / К. Маркс, Ф. Энгельс. 2-е изд. Т. 3. М., 1970.
13. Михайлов, А. В. Принципы построения картины мира и система способов ее вербального осуществления / А. В. Михайлов // Проблемы исторического языкознания и ментальности. Вып. 1 : Русский язык : ментальность и грамматика : сб. ст. Красноярск, 1998. С. 107–118.
14. Михайлов, А. В. К интерпретации функций «автоматических» элементов в записях устной речи / А. В. Михайлов // Русский язык на рубеже тысячелетий : в 3 т. : материалы Всерос. конф., 26–27 окт. 2000 г., Санкт-Петербург. СПб., 2001. Т. 3. С. 41–46.
15. Михайлов, А. В. Рефлексивные данные о свойствах российской религиозности / А. В. Михайлов // Религия и мораль в секулярном обществе : материалы науч. конф., 5 нояб. 2001 г., Санкт-Петербург. СПб., 2002. С. 45–49.
16. Михайлов, А. В. Самоидентификация российского общества и номинации социальных групп / А. В. Михайлов, Т. В. Михайлова // Культурно-речевая ситуация в современной России: вопросы теории и образовательных технологий : материалы Всерос. науч. конф., 19–21 марта 2000 г. Екатеринбург, 2000. С. 130–132.
17. Михайлов, А. В. К характеристике речевых проявлений субъектов ситуации обучения / А. В. Михайлов, Т. В. Михайлова // Педагогика и педагогика : история, теория, опыт. Красноярск, 2001. С. 3–8.
18. Морозова, И. Н. Слагая слоганы / И. Н. Морозова. М., 2001.
19. Психологический словарь. М., 1983.
20. Разумова, И. А. Потаенное знание современной русской семьи / И. А. Разумова. М., 2001.
21. Логический анализ языка : Речевые действия. М., 1994.
22. Серл, Дж. Открывая сознание заново / Дж. Серл. М. : Идея-Пресс, 2002.
23. Шабашвили, Э. З. Нарративы и их роль в формировании идентичности / Э. З. Шабашвили // Проблемы культурной идентичности : материалы междунар. теорет. семинара. Казань, 1998.

A. V. Mikhaylov

THE VERBAL METHODS OF THE UNITY MAINTENANCE OF THE SOCIETY CONSCIOUSNESS

In this article is described the methods of the unity maintenance of the society consciousness.

А. В. Михайлов, Т. В. Михайлова

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОДЕЛЕЙ ПОСТРОЕНИЯ ОБЩЕСТВА В ДРЕВНЕРУССКИХ ТЕКСТАХ

Описываются две конкурирующие модели построения древнерусского общества, имплицитные в содержание и структуру ряда ранних древнерусских хроникальных и молитвенных текстов, на основе анализа оценочных предикатов.

Своеобразие исторического пути России во многом объясняется спецификой русской государственности. Как известно, в Древней Руси и до создания государства, и в эпоху организации русского государства существовали зародыши всех форм власти: демократической, аристократической и монархической, но именно царская идея стала победительницей по ряду причин – религиозных, социально-бытовых, внешнеполитических.

Анализ древнерусских текстов обнаруживает два основных идеологических течения, или две основные идеи верховной власти. С одной стороны, это народоправство, вольнолюбие, презрение к рабству, черты, которые можно назвать языческими чертами мировоззрения восточных славян. Согласно этим представлениям, вождем становится самый умный, отважный, сильный, способный вести за собой представитель рода. «Это образ ведущего вперед, но не образ того, кто стоит над тобою» [5. С. 289]. С другой стороны, развивается идея царской власти, где царь воспринимается как представитель Иисуса Христа на земле, выполняющий некую религиозную миссию. Эта идеология восходит к византийским государственно-теоретическим представлениям.

В целом же следует отметить, что социальный идеал языческой Древней Руси входил в противоречие с христианским идеалом, полученным в наследство от Восточной Римской империи.

В данной статье не ставится задача обсуждения этой сложной проблемы сосуществования двух идеологий. Нас интересует лишь то, как совмещались эти идеологии в пределах смысловой и формальной структуры одного важнейшего древнерусского текста – Повести временных лет (далее – ПВЛ) [6].

Поскольку летописный текст представляет собой сложное произведение с точки зрения структуры, авторов, времени написания тех или иных отрывков, то необходимо учитывать наличие разных оценочных систем в его текстах. В ПВЛ сосуществуют две разные стадии мышления и, соответственно, языка и культуры: архаичная, дохристианская и христианская. Основная форма идеологии средневековой книжности – христианское мировоззрение, но древнерусское историческое повествование с XI в. обнаруживает две формы сближения с фольклором (и, следовательно, дохристианским языческим мировоззрением, т. е. с языческой системой ценностей): «1) прямое перенесение в литературу фольклорных сюжетов, мотивов... без изменения их идейной сущности... 2) освоение литературно-художественного метода народной поэзии, определяемое совпадением оценки событий и цели их художественного воспроизведения» [1. С. 104].

Сосуществование ценностных систем в летописных текстах относится в первую очередь к старшей русской летописи, возникшей не ранее второй четверти XI в. «Чем более отдалена от летописца описываемая им эпоха, тем чаще он прибегает к народному преданию» [1. С. 106]. Особое внимание обращается нами на семантику синтаксических структур оценочных высказываний, потому что Повесть временных лет является идеологически выдержанным текстом, в котором в XI–XII вв. заложены мировоззренческие установки нового – христианского – государства.

В рассказах Нестора о расселении восточных славян, их нравах и обычаях, о возникновении у них княжеской власти не присутствуют обозначения этнокультурных и политических общностей различных уровней. Употребляя термин род, летописец имеет в виду не только собственное значение этого слова – «племя», «союз племен», «племенное княжение», но и значение «крупная этнокультурная общность», ср. *род словенский, род лехов* [8. С. 98–100]. В древнерусском языке была целая группа слов для обозначения общности по крови: *языкъ (языци) – племя – колено – родъ*, но говоря о расселении библейских племен, «летописец упоминает *языци, земли и страны...*» [4].

Смысл государственной власти был ясно выражен летописцем: когда племена «*начаша сами в себе володети, и не бе в них правды, и восташа род на род, и быша в них усобици, воевати начаша сами на ся...*» (ПВЛ, 899, 10),* тогда понадобилось устроить единое правление со всеми вытекающими следствиями. При исторической неопределенности характеристики событий прошлого в текстах вполне четко выявлена причина появления княжеской власти: «*...и реша сами в себе: поищемъ себе князя, иже бы... володел нами и... рядилъ по праву... <...> Земля наша велика и обильна, а наряда в ней нетъ... Да поидете у нас княжити и володети*» (ПВЛ, 899, 10).

Понятие верховной власти дано довольно явно: князь – тот, кто устраивает «наряд» по праву и правде, ср. *рядъ*, родственное слово – *ритуал*, а также *право, правда*, родственные слову *первый* в значении «исконный», «первичный».

Оставляя в стороне клубок противоречивых представлений и тенденциозных построений, избыточных в ле-

* Здесь и далее в цитатах из древнерусских текстов аббревиатура или сокращение указывает на источник, первая цифра – на год, под которым в тексте зафиксировано то или иное событие, вторая – на лист (прямую или оборотную (об) его сторону) соответствующей рукописи, положенной в основу издания. Орфография и пунктуация источников упрощена, *ять* везде заменен на *е*.

тописных статьях, повествующих о первых князьях, остановимся лишь на анализе языковых значений, на том, как представление о князе выражается в тексте.

Анализ значений определений показывает, что для описания первых князей характерно использование в качестве средств описания, во-первых, глаголов, обозначающих самостоятельное движение субъекта (из группы слов, представленной образованиями по корню *-ход-* и *-ид-*, например *ити*, *възйти* и др., а также по корням *-бег-*, *-лет-*, *-плав-*; во-вторых, слов со значением обладания, например *яти*, *пояти*, *възяти*; в-третьих, слов с корнями *-да-* и *-де-*, например *дати*, *делати*, ср.: «*Иде Олегъ на грекы... прииде къ Царюграду*» (ПВЛ, 899, 10), т. е. реализуется значение «идти войною». Синтаксическая конструкция, описывающая военный поход, такова: *имя князя* + *имя содеятеля* (воины, дружина) + *идти в, ко* (пункт назначения) или *на* (племя). Высокое социальное положение субъекта, имя которого употребляется в этой конструкции, подразумевается само собой. Сочетание *имя* + *идти* могло относиться лишь к князю, т. е. военному вождю; только при соблюдении этого условия вся эта конструкция могла иметь значение ввода в ситуацию военного похода. Именно на это условие обращается внимание в летописи, когда обсуждается социальный статус Князя: «*Аще бо бы перевозчикъ Къи, то не бы ходилъ ко Царюграду, но сеи княжаше в роду своемъ*» (ПВЛ, 876, 70б). Поскольку конструкция, о которой мы говорим, имеет значение ввода в ситуацию военного похода, то в летописном тексте она часто сочетается с высказыванием, рассказывающим о результате похода: «*Иде Ярославъ на чюдъ, и победи я, и постави градъ Гурьевъ*» (ПВЛ, 884, 850б). Семантика победы может быть эксплицирована просто словом *победи*, а может быть конкретизирована обозначением действий князя-победителя: «*Иде Олегъ на северяны, и победи северяны, и возложи на нь дань легку, не дая имъ козаромъ дани платити...*» (ПВЛ, 884, 110б).

При именовании князя подразумевается и вся дружина, все войско, которое вел князь. Князя можно назвать «объединительным», или обобщенным, субъектом. В некоторых случаях оговаривается особо, что князь идет с воинами. В таких случаях указывается количество «воев»: «*Ярославъ совокупи вои мнози, и приде къ Киеву*» (ПВЛ, 1026, 85) – или называются и племена, из которых воины присоединяются к дружине князя: «*Иде Олегъ на грекы... поя множество варег, и словень, и чюдъ...*» (ПВЛ, 884, 140б).

Социальное положение князя, т. е. военного вождя в первую очередь предполагает защиту своей земли и колонизационные задачи по отношению к чужим землям. Описание военных походов первых князей составляет, пожалуй, основу начальных летописных статей: «*Иде Володимерь на ятвягы, победи ятвягы и взя землю ихъ*» (ПВЛ, 983, 460б).

Естественной представляется и символическая формула со значением заключения мирного договора *сътвори ти миръ*, вставляемая после высказывания о походе: «*Ярославъ... прииде к Киеву, и сотвори миръ со братомъ своимъ Мстиславомъ у Городца*» (ПВЛ, 1025, 480б).

Битвы описываются после событий в обобщенном виде, как бы извлекаясь в воспоминание и назидание из

памяти в более развернутом виде, с употреблением устойчивых словесных формул, хотя и редко так пространно, как, например, здесь: «*И выиде Олегъ на брегъ, и воевати нача, и много убийства сотвори около града грекомъ, и разбиша многы полаты, и пожгоша церкви, а ихже имаху пленники, овехъ посечаху, другиа же мучаху, инья же расстреляху, а другиа в море вметаху, и ина многа творяху Русь грекомъ, елико же ратные творять*» (ПВЛ, 899, 140б).

Другая важная группа предикатов характеризуется лексемами, обозначающими действия первых князей, – предикатами с семантикой обладания. Призвание устроить порядок на Русской земле обеспечивает князю высокое положение, власть – «княжьи» права и обязанности. Кроме цели защиты своей земли и завоевания чужой, на князе лежит обязанность охраны внутреннего «наряда». История княжеского правления в Древней Руси указывает на постепенное расширение пределов попечения князя над вопросами жизни вверенной ему территории. От первичного захватывания, однократного овладения, что выражено в семантике корня *-им-* и слова *имети/имати*, происходит развитие к семантике постоянного владения, обладания: (Олег) «*имаше на нихъ дань...*» (ПВЛ, 883, 110б).

Слова с корнем *-им-* выражают одну из основных ипостасей князя-вождя во время родоплеменных отношений; «принять власть» конкретизируется принятием «дани», «воев», «взятием» чужих земель, обладанием и реализацией права передачи владения другому лицу, выраженного словом *посадить*: «*...Олегъ приа градъ (Смоленск) и посади мужи свои*» (ПВЛ, 882, 10). Семантическая структура предиката с данным корнем соответствует древнегерманскому представлению о *конунге* как о военном вожде. Важно подчеркнуть, что речь идет о первых русских князьях, еще не принявших христианство.

Существует еще одна группа предикатов, значимая для раскрытия семантики представлений о князе, – это слова со значением речи. Известно, что право высказывания, речи есть по природе право владетельное и, например, давать имя объекту местности – природному или антропогенному – имел право лишь князь: «*...(и приа власть Рюрикъ одинъ)... и сруби город(о)къ над Волховомъ, и прозва Новгородъ*» (ПВЛ, 862, 9).

Речи князя и являются его делами. Сущность деятельности князя (военные действия, дипломатия, личная жизнь и другие проявления) выражает его властность для современников – подданных и иноземцев – прежде всего с помощью его речедействий, а для потомков – практически только через них: «*Олегъ же мало отступи отъ града, нача миръ творити со царьма грекима... глаголя: "имите ми ся по дань"*» (ПВЛ, 897, 15). Кроме того, в текстах используются глагольные формы со значением повеления, запрещения, предписания: *повелети*, *заповедати*, *запретити*. На наш взгляд, деятельность князя в языческую эпоху, до принятия христианства и некоторое время после его принятия носила явно выраженный родовой характер.

Как полагает Л. А. Тихомиров, «русские племена, объединившиеся под княжеской властью, имели приблизительно один и тот же родовой строй... Родовой строй этих племен не выработал еще сильной клановой аристократии,

хотя уже создал различного рода старейшин, и кое-где явилось уже понятие о князе как зачинателе рода. <...> В таких условиях совершилось призвание князей Рюриковичей. Когда восстал “род на род” и собрание родоначальников, этих старейшин и мелких князей, связанных каждый с узким интересом своего рода, не могло создать общего права, общей, равно для всех близкой власти – род славяно-финских племен совершил великое дело: основание русской государственности, призвав в 862 г. князей как власть для всех общую, высшую. Смысл этой власти – уже не родовой, а государственный» [9. С. 212–213].

В раннем русском летописании сложилась такая парадоксальная ситуация, когда события дохристианской истории («доисторические») описываются народными дохристианскими преданиями, а перелагает их и приводит в систему православный книжник. При этом автор высказываний, как правило, вынужден ограничивать свободу своей собственной оценки, но оставляет оценочный компонент, который был выражен в предании, т. е. передачу оценки субъектом-язычником.

Представления летописца о княжеской жизни и власти связаны с общехристианскими представлениями о благе и грехе. Формы и приемы описания, связанные с представлениями о князе, правителе, включают определенные оценочные высказывания.

При описании княгини Ольги и князя Владимира задачей авторов летописных текстов было создание такой модели качества правителя, как православный правитель. Эта модель поведения включала, с одной стороны, идеальное поведение христианина (духовное начало), с другой – поведение идеального князя, правителя (мирское, физическое начало), праведника вообще и праведного правителя.

В походе на Царьград Олег сжигает церкви, мучает христиан. В этом описании летописец передает только информацию, хотя, как православный, он считает это грехом, но оценку дает не прямо: «Иде Олегъ на грекъ... и выиде Олегъ на брегъ, и воевати нача, и много **убииства** сотвори около града грекомъ, и разбиша многы полаты, и **пожгоша** церкви, а ихже имаху пленники, овехъ **посекаху**, друга же **мучаху**... и ина многа творяху русь грекомъ, елико же ратнии творять» (Радзивилловская летопись, далее – Радзив. [7], 899 л., 14об). Можно считать, что все же некий оценочный компонент здесь присутствует: **убииства сотвори**, **мучаху** – по какой бы ни было причине, в семантической структуре лексем содержатся семы «причинение страданий» и, предположительно, «сочувствие страдающей стороне», что вызывает некоторое осуждение «мучителей».

Намеренное устранение оценки присутствует во многих местах рассказов о князьях – первых русских христианах – о княгине Ольге и князе Владимире: в «Сказании о мести Ольги древлянам» (945), «Сказании о покорении древлянской земли» (946), «Повести о путешествии Ольги в Царьград» (955) и «Повести о смерти Ольги» (969). Первые два, как известно, были созданы в народной среде в языческую эпоху, возможно еще при жизни Ольги или вскоре после ее смерти.

Составители в «Сказании о мести Ольги древлянам» идеализируют и гиперболизируют ее мудрость, хитрость,

верность, способность мстить врагу за обиды. Враг представляется глупым, чванливым, недальновидным. Но эта оценка присутствует в тексте лишь имплицитно, она не «в»мажена ни на уровне лексики, ни на синтаксическом уровне. Пожалуй, единственный раз оценка «в»мажена явно, это, как ни странно, отрицательная оценка Игоря древлянами: «*Мужа твоего убихом, бьяше муж твой аки волкъ: въсхищаа и грабя, а наши князи суть добри, иже распсли суть древенскую землю*» (Радзив., 945, 27об). И немного ранее древляне, говоря об Игоре, используют сравнение его с волком: «*аще ввадитъся волкъ в овци, то выноситъ все стадо...*» (Радзив., 945, 27об). В характеристике самой Ольги – героини сказаний, действия которой явно оценены положительно, составителем сказания (конечно, не летописцем) используются лишь информативно-фактические высказывания.

Оценочный компонент, хотя и неявным образом, но присутствует в тексте. К примеру, ложное оказание чести древлянам стало их «вывернутым бесчестьем» древлян и наказанием. Оценочным эффектом ситуации явилось обнаружение мудрости и хитрости Ольги. Пределы развертывания мнимой ситуации уважения и истинной ситуации бесчестья расширены оценкой древлян от составителя текста: «они же... *гордящиеся*», после чего следует автономизация древлянами своей ситуации: «*Пуци ны Игоревы смерти*».

В ПВЛ под 946 г. помещено еще одно сказание о мести Ольги – «Сказании о покорении древлянской земли», также фольклорного происхождения, тематически связанное с предыдущим сказанием. Здесь также прославляется хитрость, мудрость, настойчивость княгини, державшей целое лето осаду города Искоростеня и разбившей древлянское войско. И здесь положительная оценка Ольги выражена явно. В этом тексте нет лексики с оценочным компонентом. Основная семантика предикатов, относящихся к Ольге, относится к лексико-семантической группе глаголов говорения с оттенком выражения воли (поскольку она княгиня): «...повеле Ольга и яко смерчес(я), пусти голуби, и повеле Ольга воемъ своимъ...», которые в этом тексте также могут иметь имплицитный характер. Императивы Ольги, обращенные ею к своим воинам (или дружинникам) и к древлянам, представляют собой слова-действия: «...дадите ми от двора по 3 голуби... *се уже ся есте покорили мне и моему дитяти, а идете в град...*» (Радзив., 945, 30).

Главной задачей Ольги, кроме отмщения, является окончательное покорение древлян. Именно этим объясняется наличие обширной лексической группы обращений княгини «сверху вниз» к древлянам. Древляне воспринимаят как условие мира покорение Ольге и выплату дани, т. е. признание ее выше по социальному положению. Но условия эти были мнимыми или неактуальными для Ольги, задачей которой был обман древлян. Автор текста не обозначает это прямо, на это намекает лишь глагол мышления, стоящий в тексте рядом со словами об отсутствии возможности взять город, что и придает этому глаголу значение «обмануть»: «...и стоа Ольга лето и не можаше *взяти града, и умысли сице...*» (Радзив., 945, 30).

Для автора текста нет нужды проявлять оценку прямо. О том, что мстить и убивать плохо, летописец-христи-

анин предпочитает умалчивать и свою оценку событий не выявляет. Итак, наиболее положительными качествами Ольги является мудрость и хитрость, которые помогают Ольге добиваться своих целей.

«Повесть о путешествии Ольги в Царьград» (955) – сложное по составу произведение. Исследователи считают ее ярким образцом смешения двух литературных манер повествования. «Рассказ о том, как Ольга в самый патетический момент своей жизни, вскоре после крещения в Царьграде, хитроумным ответом “переклюкала” греческого царя – характерный пример... стилистической неустойчивости. <...> Перед нами два образа Ольги: народно-поэтический образ мудрой девы сказок и агиографический образ равноапостольной святой» [3. С. 64].

Летописец оценивает княгиню Ольгу по двум разным системам оценки: дохристианской, языческой, и христианской. Это вполне объяснимо, так как княгиня Ольга недавно крестилась, буквально на глазах читателей «новый человек» сменил «ветхого». Это, собственно, и есть основа сюжета повести. Рассмотрим подробнее: в тексте до крещения княгини Ольги оценивается ее ум, мудрость и красота: «...и бе тогда цар(ь) Костантинь... и прииде к нему Ольга, и видевъ ю добру суцу зело лицем и смыслу, и удивися цар(ь) разуму ея» (Радзив., 955, 31). Необходимо, однако, признать, что оценка здесь дается через греческого царя, т. е. христианина, а суть этой оценки языческая. Константин позже говорит: «Переклюкала мя еси, Ольго». Истинно христианская оценочная лексика прозвучала в устах греческого патриарха после крещения Ольги: «Просвещена бывши, радовашес(я) д(у)шею и телом, и поуча ю патриарх о вере, и рече ей: Благословена ты в женах руских, яко возлюби свет, а тму остави; бл(а)г(о)сл(о)вити тя имут с(ы)н(о)ве рустии и в последнии род внук твоих... Чадо верное, въ Х(ри)с(т)а к(ре)стилася еси, и въ Х(ри)с(т)а облечеся, Х(рист)осъ имать сохрани ти» (Радзив., 955, 32).

Сказочные народные элементы, как отмечал А. А. Шахматов, проглядывают в отношении Ольги к царю, духовные – в отношении к патриарху. Для летописца важно было противопоставить отношение Ольги к патриарху ее отношению к императору. Поучение патриарха идеализирует княгиню и ставит ее в один ряд с христианскими святыми и Богородицей. Об этом говорит фраза, связанная с текстом акафиста Богородице, а также сравнение Ольги с персонажами Ветхого Завета.

Семантика текста, связанная с умом, хитростью Ольги, заменяется семантикой христианской премудрости, которая непосредственно связана не с умом, а верой: «...блаж(е)наа Ольга искаше доброе пр(е)м(у)др(о)сти божьа...» (Радзив., 955, 32). Ум (как нейтральное по отношению к мировоззрению свойство) в применении к Ольге заменяется на характеризующую ее христианскую мудрость. Этот переход зафиксирован многократно в самых разных текстах христианской эпохи, и для Руси он не представляет исключения. Появляется лексика, характерная для агиографических текстов: *блаженаа, чадо верное, держатися по правду, налезе бисерь мног(о)ценен, ежесть Христос*.

Особенно же агиографическая идеализация усиливается в заключительной части, где автор прибегает к авто-

ритетным сравнениям из Библии: «*Се же бысть, якоже при Соломоне...*». Упоминание имени царя Соломона и сравнение ситуации с ветхозаветной также не случайны, ибо в сознании христианина все, что связано с Соломоном, в оценочном смысле положительно и высоко.

Таким образом, можно утверждать, что летописный текст 955 г. по ряду причин, которые не входят в круг вопросов, разбираемых в этой статье, включает два основания и две системы оценочных представлений древнерусского человека.

Текст 969 г. «Повести о смерти Ольги» неоднороден по своему составу, так как две части. Одна часть – это повесть о смерти Ольги, состоящая из информативных высказываний: «*По трех днех умре Ольга, и плакася по ней с(ы)нъ ея, и внуци ея, и людие вси плачемъ великимъ, и несоша и погребоша на месте. И бе заповедала Ольга не творити тризны над собою...*» (Радзив., 969, 36об). Вторая часть летописной статьи представляет собой обширную похвалу, написанную торжественным слогом, использующим соответствующую семантику: «*И бысть предтекущая хр(и)стьянстемъ земли, аки десница пред с(о)лнцемъ, аки зоря пред светомъ си бо сияше, аки луна в нощи, тако и си в неверныхъ ч(е)л(о)в(е)цехъ*» (Радзив., 969, 36об).

Главная идея в прославлении Ольги – то, что именно она – первая от Руси – войдет в царство небесное: «*Радуися, Русскои земли познание, к богу начаток примирения быхом...*» (Радзив., 969, 36).

Несмотря на то что две части «Повести о смерти Ольги» неоднородны, очевидно, что оценочные представления, которые эксплицированы в тексте, в основном христианские. В этом тексте княгиня Ольга представлена как идеальный государственный деятель и как идеальная христианка, даже христианская подвижница. Идея праведности эксплицируется в тексте неоднократно: «*Праведныхъ бо душа не умираетъ, яко же рече Соломонъ: Похвала праведному... възвеселять людье... о яковихъ пр(о)р(о)къ гл(агола)ше: В память(ь) вечную буд(е)ть праведникъ...*» (Радзив., 969, 36об–37).

Итак, княгиня Ольга является образцом правителя – православного христианина. Такой идеал был очень важен для христианской Руси. Разработка идеальных представлений о первой княгине-христианке продолжилась и в нескольких агиографических произведениях. Исследователи, занимающиеся первыми агиографическими произведениями, посвященными блаженной равноапостольной княгине, единодушно отмечают, что идеал правителя-христианина не был взят в готовом виде из византийского житийного канона, но, напротив, был выработан и развивался в дальнейшем именно как древнерусский идеал князя-христианина [2].

В повествованиях о князе Владимире наблюдается та же самая элиминация оценки летописца-христианина, что и в текстах о княгине Ольге до ее крещения. Действия Владимира, которые по христианским законам, несомненно, должны быть квалифицированы как греховные, автором не столько оцениваются, сколько описываются.

Одним из важных семантических признаков в положительнооценочных высказываниях о княгине Ольге и князе Владимире является нахождение во временном и причинно-следственном смысле в начале фундаменталь-

но важных периодов, функционирование в качестве причины: Ольга – «зачаток» всему христианству в Русской земле, а Владимир – креститель всей земли Русской, к тому же оба они послужили причиной спасения (в христианском смысле) русских людей и Русской земли.

Именно то, что их жизнеописание распадается на две части: до крещения и после – и создает такую языковую ситуацию, о которой говорилось выше, – элиминацию отрицательной оценки автора. Летописец-христианин не желает выражать осуждение грешной жизни двух будущих праведников Русской земли до их крещения и старается употреблять информативные высказывания, он доносит до читателя чужую оценку, будь то оценка составителя легенд, или оценка персонажей этих легенд. Книжник не комментирует события, но языковые ситуации, где объекты оценки своим поступком – крещением – включены в систему ценностей субъекта оценки – авторов летописных текстов, оценочны по своей природе и потому экспликация положительной оценки в данных текстах достигает значительных масштабов. Эти оценочные высказывания эмоционально насыщены, и в целом можно говорить об ориентации этих текстов на агиографические традиции.

9. Тихомиров, Л. А. Монархическая государственность / Л. А. Тихомиров. СПб. : Комплект, 1992.

Библиографический список

1. Адрианова-Перетц, В. П. Историческая литература XI – начала XV вв. и народная поэзия / В. П. Адрианова-Перетц // ТОДРЛ. Т. VIII. М. ; Л. : Наука, 1951.
2. Грихин, В. А. Проблемы стиля древнерусской агиографии XIV–XV вв. / В. А. Грихин. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1974.
3. Еремин, И. П. Лекции и статьи по истории древней русской литературы / И. П. Еремин. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1987.
4. Колесов, В. В. Древнерусский литературный язык / В. В. Колесов. Л. : Изд-во ЛГУ, 1989.
5. Колесов, В. В. Мир человека Древней Руси / В. В. Колесов. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1986.
6. Повесть временных лет. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1950.
7. Радзивилловская летопись. М. : Наука, 1991. (Полн. собр. рус. летописей. Т. XXXIX).
8. Рогов, А. И. Формирование самосознания древнерусской народности / А. И. Рогов, Б. Н. Флоря // Развитие этнического самосознания славянских народов в эпоху раннего средневековья. М., 1982.
9. Тихомиров, Л. А. Монархическая государственность / Л. А. Тихомиров. СПб. : Комплект, 1992.

A. V. Mikhaylov, T. V. Mikhaylova

TWO MODELS OF BUILDING OLD RUSSIAN COMMUNITY ON THE BASIS OF THE TEXTS OF THE XI–XVI CENTURIES

In the article the cooperation of two models of building Old Russian community on the basis of the texts of the XI–XVI centuries are disclosed.

МНОГОШАГОВЫЙ ПРОЦЕСС ОБУЧЕНИЯ КАК ДВИЖЕНИЕ В НАПРАВЛЕНИИ УВЕЛИЧЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ СТУДЕНТА ПО ТРАЕКТОРИИ, ЗАДАННОЙ УЧЕБНЫМИ МОДУЛЯМИ

Учебный процесс представлен как многошаговый процесс принятия решений, базирующийся на вероятностных состояниях, включающих всю учебную предысторию. В ходе этого процесса вырабатываются различные стратегии, включая и наиболее оптимальную, которая может быть реализована посредством использования эффективных педагогических технологий, обеспечивающих выход на заданный уровень компетентности.

Множество учебных модулей дисциплин технического вуза с топологической точки зрения представляет собой сеть, движение по узлам которой задает множество возможных траекторий для отдельного студента или групп студентов от начального состояния (абитуриент) до конечного (дипломник). В рамках этого представления учебный процесс является *графом*, ориентированным на прохождение студентом учебных модулей и определенным для разновидностей сети, узлы которой $1...i, j...N$, образующие непустое конечное множество, соответствуют этим учебным модулям общим числом N . Подмножество S множества $N \times N$, составленного из элементов (i, j) , представлено дугами, связывающими различные модули и указывающими на возможность перехода от узла i к узлу j . Если пометить в этой сети каждый модуль целым числом, присвоив ему соответствующий номер таким образом, что будет справедливо неравенство $i < j$, и ввести *веса* дуг, связывающих соответствующие узлы, то общая схема образовательного процесса в определенном смысле может быть сведена к процедуре многошагового процесса принятия решений. Полагая в рамках структурно-компетентного подхода к обучению [1], что образовательный процесс в техническом вузе должен быть ориентирован прежде всего на обеспечение максимального уровня компетентности выпускников, будем считать, что в роли весов дуг должны выступать определенные некоторым образом частные коэффициенты компетентности [2]. Тогда проблема повышения компетентности в общем виде будет сводиться к отысканию траектории, при движении по которой от начального общеобразовательного модуля до конечного модуля дипломного проектирования происходило бы постепенное наращивание уровня компетентности f_i до его максимально возможного значения $f_{\max}$ аддитивным образом. Приращение t_{ij} к значе-

нию f_i при переходе от модуля i к модулю j будет равняться длине дуги (i, j) перехода от одного узла сети к другому. Для конкретности представим себе, что мы имеем дело с гипотетическим учебным процессом, насчитывающим всего девять учебных модулей (рис. 1).

На рис. 1 направление учебного процесса по пути $(1) \rightarrow (2) \rightarrow (4) \rightarrow (6) \rightarrow (8) \rightarrow (9)$ будет включать несколько частных подпутей, например $(2) \rightarrow (4) \rightarrow (6)$ и $(4) \rightarrow (6)$. Направление учебного процесса по траектории $(1) \rightarrow (3) \rightarrow (4) \rightarrow (5) \rightarrow (7) \rightarrow (9)$ (рис. 2) представляет наихудшую стратегию, поскольку эта стратегия обеспечивает наименьший уровень компетентности на выходе из стен учебного заведения, а по траектории $(1) \rightarrow (2) \rightarrow (4) \rightarrow (7) \rightarrow (9)$ (рис. 3) – наилучшую стратегию.

Помимо стратегий, изображенных на рис. 2 и 3, для гипотетического учебного процесса (см. рис. 1) можно выделить еще 63 возможные стратегии. В то же время существует единственная стратегия учебного процесса, являющаяся оптимальной для *всех* учебных модулей. Оптимизационная задача, сформулированная в этом варианте, включает целые классы подзадач, сами по себе также являющиеся оптимизационными, каждую из которых можно свести к задаче линейного программирования – максимизировать значение

$$[p_1(x_1) + p_2(x_2) + \dots + p_n(x_n) + \dots + p_N(x_N)] \quad (1)$$

при имеющихся ограничениях на ресурсы:

$$\begin{aligned} c_1(x_1) + c_2(x_2) + \dots + c_n(x_n) + \dots + c_N(x_N) &\leq K, \\ 0 \leq x_n &\leq B, n = 1, 2, \dots, N, x_n - \text{целые числа}, \end{aligned} \quad (2)$$

где K и B – константы; функции $c_n(x_n)$ неотрицательны и принимают целые значения, $c_n(x_n) = 0$; $p_n(x_n)$ – известные, но произвольные функции, обладающие свойством

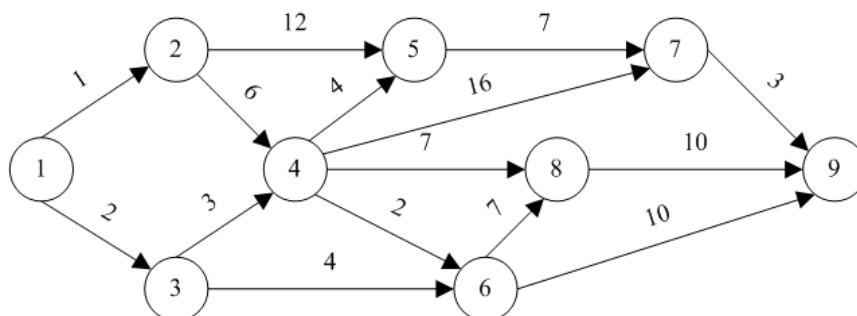


Рис. 1. Схема гипотетического учебного процесса, состоящего из девяти модулей.

Числа вдоль дуг соответствуют условным вкладам t_{ij} в уровень компетентности при движении от модуля к модулю

$p_n(x_n) = 0$. В сформулированной таким образом задаче функции $c_n(x_n)$ и $p_n(x_n)$ заданы, а переменными являются $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N$.

Если интерпретировать эту задачу в терминах проблемы повышения уровня компетентности выпускников, то функции $p_n(x_n)$ должны представлять собой не что иное, как аддитивные вклады в компетентность студентов, теоретически достижимую после прохождения ими дисциплин соответствующих учебных модулей, а функции $c_n(x_n)$ – имеющийся учебный ресурс (например, часы учебной нагрузки), необходимый для организации учебного процесса. В такой интерпретации задача линейного программирования заключается в максимизации уровня компетентности при условии, что общее количество учебных часов не выйдет за рамки предусмотренного стандартом объема аудиторных занятий в учебном плане. Решение оптимизационной задачи в этом варианте можно свести к рассмотрению многошагового процесса принятия решений, имея в виду, что обучение производится по курсам и семестрам.

Рассмотрим ситуацию, когда к определенному моменту времени обучение студенческой группы, начиная от первого и кончая $(n - 1)$ -м учебного модулем, уже закончилось. Пусть на этом этапе мы имеем недоиспользованный учебный ресурс некоторого объема, равный величине y . Эти оставшиеся недоиспользованными y единиц ресурса необходимо оптимально распределить с целью доведения учебного процесса до конца.

Пусть $f(n, y)$ – максимально возможный уровень компетентности, который можно обеспечить путем распределения y единиц учебного ресурса. Величина $f(1, K)$ является в данном случае решением исходной оптимизационной задачи, которая была погружена в семейство,

состоящее из $N(K + 1)$ задач. Теперь требуется определить значения $f(n, y)$ для $n = 1, 2, \dots, N$ и $y = 0, 1, 2, \dots, K$. Имеющаяся ситуация характеризуется с помощью пары значений (n, y) , в которой содержится вся информация, необходимая для принятия текущего решения в рассматриваемом узле сети, причем можно не учитывать того, каким образом произошел переход в состояние (n, y) . Значение $p_n(x_n) + f[n + 1, y - c_n(x_n)]$ представляет максимальный уровень компетентности, которого можно достичь путем перераспределения y единиц ресурса для организации учебного процесса. Максимизируя это выражение по x_n , будем искать величину

$$f(n, y) = \max_{x_n} \{p_n(x_n) + f[n + 1, y - c_n(x_n)] \mid x - \text{допустимо}\}. \quad (3)$$

Выражение (3) справедливо для $n \leq N$, если положить

$$f(N + 1, y) = 0, y = 0, 1, 2, \dots, K. \quad (4)$$

Это означает, что недоиспользованный ресурс оказывается бесполезным, и такое предположение применительно к учебному процессу вполне реалистично, поскольку при организации процесса обучения нельзя ввести понятие издержек учебного производства за переход недоиспользованного учебного ресурса в следующий период.

Соотношение (3) представляет собой систему функциональных уравнений, однако при решении задачи организации учебного процесса следует иметь в виду, что мы имеем дело не с четко сформулированной управленческой задачей, а с образовательным процессом, плохо поддающимся формализации. Сложность рассмотрения в данном случае заключается в том, что переходы осуществляются не просто от одного узла сети к другому, а от некоторого плохо формализуемого состояния к другому состоянию, причем отдельное состояние представляет

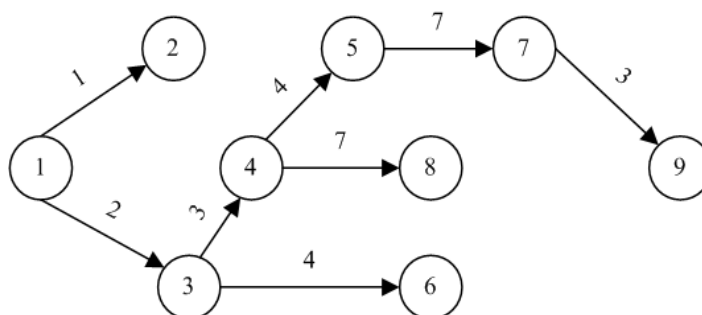


Рис. 2. Пример частной стратегии многошагового управления гипотетическим учебным процессом, обеспечивающей наименьший конечный уровень компетентности для сети, показанной на рис. 1

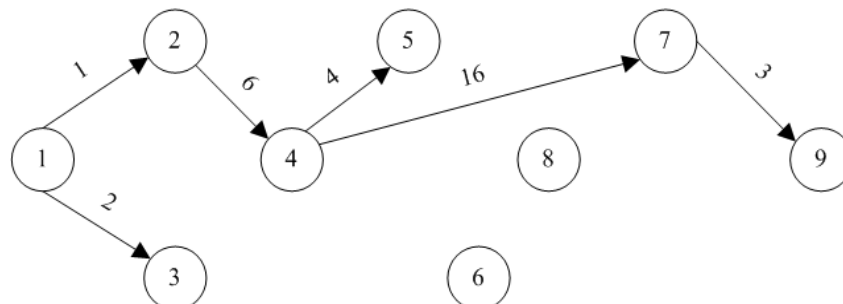


Рис. 3. Пример частной стратегии многошагового управления гипотетическим учебным процессом, обеспечивающей наибольший конечный уровень компетентности для сети (см. рис. 1)

собой точку учебного процесса, в которой принимается решение. Описание каждого такого состояния желательно провести с такой степенью детализации, которая позволила бы дать оценку альтернативным решениям, относящимся к организации учебного процесса.

При переходе на язык состояний погружение во множество оптимизационных задач эквивалентно введению понятия пространства состояний, представляющего собой множество возможных состояний системы:

$$S_n = \{(n, y) \mid y = 0, 1, 2, \dots, K\}. \quad (5)$$

Оптимальной стратегией в этом случае будет такая стратегия, которая станет оптимальной одновременно для каждого состояния, и будет обладать свойством, что какими бы ни были начальные состояния и решения, последующие решения станут формировать оптимальную стратегию для состояния, возникающего после первого перехода.

Еще одна сложность рассмотрения задачи оптимизации учебного процесса заключается в том, что мы имеем дело с переходами из одного неоднозначно определенного состояния системы в другое, и поэтому в данном случае чисто такой подход к разрешению проблемы оказывается несостоятельным. Можно сказать, что детерминистский подход к решению проблемы невозможен постольку, поскольку процесс обучения всегда содержит значительный элемент неопределенности. Поэтому при описании процесса наращивания компетентности при движении от состояния к состоянию мы вынуждены отойти от детерминистского подхода в пользу стохастического, передя на язык вероятностей и статистики. Введем в рассмотрение величину $f(n, i)$, представляющую собой максимальное значение математического ожидания уровня компетентности, который можно достигнуть в периодах $n, n+1, \dots, N$, если процесс обучения находится в состоянии (n, i) . Горизонт планирования учебного процесса в данном случае будет состоять из N периодов (семестров), каждый из которых нумеруется целыми числами от 1 до N , причем величина N связана со степенью образования и варьируется в зависимости от того, с кем мы имеем дело – бакалаврами, магистрами или стажерами. Переход от модуля к модулю эквивалентен переходу от периода n к периоду $n+1$.

Введем далее следующие обозначения: $R_j^k(n)$ – уровень компетентности, достигаемый при выборе k -го решения в (n, i) -м состоянии; $P_{ij}^k(n)$ – вероятность перехода из состояния (n, i) в состояние $(n+1, j)$ при выборе k -го решения. Величина

$$R_j^k(n) + \sum_j P_{ij}^k(n) f(n+1, j) \quad (6)$$

представляет собой математическое ожидание уровня компетентности при начальном состоянии (n, i) , выборе решения k и следовании оптимальной стратегии для дальнейшего движения от $n+1$ до N . Эта величина не может превышать значения $f(n, i)$. Путем максимизации выражения (6) по k можно получить следующее соотношение:

$$f(n, i) = \max[R_j^k(n) + \sum_j P_{ij}^k(n) f(n+1, j)]. \quad (7)$$

Оно справедливо при $n < N$, а также при $n = N$, если положить $f(n+1, j) \equiv 0$.

Если уровень компетентности задан (например, рынком), то исходя из этого уровня следует решать функциональное уравнение в направлении убывания n , т. е. ис-

пользовать метод обратной прогонки. В данной постановке задачи метод прямой прогонки оказывается непригодным, поскольку используемая модель является моделью марковского типа, которая описывает стохастический процесс, содержащий большой элемент неопределенности. В этой модели с конечным множеством состояний от 1 до m требуется максимизировать математическое ожидание уровня компетентности, полученное за весь процесс обучения студента. Для каждого такого состояния имеется конечный набор решений, однозначно соотносящийся с теми учебными методами и технологиями, которые применяются в данном состоянии. Можно ввести локальную функцию компетентности, равную

$$h(i, k, v) = R_j^k(n) + \sum_{j=1}^m P_{ij}^k v_j, \quad (8)$$

где $v(j)$ сокращено до v_j в силу того, что $v(j)$ является элементом вектора v размером $m \times 1$. Решения принимаются в периоды 0, 1, 2, ... и т. д., представляющиеся одинаковыми промежутками времени, равными по продолжительности отдельным семестрам, величина c – это показатель дисконтирования за период, $0 \leq c \leq 1$.

Допустим, в период n наблюдается состояние i и выбрано решение k . По локальной функции компетентности следует, что вероятность перехода из состояния i в состояние j в период $(n+1)$ равна P_{ij}^k . Логично сделать предположение о том, что

$$\sum_{j=1}^m P_{ij}^k \leq 1. \quad (9)$$

Это неравенство предполагает, что стохастический процесс обучения может быть искусственно приостановлен на некотором шаге (например, студент может быть отчислен из-за крайне низкого уровня компетентности). В случае прерывания процесса переход в некоторое другое состояние в следующем периоде (семестре) не осуществляется.

Процесс обучения начинается в момент зачисления абитуриента и может продолжаться неопределенно долго при учете послевузовских форм обучения и повышения квалификации. При таком подходе стратегия γ определяет решение $\delta(i)$ для состояния i . Уровень компетентности, достигаемый стратегией δ , можно представить с помощью m -мерного вектора R^δ , а вероятность переходов – записать в виде матрицы переходных вероятностей P^δ размера $m \times m$:

$$(R^\delta)_i = R^{\delta(i)}, \quad (10)$$

$$(P^\delta)_{ij} = P_{ij}^{\delta(i)}. \quad (11)$$

Модель с дисконтированием (переходный режим) можно определить как модель, в которой выполняются следующие гипотезы:

– гипотеза 1:

$$c \sum_{j=1}^m P_{ij}^k < 1 \text{ при всех } i, k; \quad (12)$$

– гипотеза 2: для всякой стратегии обучения собственные значения

$$|cP_1| < 1. \quad (13)$$

Гипотеза 1 справедлива, если соотношение $\sum_{j=1}^m P_{ij}^k < 1$ выполняется как строгое неравенство, или если $c < 1$. Это означает, что процесс может остановиться на некотором

шаге, т. е. переход в следующее состояние не осуществляется. Стратегия 2 определяет режим переходного периода.

Для того чтобы $(cP^\delta) \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, достаточно выполнения любой из двух приведенных выше гипотез. При этом неймановская последовательность $1 + (cP^\delta) + (cP^\delta)^2 + \dots$ сходится к матрице, обратной к $(I - cP^\delta)$. В этом случае I – единичная матрица размера $m \times m$. Поскольку в рассматриваемой модели имеется m состояний, то функцию уровня компетентности для стратегии δ можно записать в виде вектора длиной m , а уравнение стратегий переписать в матричном виде. Для того чтобы получить само уравнение стратегий, необходимо учитывать, что каждая стратегия обучения δ связана с функцией компетентности v^δ , где $v^\delta(s)$ определяет агрегированный уровень компетентности, которого можно достигнуть, исходя из состояния s и используя стратегию обучения δ . Выражение «использовать стратегию обучения» означает, что в состоянии s выбирается решение $\delta(s)$, затем предполагается, что процесс перешел в состояние s' , в котором выбирается решение $\delta(s')$ и т. д. Функция уровня компетентности зависит от последовательности состояний и решений о вознаграждениях, связанных с рейтинговой системой вуза, а также от способа агрегирования поощрений, т. е. от того, насколько удачно рейтинговая система вписывается в структуру управления учебным процессом.

Если ограничиться состоянием s и отдельным решением d , то можно рассматривать многошаговый процесс принятия решений как усеченный. В этом случае такой процесс ведет себя так же, как исходный неусеченный процесс, но только в течение одного перехода, а затем останавливается. Закон перехода и способ агрегирования вознаграждений отражаются в неявном виде посредством функции компетентности v . Отсюда должен произойти переход из состояния s в состояние s' , при котором теоретически может быть получено вознаграждение $v(s')$ в виде соответствующих оценок или баллов, а затем процесс останавливается.

Состояния s , решение d и дисциплинарная функция компетентности v являются тремя переменными для модульной функции компетентности $h(s, d, v)$, которая определяется как суммарный уровень компетентности, получаемый в усеченном одношаговом процессе, причем сам процесс начинается из состояния s , где принимается решение d , а дисциплинарная функция вознаграждения есть v . Функция v отображает множество s на действительную ось. Корректной функции v в действительности существовать не может, поскольку при изучении какой-то отдельной дисциплины, входящей в соответствующий модуль, нельзя учесть все составляющие компетентности и абсолютно точно вычислить уровень показателей, позволяющий выпускнику соответствовать требованиям рынка. Поэтому введение функции v позволяет лишь формально записать способ перехода процесса принятия решений при обучении студентов и сформулировать метод агрегирования вознаграждений, базирующийся на рейтинговой системе.

Модульная функция компетентности может быть разъяснена следующим образом. Если видоизменить модель распределения учебного ресурса, в которой со-

стояние s в соответствии с выражением (5) определяется парой (n, y) , а решением является x_n , то модульная функция компетентности принимает вид

$$h[(n, y), x_n, v] = p_n(x_n) + v[n + 1, y - c_n(x_n)] < N. \quad (14)$$

В этом случае осуществляется переход в состояние $[n + 1, y - c_n(x_n)]$, и в данный момент будет получено дисциплинарное вознаграждение. Поскольку компетентность является аддитивной величиной, мы должны добавить это значение к $p_n(x_n)$. Но выражение (14) несправедливо при $n = N$. Действительно, если требовать чтобы состояниям соответствовали связанные с ними решения, т. е. чтобы множество $D(s)$ было не пусто, то исчезает возможность вводить состояние $(N + 1, z)$. Таким образом, переход осуществляется из состояния N , образно выражаясь, «в никуда», и при этом

$$h[(n, y), x_n, v] = p_N(x_N). \quad (15)$$

Если ограничиться таким подходом, то оказывается, что выпускник технического вуза, получив диплом, прерывает не только связь с «alma mater», но весь процесс образования, что ограничивает возможности повышения уровня компетентности в ходе дальнейшего послевузовского образования. Изменяя v , можно восстановить нормальный закон протекания процесса, величины вознаграждений и способ их агрегирования. При наличии нескольких стратегий возникает проблема их оценки. Для решения этой проблемы воспользуемся уравнением оценки стратегий:

$$v^\delta(s) = h[s, \delta(s), v^\delta], \quad (16)$$

где все $s \in \delta$.

В этом уравнении в левой части записан уровень компетентности, который обеспечивает использованием стратегии δ , а справа – компетентность при использовании дисциплинарной функции компетентности v^δ . Возникает вопрос о наличии возможных решений этого уравнения и единственности существования функции компетентности, удовлетворяющей уравнению (16). В случае положительного ответа v^δ определяется как единственная неподвижная точка оператора $h[s, \delta(s)]$. Принцип оптимальности утверждает, что существует такая стратегия π , которая является оптимальной для всех состояний, откуда вытекает, что для такой стратегии функция компетентности v^π будет наилучшей из всех возможных в том смысле, что при всех s из S и всех δ из Δ

$$v^\pi(s) \geq v^\delta(s). \quad (17)$$

С математической точки зрения неравенство (17) отражает факт существования такой учебной стратегии, функция компетентности для которой является верхней огибающей функцией компетентности для всех других возможных стратегий. Если рассматривается стратегия π , в которой первое решение $\pi(s)$ изменено, а все остальные остаются прежними, то это изменение не оказывает влияния на компетентность, полученную после перехода и поэтому при всех s и всех d

$$v^\pi(s) \geq h'[s, d, v^\pi]. \quad (18)$$

В результате получим следующее соотношение:

$$v^\pi(s) = \max_d \{h'[s, d, v^\pi]\} \text{ при всех } s. \quad (19)$$

Отметим, что принцип оптимальности эквивалентен утверждению о том, что оптимальная функция компе-

тентности v^* существует и является решением функционального уравнения.

Возвращаясь к модели с дисконтированием и переходному режиму, запишем уравнение стратегий в виде

$$v^\delta = R^\delta + cP^\delta v^\delta. \quad (20)$$

или

$$(I - cP^\delta) = R^\delta, \quad (21)$$

где P^δ и R^δ взяты в соответствии с (10) и (11). Для матрицы $(I - cP^\delta)$ существует обратная матрица, поэтому

$$v^\delta = (I - cP^\delta)^{-1} R^\delta. \quad (22)$$

Отсюда следует, что уравнение стратегий имеет единственное решение, когда справедлива гипотеза 1 (12) либо (13). В этом случае можно рассмотреть задачу линейного программирования, полагая, что суммирование ведется по всему набору индексов, и вводя пределы суммирования

$$\{\sum_j \sum_k R_i^k x_i^k\} \rightarrow \max \quad (23)$$

при ограничениях

$$\sum_k x_i^k - c \sum_j \sum_k x_j^k P_{ij}^k = \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad x_i^k \geq 0 \quad \text{при всех } i, k, \quad (24)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ — любые положительные действительные числа. Известно, что данная задача допустима и ограничена, а ее оптимальный базис обладает следующими свойствами:

- 1) для каждого i переменная x_i^k положительна только для одного k ;
- 2) $\pi(i) = k$ всякий раз, когда $x_i^k > 0$ и стратегия является оптимальной.

Таким образом, стратегия π удовлетворяет формуле (22) и принципу оптимальности. Кроме того, v^* представляет собой вектор двойственных переменных и удовлетворяет условиям дополняющей нежесткости для любого оптимального базиса прямой задачи. В то же время данная задача разрешается в рамках леонтьевской системы, одна из особенностей которой состоит в том, что один и тот же базис оптимален для всех положительных правых частей системы (24). Именно поэтому значения констант α_i несущественны, если они положительны. Хотя приведенная модель с дисконтированием дает решения со многими состояниями при использовании метода аппроксимации, число возможных решений для каждого состояния не слишком велико.

Применительно к организации учебного процесса эта модель показывает, что при любой форме организации и любых учебных технологиях имеется единственная оптимальная стратегия, обеспечивающая для заданных условий наиболее высокий уровень компетентности выпускников, который определяется аддитивной функцией компетентности [1], базирующейся на дисциплинарной и модульной функциях. В случае если мы имеем дело с открытым образованием, целесообразнее использовать модель без дисконтирования. Для этой модели, не предусматривающей вероятности остановки образовательного процесса, выполняется следующая гипотеза:

$$c = 1, \quad \sum_j P_{ij}^k = 1 \quad \text{для всех } i, k. \quad (25)$$

В этой модели процесс принятия решений продолжается бесконечно. Вознаграждение в виде оценок получа-

ется в каждый период, в то время как будущий доход не дисконтируется. В этом случае суммарная компетентность, достигнутая за первые n периодов, теоретически должна стремиться к бесконечности при $n \rightarrow \infty$ независимо от того, какая стратегия используется. В этом случае суммарное вознаграждение в виде оценок уже не является критерием, согласно которому можно выделять плохие и хорошие стратегии. Используя модели без дисконтирования, можно наиболее просто максимизировать средний уровень успеваемости за единицу времени. В этом случае приходится говорить о росте или снижении успеваемости, что само по себе может отражать изменение уровня компетентности лишь отчасти. Возвращаясь к задаче линейного программирования (23) при ограничениях

$$\sum_k x_i^k - \sum_j \sum_k x_j^k P_{ij}^k = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (26)$$

$$\sum_j \sum_k x_j^k P_{ij}^k = 1, \quad x_j^k \geq 0 \quad \text{при всех } i, k, \quad (27)$$

мы видим, что приведенная модель допустима и ограничена. Ее оптимальный базис обладает следующими свойствами: для каждого i переменная x_j^k положительна не более чем для одного k , а определенные ниже переходные вероятности образуют одну эргодическую цепь $\{P_{jj}^k(x_j^k > 0)\}$. Темп роста средней успеваемости для данной эргодической цепи является наибольшим среди всех возможных цепей. Иначе говоря, имеется возможность найти эргодическую цепь с максимальным темпом роста средней успеваемости. Эта цепь всегда будет давать наилучший темп прироста успеваемости для тех состояний, которые ее образуют. В большинстве случаев при организации учебного процесса такие состояния достижимы из других состояний, поэтому указанная эргодическая цепь дает наилучший темп роста для всех состояний. Однако в сложных случаях при возникновении нескольких таких цепей, например если обучение ведется по нескольким специальностям, эту задачу придется решать многократно с использованием процедуры типа декомпозиции. Максимальный темп роста средней успеваемости для модели без дисконтирования можно определить с помощью метода итеративных стратегий. В очень простых случаях метод итеративных стратегий равнозначен блочному преобразованию в двойственном симплекс-методе, как и в модели с дисконтированием.

Таким образом, мы убеждаемся, что организация учебного процесса в техническом вузе может представляться многошаговым процессом, базирующимся на вероятностных состояниях, включающих всю учебную предысторию. В ходе этого процесса вырабатываются самые различные стратегии, включая и наиболее оптимальную, которая может быть реализована посредством использования эффективных педагогических технологий, обеспечивающих выход на диктуемый рынком уровень компетентности. Поэтому на следующем этапе плодотворного использования модельной концепции в рамках структурно-компетентностного подхода встает задача рассмотрения, обсуждения, отбора и встраивания в учебный процесс таких педагогических технологий, которые могли бы наиболее продуктивно повышать компетентность выпускника в ходе учебного процесса.

Библиографический список

1. Анализ состояния, методика оценки и пути повышения уровня компетентности выпускников инженерного вуза / Г. М. Гринберг, М. В. Лукьяненко, Н. И. Пак, Н. П. Чурляева // Машиностроение и инженерное образование. 2005. № 2.

2. Гринберг, Г. М. Методика оценки компетентности, как многофункционального показателя качества обучения выпускников высшей школы / Г. М. Гринберг, М. В. Лукьяненко, Н. П. Чурляева // Внутривузовские системы обеспечения качества подготовки специалистов : материалы междунар. конф. Красноярск, 2004.

N. P. Churlyayeva

**THE PROCESS OF EDUCATION AS A MULTYSTADIAL MOVEMENT TOWARDS
MAXIMUM STUDENT COMPETENCY ALONG THE PATH DETERMINED
BY EDUCATIONAL MODULES NETWORK**

Here we present process of education as a multistadial process of decision making at the turning points where educational prehistory is statistically considered. During this process various strategies are elaborated including the optimal one which incorporates appropriate pedagogical technologies designed to achieve necessary competency level.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Адрианов Александр Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Ленинградский механический институт в 1982 г. Область научных интересов – вычислительная аэрогазодинамика, ударные волны, разностные схемы, вычислительные алгоритмы.

Базилевский Александр Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1971 г. Область научных интересов – системы электропитания космических аппаратов, солнечные аккумуляторные батареи.

Белякова Елена Владимировна – кандидат экономических наук, доцент кафедры маркетинга Сибирского государственного аэрокосмического университета имени М. Ф. Решетнева. Окончила завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1986 г. Область научных интересов – логистика, региональная экономика.

Бочаров Алексей Николаевич – старший преподаватель кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1996 г. Область научных интересов – автоматизация производственных процессов, системы управления электронно-лучевой сваркой.

Веретнова Наталья Владимировна – аспирант кафедры международного бизнеса Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный технологический университет в 2001 г. Область научных интересов – региональная экономика.

Деменко Виктор Валерьевич – инженер 2-й категории ФГУП «Научно-производственное объединение „Орион“», (Краснознаменск).

Демиденко Николай Данилович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Томский государственный университет имени В. В. Куйбышева. Область научных интересов – моделирование и оптимизация распределительных систем.

Ерыгин Юрий Владимирович – кандидат экономических наук, заведующий кафедрой финансов и банковского дела Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Алтайский политехнический институт имени И. И. Ползунова в 1985 г., аспирантуру Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина в 1989 г. Область научных интересов – управление инновационной деятельностью предприятий, финансовое планирование инвестиционной и текущей деятельности предприятий.

Жданов Олег Николаевич – кандидат физико-математических наук, докторант кафедры высшей математики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1986 г. Область научных интересов – уравнения математической физики.

Замятин Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный технический университет. Область научных интересов – системы электропитания космических летательных аппаратов, импульсные системы автоматического регулирования, оптимальные системы.

Зубарев Николай Михайлович – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и организации производства Восточно-Сибирского государственного технологического университета, директор Забайкальского предприятия «Межсистемные электрические сети Сибири».

Карелин Олег Игоревич – аспирант кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область интересов – инновационная и инвестиционная деятельность.

Кольга Вадим Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов, проректор по довузовской и воспитательной работе Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский инженерно-строительный институт в 1983 г. Область научных интересов – профессиональная педагогика, непрерывное аэрокосмическое образование.

Кошкин Юрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Кемеровский государственный университет в 1985 г. Область научных интересов – псевдодобулевая оптимизация.

Кузнецов Евгений Валерьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инженерной экологии Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию имени академика М. Ф. Решетнева в 1998 г. Область научных интересов – инженерная экология, гидроаэродинамика.

Кулагина Людмила Владимировна – магистр техники и технологии, аспирант кафедры ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии» Красноярского государственного технического университета. Окончила Красноярский государственный технический университет в 2005 г. Область научных интересов – моделирование и управление системами с распределительными параметрами.

Лаптенко Валерий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1968 г. Область научных интересов – комплексное решение задач автоматизации электронно-лучевой сварки, процессов аргонодуговой сварки, пайки алюминия.

Левко Валерий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1987 г. Область научных интересов – абразивно-экструзионная обработка.

Лесных Андрей Николаевич – аспирант кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил магистратуру Сибирского государственного аэрокосмического университета в 2005 г. Область научных интересов – системы электропитания космических летательных аппаратов, системы автоматизированного проектирования экспертных систем, автоматизированные системы научных исследований.

Ловчиков Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1970 г. Область научных интересов – системы автоматизированного проектирования, системы электропитания космических аппаратов.

Лукьяненко Михаил Васильевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, советник Российской инженерной академии, почетный работник высшего профессионального образования, награжден медалями имени Н. А. Пилюгина и М. Ф. Решетнева Федерации космонавтики России. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1967 г. Область научных интересов – космическая энергетика.

Меркулов Александр Борисович – инженер центра довузовской подготовки и профориентации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2005 г. Область научных интересов – педагогика, информатика.

Мизрах Енис Аврумович – кандидат технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, почетный работник высшего профессионального образования, награжден медалью имени В. П. Глушко Федерации космонавтики России. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1967 г. Область научных интересов – имитационное моделирование систем электроснабжения космических аппаратов.

Михайлов Алексей Валерианович – кандидат филологических наук, доцент, заведующий кафедрой общественных связей Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Чувашский государственный университет в 1985 г. Область научных интересов – социальные технологии.

Михайлова Татьяна Витальевна – кандидат филологических наук, доцент кафедры общественных связей Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярский государственный университет в 1986 г. Область научных интересов – лингвистика, политические исследования, речевое воздействие, консалтинг.

Михалев Герман Семенович – кандидат экономических наук, доцент, профессор кафедры международного бизнеса, заведующий кафедрой маркетинга и стратегического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, член-корреспондент Международной академии холода. Окончил Красноярский политехнический институт в 1972 г. Область научных интересов – хозяйственный механизм промышленных предприятий и комплексов, стратегический менеджмент.

Мурыгин Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1980 г. Область научных интересов – автоматизация производственных процессов, системы управления электронно-лучевой сваркой.

Носенков Александр Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования машин и электронного машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Омский институт инженеров транспорта в 1964 г., аспирантуру Ленинградского механического института в 1979 г. Область научных интересов – разработка и экспериментальная обработка космической техники.

Сарычев Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1974 г. Область научных интересов – системы управления и вычислительной техники.

Саханский Сергей Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управленческих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1977 г. Область научных интересов – комплексное решение задач автоматизации процессов выращивания монокристаллов германия, автоматизации процессов управления очисткой сточных вод промышленных предприятий.

Сугак Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры конструирования машин и электронного машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Ленинградский технологический институт имени Ленсовета. Область научных интересов – инженерная экология, гидроаэродинамика, промышленная безопасность.

Хартов Виктор Владимирович – кандидат технических наук, главный конструктор электрического проектирования и испытаний космических аппаратов ФГУП «Научно-производственное объединение прикладной механики имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил Томский политехнический институт в 1978 г. Область научных интересов – системы управления космических аппаратов.

Чурляева Наталья Петровна – кандидат экономических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярский институт цветных металлов имени М. В. Калинина в 1977 г. Область научных интересов – инженерная педагогика.

Шайдунов Владимир Викторович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Новосибир-

ский государственный университет в 1979 г. Область научных интересов – математическое моделирование в гидроаэродинамике и газовой динамике.

Шахрай Сергей Георгиевич – соискатель кафедры инженерной экологии Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский технологический институт в 1982 г. Область научных интересов – экологические проблемы цветных металлов.

Щепановская Галина Ивановна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончила Новосибирский государственный университет в 1969 г. Область научных интересов – математическое моделирование в гидроаэродинамике и газовой динамике.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА	3
Жданов О. Н. Решение задач Коши для системы уравнений, описывающей одномерный поток гранулированного материала	5
Кошкин Ю. Г. Метод отсечений для решения одного класса задач условной псевдобулевой оптимизации	7
Адрианов А. Л. Выделение разрывов в двумерных течениях невязкого и вязкого теплопроводного газа	11
Сугак Е. В., Кузнецов Е. В., Шахрай С. Г. Динамика газодисперсного потока в вертикальном канале	18
Мизрах Е. А. Исследование статической точности имитаторов солнечных батарей	24
Замятин Д. В., Ловчиков А. Н. Методика синтеза оптимальных по быстродействию систем	28
Шайдунов В. В., Щепановская Г. И. К вопросу о снижении плотности в набегающем потоке перед летательным аппаратом	31
РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА	37
Хартов В. В. Макросеть на основе расширенных и интерпретированных сетей Петри для представления правил принятия решений при автономном управлении космическими аппаратами	39
Хартов В. В. Сеансно-временной метод автономного управления	44
Лесных А. Н., Сарычев В. А. Автоматизированная система научных исследований для синтеза систем электропитания космических аппаратов	48
Деменко В. В. Способы расчета границы зоны видимости поверхности Земли с космического аппарата при различной ориентации и размерах телесного угла наблюдения	53
Мизрах Е. А. Частотный метод динамического синтеза имитаторов первичных источников электроэнергии космических аппаратов	56
Ловчиков А. Н., Сарычев В. А. Особенности применения различных законов управления секциями в шунтовых секционных стабилизаторах напряжения	60
Базилевский А. Б., Лукьяненко М. В. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных батарей	63
Лукьяненко М. В. Энергетическая модель никель-водородных аккумуляторов	67
Кольга В. В., Меркулов А. Б. Методика оценки эффективности деятельности интегративной педагогической системы аэрокосмического образования	72
РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ	79
Бочаров А. Н., Мурыгин А. В. Определение ширины плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению при электронно-лучевой сварке	81
Саханский С. П. Основные математические соотношения контактного метода управления выращиванием монокристаллов по способу Чохральского	85
Саханский С. П., Лаптенко В. Д. Определение величины коррекции сигнала управления по диаметру от изменения высоты столбика мениска кристалла при контактном методе управления выращиванием монокристаллов способом Чохральского	89
Демиденко Н. Д., Кулагина Л. В. Математическое моделирование процессов в технологических печах	91
Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке	96
Носенков А. А. Адаптация и совместимость современной техники	101

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА, СОЦИОЛОГИЯ	105
Ерыгин Ю. В., Карелин О. И. Инструменты определения форм и способов финансирования инновационной деятельности на предприятиях оборонно-промышленного комплекса	107
Белякова Е. В. Проблемы эффективного развития экономики региона	112
Белякова Е. В., Веретнова Н. В. Конкурентоспособность региональной экономики	116
Михалев Г. С. Хозяйственный механизм как научная категория	121
Зубарев Н. М. Промышленная политика: состояние и методологические подходы к формированию нового взгляда на стратегическое развитие	125
Михалев Г. С. Методологические основы алгоритма формирования корпоративных образований	129
Михайлов А. В. Вербальные средства и приемы обеспечения единства группового сознания	135
Михайлов А. В., Михайлова Т. В. Взаимодействие моделей построения общества в древнерусских текстах	141
Чурляева Н. П. Многошаговый процесс обучения как движение в направлении увеличения компетентности студента по траектории, заданной учебными модулями	146
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	152

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, INFORMATICS	3
Zhdanov O. N. The solution of Cauchy problem for system, describing one-dimensional flows of granular material	6
Koshkin Yu. G. The cutting-off method for one class of problems of conditional pseudoboolean optimization	10
Adrianov A. L. Shock wave schematization in the 2D inviscid and viscous heat conducting flows	17
Sugak E. V., Kuznetsov E. V., Shakhrai S. G. The dynamics of gas-dispersion flow in the uptake	23
Mizrakh E. A. Analysis of static accuracy of solar batteries simulators	27
Zamyatin D. V., Lovchikov A. N. Time optimal systems synthesis methodic	30
Shaidurov V. V., Shchepanovskaya G. I. The problem of density decrease for filling flow in front of aircraft	35
 PART 2. AVIATION AND SPACE ENGINEERING	 37
Khartov V. V. Macronet on the bases of enlarged and interpreted Petri nets to provide canons of arrival at a decision when backup control by spacecrafts	43
Khartov V. V. The time-session off-line control method	47
Lesnykh A. N., Sarychev V. A. Computer-aided system of research activities for synthesis of spacecrafts power-supply systems	52
Demenko V. V. Methods of estimation of visibility zones on Earth surface from a space vehicle for different orientations and solid angle values	55
Mizrakh E. A. The frequency method of dynamic synthesis of primary power supply simulators of spacecrafts	59
Lovchikov A. N., Sarychev V. A. The features of application of various laws of management section in shunt section voltage stabilizers	62
Basilevsky A. B., Lukyanenko M. V. Modeling of voltage-current characteristic of solar batteries	66
Lukyanenko M. V. The energy model of nickel-hydrogen storage battery	71
Kolga V. V., Merkulov A. B. Method of activity effectiveness evaluation of aerospace education integrated pedagogical system	77
 PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS	 79
Bocharov A. N., Murygin A. V. The defining of width energy distribution density in section of electron beam	84
Sakhansky S. P. Major mathematical ratios of contact monitoring method of monocrystal growth by czochralski method	88
Sakhansky S. P., Laptinok V. D. Sizing of diameter monitoring signal correction on crystal meniscus bump height change at contact monitoring method of monocrystal growth by czochralski method	90
Demidenko N. D., Kulagina L. V. The mathematical simulating of processes occurring in technological furnaces	95
Levko V. A. The rheology singularities of abrasive media for abrasive flow machining process	100
Nosenkov A. A. The adaptation and compatibility of modern engineering	104

PART 4. ECONOMICS, SOCIOLOGY	105
Yerigin Yu. V., Karelin O. I. The instruments for determining of forms and methods of financing of innovative activities at the defense industrial complex enterprises	111
Belyakova E. V. The problems of effective development of economy of the region	115
Belyakova E. V., Veretnova N. V. The competitiveness of the region economics	120
Mikhalev G. S. The economic mechanism as a scientific category	124
Zubarev N. M. Industrial Policy: the condition methodological approaches to the creation of the view on the strategic development	128
Mikhalev G. S. The methodological bases of algorithm of corporations projection	134
Mikhaylov A. V. The verbal methods of the unity maintenance of the society consciousness	140
Mikhaylov A. V., Mikhaylova T. V. Two models of building old russian community on the basis of the texts of the XI–XVI centuries	145
Churlyueva N. P. Process of education as a multystadial movement towards maximum student competency along the path determined by educational modules network	151
THE INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	152

Научное издание

**ВЕСТНИК
СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика М. Ф. Решетнева**

Выпуск 7

Редакторы

Т. А. ЕРМОЛАЕВА, Е. Г. НЕКРАСОВА

Компьютерная верстка

А. А. ФИЛОНОВА

Подп. в печать 25.11.2005. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд. л. 24,48.

Тираж 500 экз. Заказ 680. С 67.

Редакционно-издательский отдел Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

Отпечатано в типографии «Город».
660125, г. Красноярск, ул. Водопьянова, 2-241.